

Rafael Henrique Eckstein

**SISTEMA PARA CONEXÃO DE PEQUENOS  
AEROGERADORES COM A REDE ELÉTRICA: ANÁLISE,  
PROJETO E EXPERIMENTAÇÃO.**

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. Telles Brunelli  
Lazzarin  
Coorientador: Prof. Dr. Ing. Ivo Barbi

Florianópolis  
2014



Folha da ficha de identificação da biblioteca

Rafael Henrique Eckstein

**SISTEMA PARA CONEXÃO DE PEQUENOS  
AEROGERADORES COM A REDE ELÉTRICA: ANÁLISE,  
PROJETO E EXPERIMENTAÇÃO.**

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, 12 de Dezembro de 2014

---

Prof. Dr. Carlos Galup Montoro  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Eng. Hermes Lacerda Queiroz

---

Prof. Dr. Carlos Henrique Illa Font  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Roberto Francisco Coelho  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Gierri Waltrich  
Universidade Federal de Santa Catarina

*Aos meus pais Elói José Eckstein e Janete Eckstein,  
Aos meus irmãos Júnior e Daniele,  
À minha namorada Andresa C. E. dos Santos,  
Eu dedico este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elói e Janete, por terem me ajudado em todas as etapas da minha vida e nunca desistido.

À Andresa C. E. dos Santos por ter me acompanhado nos bons e maus momentos nesses anos de mestrado, por nunca ter me deixado me abater e principalmente por ser minha namorada.

Aos meus irmãos, Junior e Daniele, que conviveram desde sempre comigo e me moldaram a ser quem sou hoje e que também sempre estenderam a mão quando necessitei.

Ao professor Telles Lazzarin, por sua amizade e pela sua dedicação em todo o processo de orientação deste trabalho. Ao professor Ivo Barbi pela coorientação, pela oportunidade de ingressar no mestrado e pelas ótimas aulas que tive o prazer de presenciar.

Aos membros da banca pelas contribuições.

A todos os funcionários e técnicos do INEP, que sempre estiveram à postos para qualquer necessidade que pudesse surgir.

Aos colegas de turma Jefferson Zanotti, Rômulo Schweitzer, Rodrigo Piontkewicz, Delvanei Bandeira Jr., Marcos Jacoboski e Rafael Faust, pela amizade e por todas as horas de estudo.

Aos amigos André Andretta, Luis Juarez Camurça, Lenon Schmitz, Diego L. S. Solano e Eduardo Valmir de Souza pelas várias horas de conversa no INEP, na cafeteria, na feira e no ru, mas principalmente pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos Felipe Noryuki, Juliano D. Teixeira, João “Rip” Fragonesi, Paulo B. Zanetti e Thiago Boldrini pelas boas conversas e risadas nesses últimos anos.

Aos amigos Felipe Adachi, Lucas Botton, Jaqueline Wobeto, Alexandre Fujimoto, Jean e Lucas Werlang, Zélio Nehpes, Cassiano Dalberto e Rômulo “Perna” Machado, pela companhia durante toda minha infância e pela compreensão pelas ausências.

E por fim, ao Capes pelo incentivo financeiro, que sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.



## RESUMO

Nos últimos anos, a geração de energia elétrica por pequenos aerogeradores tem sido um importante tópico de pesquisa, pois é uma fonte limpa, sustentável e renovável de energia elétrica. Além disso, é um sistema que possui um apelo socioeconômico devido ao potencial tanto para proporcionar energia em áreas isoladas quanto para fornecer economia aos consumidores em áreas atendidas pelas concessionárias. A produção de energia elétrica por pequenas turbinas eólicas pode ser implementado, com uma boa rentabilidade ao longo do tempo, em vários lugares, tais como casas, torres de telecomunicações, plataformas de petróleo, escolas e clínicas rurais. A conexão de pequenos geradores a rede elétrica foi regulamentada no Brasil com a resolução normativa nº 486/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica. No entanto, a popularização da energia eólica em pequena escala conectada a rede elétrica depende de soluções que forneçam sistemas simples, robustos, de baixo custo e o com tecnologia nacional. Visando este cenário, este trabalho propõe um sistema que permite a conexão entre turbinas eólicas de pequeno porte à rede. A estrutura é composta por um retificador passivo, um conversor CC-CC *Buck* e um inversor Push-Pull. O trabalho aborda a estrutura de potência, a qual é nova e proposta neste estudo, e o sistema de controle, o qual utiliza um circuito integrado UC3854, proporciona a extração da máxima potência do gerador e a injeção de uma corrente senoidal na rede elétrica. Análise, projeto e experimentação foram realizados para um aerogerador de 1kW.

**Palavras-chave:** Conexão com a rede elétrica, técnica de MPPT, robustez, aerogerador de baixa potência.



## ABSTRACT

In recent years, low power wind system has been an important topic of research, with a large socioeconomic appeal, because it is a renewable, clean, sustainable and alternative source of electric energy. The electricity production by low power wind systems can be implemented in several places, such as homes, telecommunications towers, oil rigs, schools and rural clinics with a good profitability over time. However, the popularization of renewable energy in low scale depends of new solutions that provide simple, robust and cost-effective systems. Aiming this scenario, this dissertation proposes a system that enables the connection between small wind turbines and the mains, based on a passive rectifier, DC-DC *Buck* converter and Push-Pull inverter. The proposed system was analysed, designed and verified for a 1kW small wind turbine.

**Keywords:** Grid connection, MPPT control, robust system, Small wind turbine.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 – Antigo moinho de vento[3].   | 30 |
| Figura 1.2 - Moinhos de ventos situados na Holanda [5].   | 31 |
| Figura 1.3 – Turbina de Charles F. Brush [7].   | 32 |
| Figura 1.4 – Visualização do aumento da potência processada em função do diâmetro do rotor em três décadas [8]. | 33 |
| Figura 1.5 – Evolução da capacidade instalada da fonte eólica [10].   | 34 |
| Figura 1.6 – Aplicações de aerogeradores de pequeno porte. ....   | 35 |
| Figura 1.7 - Sistema Isolado [12].  | 37 |
| Figura 1.8 – Topologia comum utilizada em sistemas isolados.  | 37 |
| Figura 1.9 – Sistema conectado a rede elétrica [13].  | 38 |
| Figura 1.10 – Simples topologia para conexão de aerogeradores na rede elétrica.                                 | 38 |
| Figura 1.11 – Topologia composta por um retificador passivo, conversor CC-CC e um inversor.                     | 39 |
| Figura 1.12 – Sistema formado por um conversor <i>Back-to-Back</i> .  | 39 |
| Figura 1.13 – Topologia do sistema proposto.  | 41 |
| Figura 2.1 - Sistema proposto.  | 43 |
| Figura 2.2 – Etapas de operação no semiciclo positivo da rede elétrica.   | 45 |
| Figura 2.3 - Etapas de operação no semiciclo negativo da rede elétrica.   | 46 |
| Figura 2.4 – Turbina Eólica Gerar 246.  | 47 |
| Figura 2.5- Modelo Elétrico da Turbina Eólica.  | 48 |
| Figura 2.6 - Ponte de Graetz.   | 48 |
| Figura 2.7 - Correntes de saída da ponte retificadora.  | 49 |
| Figura 2.8 - Característica da turbina eólica integrada com a ponte de Graetz.                                  | 49 |
| Figura 2.9 - Estrutura de potência conversor <i>Buck</i> convencional.  | 50 |
| Figura 2.10 - Conversor CC-CC <i>Buck</i> - Circuito Equivalente. ..  | 50 |
| Figura 2.11 - Tensão no Indutor.  | 51 |
| Figura 2.12 - Corrente no Indutor.  | 51 |
| Figura 2.13 – Curva que representa a evolução da razão cíclica em função de $\theta$ .                          | 53 |
| Figura 2.14 – Forma de onda da corrente no indutor.   | 54 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.15 - Corrente no interruptor controlado em meio período da rede elétrica. ....   | 55 |
| Figura 2.16 – Sistema proposto sem a presença de capacitores no barramento CC. ....   | 56 |
| Figura 2.17 – Sistema proposto com a inclusão de capacitores no barramento CC. ....   | 56 |
| Figura 2.18 - Conversor CC-CC <i>Push-Pull</i> tradicional. ....  | 58 |
| Figura 2.19 - Conversor <i>Push-Pull</i> alimentado em corrente. ....   | 58 |
| Figura 2.20 – Conexão do sistema à rede elétrica por meio de um transformador de 3 enrolamentos. ....   | 59 |
| Figura 2.21 - Nível de Tensão da Entrada e de Saída do Conversor CC-CC <i>Buck</i> . ....   | 59 |
| Figura 2.22 - Correntes nos interruptores do conversor <i>Push-Pull</i> .<br>a) Corrente do interruptor $s_{2a}$ . b) Corrente no interruptor $s_{2b}$ . .... | 60 |
| Figura 2.23 - <i>Snubber</i> Passivo Dissipativo. ....  | 62 |
| Figura 3.1 - Potência elétrica disponível na saída da ponte retificadora em função da variação da velocidade do vento. ....                                   | 64 |
| Figura 3.2 - Diagrama de blocos das malhas de controle do conversor <i>Buck</i> . ....  | 65 |
| Figura 3.3 - Diagrama de blocos da malha de controle da corrente. ....  | 65 |
| Figura 3.4 - Circuito Equivalente levando em consideração as restrições para o projeto do compensador de corrente. ....                                       | 66 |
| Figura 3.5 - Validação do modelo da planta de corrente. ....  | 67 |
| Figura 3.6 – Diagrama de blocos das malhas para controle da tensão e da corrente. ....  | 69 |
| Figura 3.7 – Diagrama de blocos simplificado da malha de tensão. ....   | 70 |
| Figura 3.8 - Modelo para planta de tensão de saída. ....  | 70 |
| Figura 3.9 – Controlador PI com filtro da malha de tensão. ....   | 73 |
| Figura 3.10 - Validação da planta de tensão. ....   | 74 |
| Figura 3.11 – Diagrama de blocos do CI 3854 [23]. ....  | 75 |
| Figura 3.12 – Rede de resistores conectada, aos pinos 2,5 e 9 para ajuste da malha de corrente. ....  | 75 |
| Figura 3.13 – Rede de componentes conectados aos pinos 3 e 4 do controlador da malha de corrente. ....  | 76 |
| Figura 3.14 – Multiplicador do CI3854. ....   | 77 |
| Figura 3.15 – Sinal em corrente aplicado ao pino 6 para gerar a referência senoidal da malha de corrente. ....  | 77 |
| Figura 3.16 – Rede de resistores dos pinos 6 e 9. ....  | 78 |
| Figura 3.17 – Conexão entre os pinos 10 e 15. ....  | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.18 – Portadora do <i>PWM</i> do CI3854 disponível no pino 14. ....  | 80  |
| Figura 3.19 – Sinal de comando do interruptor de potência fornecido pelo pino 16. ....   | 80  |
| Figura 3.20 - Sinal de controle das malhas de tensão e corrente em regime permanente. ....   | 81  |
| Figura 3.21- Resposta das variáveis controladas para um degrau na velocidade do vento.....   | 82  |
| Figura 4.1- Variação da indutância em função do ângulo $\theta$ . ....   | 84  |
| Figura 4.2 - Indutor utilizado no projeto. ....  | 85  |
| Figura 4.3 – Transformador de três enrolamentos utilizado no protótipo.....  | 87  |
| Figura 4.4 – Barramento capacitivo. ....   | 88  |
| Figura 4.5 – (a) Modelo médio para um período de rede, (b) Circuito equivalente para um período de rede. ....                            | 89  |
| Figura 4.6 – Fonte externa.....  | 93  |
| Figura 4.7 - Circuito de sincronismo.....  | 94  |
| Figura 4.8 - Formas de onda; Circuito de sincronismo. ....   | 94  |
| Figura 4.9 - Esquemático do projeto. ....  | 95  |
| Figura 5.1 - Diagrama do sistema completo.....   | 97  |
| Figura 5.2 – Protótipo conversor <i>Buck + Push-Pull</i> e o controle do sistema. ....   | 98  |
| Figura 5.3 –Placa da fonte externa e dos circuitos auxiliares.....   | 98  |
| Figura 5.4 – Barramento Capacitivo. ....   | 99  |
| Figura 5.5 – Sistema Motor-Gerador utilizado nos experimentos. ....  | 99  |
| Figura 5.6 – Bancada com o sistema completo conectado.....   | 100 |
| Figura 5.7 - Sinal de sincronismo e sinais de comando dos interruptores do inversor. ....  | 101 |
| Figura 5.8 - Esforços de tensão dos interruptores do inversor e tensão do grampeador <i>snubber</i> passivo.....                         | 101 |
| Figura 5.9 – Sinal de tensão sob o interruptores ativo e passivo do conversor CC-CC <i>Buck</i> .....                                    | 102 |
| Figura 5.10- Sinal de tensão do interruptor ativo do conversor CC-CC <i>Buck</i> e de um interruptor do inversor <i>Push-Pull</i> . .... | 102 |
| Figura 5.11 – Esquemático utilizado para os teste de bancada. ....   | 103 |
| Figura 5.12 – Tensão na entrada e corrente no indutor para uma rotação de 600 rpm.....   | 104 |
| Figura 5.13 - Tensão e corrente de saída para uma rotação de 600 rpm. ....   | 104 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.14 - Tensão na entrada e corrente no indutor para uma rotação de 700 rpm.....                    | 105 |
| Figura 5.15 - Tensão e corrente de saída para uma rotação de 700 rpm .....                                | 106 |
| Figura 5.16 – Sinais de controle observados em bancada. ....  | 106 |
| Figura 5.17 - Sinais de controle simulado., .....   | 107 |
| Figura 5.18 - Resultado para o processamento de 1 kW. ....  | 107 |
| Figura 5.19 – Resultado experimento dinâmico, aumento da velocidade angular de 500 rpm para 700 rpm. .... | 108 |
| Figura 5.20 - Resultado experimento dinâmico, redução da velocidade angular de 700 rpm para 500 rpm. .... | 109 |
| Figura 5.21 - Rendimento do Sistema. ....   | 110 |

**LISTA DE TABELAS E QUADROS**

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 2.1- Características Turbina Eólica Gerar 246 .....  | 47  |
| Tabela 3.1- Valores de um projeto exemplo para os componentes empregados na configuração do CI3854..... | 81  |
| Tabela 4.1- Especificação do projeto .....  | 83  |
| Tabela 4.2 - Parâmetros Indutor.....  | 85  |
| Tabela 4.3 - Limites das tensões de atendimento permitidas [31].<br>.....                               | 86  |
| Tabela 4.4 - Parâmetros Transformador.....  | 86  |
| Tabela 4.5 - Parâmetros do Capacitor.....   | 90  |
| Tabela 4.6- Características do Interruptor IPP075N15N3 G.....   | 91  |
| Tabela 4.7- Características do diodo V80170PW.....  | 92  |
| Tabela 5.1 - Perdas teóricas do sistema.....  | 110 |

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

| <b>SIGLAS</b> | <b>SIGNIFICADO</b>   |
|---------------|--|
| CC            | Corrente Contínua  |
| CA            | Corrente Alternada   |
| PROINFA       | Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica |
| PCH           | Pequenas Centrais Hidrelétricas                                  |
| PMSG          | Permanent Magnet Synchronous Generator                           |

**UNIDADE**

|          |          |
|----------|----------|
| A        | Ampere   |
| V        | Volts    |
| W        | Watt     |
| S        | Segundo  |
| $\Omega$ | Ohm      |
| H        | Henry    |
| F        | Faraday  |
| Hz       | Hertz    |
| rad      | radianos |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| $C$          |  | Capacitor – Barramento CC                                |
| $C_o$        |  | Capacitância barramento CC                               |
| $C_i$        |  | Compensador de corrente                                  |
| $C_v$        |  | Compensador de tensão                                    |
| $D$          |  | Razão Cíclica  |
| $D_{max}$    |  | Razão Cíclica máxima                                     |
| $f$          |  | Frequência   |
| $e_{nci}$    |  | Erro não compensado de corrente                          |
| $e_{ncv}$    |  | erro não compensado de tensão                            |
| $f_s$        |  | Frequência de chaveamento                                |
| $f_{rede}$   |  | Frequência da rede elétrica                              |
| $G_i(s)$     |  | Planta de corrente                                       |
| $G_v(s)$     |  | Planta de tensão   |
| $I_{Cp}$     |  | Corrente de pico no barramento CC                        |
| $I_{Crms}$   |  | Corrente eficaz no barramento CC                         |
| $I_{dmed}$   |  | Corrente média no diodo                                  |
| $I_{drms}$   |  | Corrente eficaz no diodo                                 |
| $I_p$        |  | Corrente de pico no Indutor                              |
| $I_{ref}$    |  | Corrente de referência                                   |
| $I_{s2}$     |  | Corrente dos interruptores do inversor Push-Pull         |
| $I_{senref}$ |  | Componente senoidal retificada da corrente de referência |
| $I_{smed}$   |  | Corrente média no interruptor do conversor <i>Buck</i>   |
| $I_{srms}$   |  | Corrente eficaz no interruptor do conversor <i>Buck</i>  |
| $K_i$        |  | Ganho do sensor de corrente                              |
| $K_v$        |  | Ganho do sensor de tensão                                |
| $K_{mi}$     |  | Ganho da malha interna de corrente                       |

|               |  |
|---------------|--|
| $L$           | Indutor  |
| $P_o$         | Potência ativa de saída                                    |
| $priA$        | Primário A do transformador                                |
| $priB$        | Primário B do transformador                                |
| $S_1$         | Interruptor do conversor <i>Buck</i>                       |
| $S_{2a}$      | Interruptor A do inversor Push-Pull                        |
| $S_{2b}$      | Interruptor B do inversor Push-Pull                        |
| $T_s$         | Período de chaveamento                                     |
| $V_c$         | Tensão eficaz sobre o barramento CC (Tensão de Entrada)    |
| $V_{dmax}$    | Tensão máxima sobre o diodo                                |
| $V_i$         | Tensão eficaz de entrada                                   |
| $V_L$         | Tensão sobre o indutor                                     |
| $V_{min}$     | Tensão mínima da rede elétrica                             |
| $V_o$         | Tensão eficaz de saída                                     |
| $V_{PpriA}$   | Tensão de pico no enrolamento primário A                   |
| $V_{Ptri}$    | Tensão de pico da portadora                                |
| $V_{ref}$     | Tensão de referência                                       |
| $V_s$         | Tensão sobre o interruptor do conversor <i>Buck</i>        |
| $V_{Smax}$    | Tensão máxima sobre o interruptor do conversor <i>Buck</i> |
| $\Delta_{iL}$ | Ondulação da corrente no indutor                           |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>1 MOTIVAÇÃO, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E PROPOSTA DO TRABALHO .....</b>                             | <b>28</b> |
| 1.1 INTRODUÇÃO .....   | 28        |
| 1.2 MOTIVAÇÃO .....  | 28        |
| 1.3 REVISÃO BIBILOGRÁFICA .....  | 29        |
| 1.3.1 História da Energia Eólica .....   | 29        |
| 1.3.2 Geração em grande e em pequenos geradores eólicos ...  | 34        |
| 1.3.2.1 Relevância de Geradores de Pequeno Porte .....   | 35        |
| 1.3.3 Sistemas de Baixa Potência Isolados ou Conectados a Rede Elétrica .....                      | 36        |
| 1.4 MPPT .....   | 39        |
| 1.4.1 Tensão constante.....  | 40        |
| 1.4.2 Perturba e observa.....  | 40        |
| 1.4.3 Power Signal Feedback Control (PSFC).....  | 40        |
| 1.5 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO .....  | 41        |
| 1.5.1 Objetivos da dissertação .....   | 42        |
| 1.5.2 Desafios e contribuições .....   | 42        |
| 1.6 CONCLUSÃO .....  | 42        |
| <b>2 ANÁLISE QUANTITATIVA DO SISTEMA PROPOSTO PARA CONEXÃO DE AEROGERADORES À REDE ELÉTRICA ..</b> | <b>43</b> |
| 2.1 INTRODUÇÃO .....   | 43        |
| 2.2 ETAPAS DE OPERAÇÃO .....   | 43        |
| 2.2.1 Etapas de Operação – Semiciclo Positivo.....   | 44        |
| 2.2.1.1 Etapa de Operação (Interruptor $s_1$ fechado) .....  | 44        |
| 2.2.1.2 Etapa de Operação (interruptor $s_1$ aberto).....  | 44        |
| 2.2.2 Etapas de Operação – Semiciclo Negativo .....  | 45        |
| 2.3 TURBINA EÓLICA GERAR 246.....  | 46        |
| 2.3.1 Modelo Elétrico da turbina .....   | 48        |
| 2.4 PONTE DE GRAETZ .....  | 48        |
| 2.5 CARACTERÍSTICA DA TURBINA EÓLICA E DA PONTE DE GRAETZ INTEGRADOS.....                          | 49        |
| 2.6 CONVERSOR <i>BUCK</i> .....  | 50        |
| 2.6.1 Característica de saída .....  | 51        |
| 2.6.2 Razão Cíclica .....  | 52        |
| 2.6.3 Indutor .....  | 53        |
| 2.6.4 Esforços nos Semicondutores .....  | 53        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.6.4.1  | Esforços no Interruptor Controlado – $s_1$ .....        | 54        |
| 2.6.4.2  | Esforços no Interruptor não Controlado – D .....        | 55        |
| 2.6.5    | Banco Capacitivo .....                                  | 56        |
| 2.7      | CONVERTOR PUSH-PULL COM ENTRADA EM CORRENTE .....       | 57        |
| 2.7.1    | Inversor Push-Pull com entrada em Corrente .....        | 58        |
| 2.7.2    | Relação Transformação .....                             | 58        |
| 2.7.3    | Sincronismo .....                                       | 60        |
| 2.7.4    | Esforços nos semicondutores .....                       | 60        |
| 2.7.5    | <i>Snubber</i> Passivo Dissipativo .....                | 61        |
| 2.8      | CONCLUSÃO .....   | 62        |
| <b>3</b> | <b>CONTROLE .....</b>                                   | <b>63</b> |
| 3.1      | INTRODUÇÃO .....  | 63        |
| 3.2      | CONTROLE DO SISTEMA .....                               | 63        |
| 3.3      | MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE .....                     | 65        |
| 3.3.1    | Modelagem da planta de corrente .....                   | 66        |
| 3.3.2    | Projeto do Compensador de Corrente .....                | 67        |
| 3.4      | MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO .....                       | 68        |
| 3.4.1    | Modelo da planta de tensão .....                        | 70        |
| 3.4.2    | Projeto do Compensador da Tensão de Entrada .....       | 71        |
| 3.5      | IMPLEMENTAÇÃO DO COMPENSADOR DE CORRENTE: CI 3854 ..... | 74        |
| 3.5.1    | Detalhes da conexão usada no CI 3854 .....              | 74        |
| 3.6      | CONCLUSÃO .....   | 82        |
| <b>4</b> | <b>PROJETO DO SISTEMA .....</b>                         | <b>83</b> |
| 4.1      | INTRODUÇÃO .....  | 83        |
| 4.2      | ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO .....                          | 83        |
| 4.3      | PROJETO DOS COMPONENTES UTILIZADOS .....                | 83        |
| 4.3.1    | Indutor .....   | 84        |
| 4.3.2    | Transformador .....                                     | 85        |
| 4.3.3    | Barramento Capacitivo (DC-Link) .....                   | 87        |
| 4.3.3.1  | Capacitores Eletrolíticos .....                         | 87        |
| 4.3.3.2  | Capacitores de Polipropileno .....                      | 88        |
| 4.3.3.3  | Cálculo da Capacitância Total do Barramento .....       | 89        |
| 4.3.4    | Interruptores .....                                     | 90        |
| 4.3.4.1  | Interruptor - Conversor CC-CC <i>Buck</i> .....         | 90        |
| 4.3.4.2  | Interruptores - Inversor Push Pull .....                | 91        |
| 4.3.5    | Diodos .....  | 91        |
| 4.4      | CIRCUITOS AUXILIARES .....                              | 92        |
| 4.4.1    | Fonte de Alimentação Externa .....                      | 93        |
| 4.4.2    | Sincronismo .....                                       | 93        |
| 4.5      | CONCLUSÃO .....   | 95        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>                            | <b>97</b>  |
|          | .....  |            |
| 5.1      | INTRODUÇÃO .....   | 97         |
| 5.2      | PROTÓTIPO IMPLEMENTADO .....                               | 97         |
| 5.3      | RESULTADOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA ABERTA...<br>..... | 100        |
| 5.4      | RESULTADOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA FECHADA<br>.....   | 103        |
| 5.4.1    | Teste com Potência Nominal .....                           | 107        |
| 5.5      | EXPERIMENTO DINÂMICO .....                                 | 108        |
| 5.6      | CONCLUSÃO .....  | 111        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO GERAL E TRABALHOS FUTUROS....</b>             | <b>112</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                    | <b>115</b> |
|          | <b>APÊNDICE A.....</b>                                     | <b>118</b> |
|          | <b>APÊNDICE B.....</b>                                     | <b>120</b> |
|          | <b>APÊNDICE C.....</b>                                     | <b>122</b> |
|          | <b>APÊNDICE D.....</b>                                     | <b>123</b> |
|          | <b>APÊNDICE E.....</b>                                     | <b>127</b> |
|          | <b>APÊNDICE F .....</b>                                    | <b>128</b> |
|          | <b>APÊNDICE G .....</b>                                    | <b>130</b> |



## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a energia eólica tem aumentado significativamente sua participação na matriz energética de vários países, sendo o Brasil um destes. Desde a criação do PROINFA e com sucessivos leilões de compra e venda deste tipo de energia, a capacidade instalada de geração foi aumentada em 75 vezes. Além de ser uma fonte renovável, simples e competitiva, a energia eólica se apresenta como complementar à energia hidrelétrica, uma vez que as melhores condições de vento ocorrem durante os períodos de baixa precipitação.

A geração de energia eólica ajuda na restauração do nível dos reservatórios, ou seja, permite a acumulação de água para geração futura. O potencial brasileiro de energia eólica é estimado em mais de 140 GW, avaliado em torres de 50 m de altura. Estima-se que o potencial seria mais do que duplicado com torres de 100 metros. Estudos técnicos e mapas eólicos desenvolvidos pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica indica que os ventos brasileiros têm grandes recursos para a geração de energia elétrica, tais como uma boa velocidade, boa uniformidade e baixa turbulência, o que permite que os fatores de capacidade de geração em alguns parques sejam de 50%.

O plano de expansão da geração brasileira para o período entre 2011 e 2020, prevê investimentos de US \$ 190 bilhões. Vale ressaltar que a maioria desses investimentos referem-se a usinas já autorizadas, entre elas, as usinas com contratos assinados nos leilões de energia nova. O montante a investir em novas usinas, ainda não contratadas ou autorizadas, é em torno de US \$ 100 bilhões, com cerca de 55% a partir de hidrelétricas e 45% para todas as outras fontes renováveis (PCHs, biomassa e eólica), o que representa uma parcela significativa do investimento em energia eólica.

Este trabalho propõe um sistema eletrônico para conectar pequenos aerogeradores à rede elétrica, que seja simples, robusto e barato. Esta estrutura eletrônica pode ser usada em sistemas de telecomunicações, casas, fazendas, sistema de armazenamento de energia e outras aplicações, onde a geração de energia renovável em pequena escala é interessante.

O capítulo 1 expõe a motivação do trabalho, expondo como justificativa uma revisão bibliográfica da situação atual do uso da energia eólica principalmente a partir de turbinas de pequeno porte. Também são apresentadas as estruturas topológicas mais usuais para a conexão com a rede elétrica. A topologia de potência do conversor

proposto por esse trabalho é empregada como uma solução para o problema proposto.

No capítulo 2, é realizado o estudo teórico do conversor *Buck* e do inversor *Push-Pull*, inicialmente separados e depois integrados para compor o sistema proposto.

No capítulo 3, é efetuado o estudo teórico e matemático do sistema que controla as topologias de potência, enquanto no capítulo 4, uma metodologia de projeto para o sistema completo estudado no capítulo 2, em que são apresentados detalhes do projeto dos circuitos de potência e dos circuitos auxiliares.

O capítulo 5 exhibe os resultados experimentais da estrutura, a fim de validar toda a análise teórica realizada nos capítulos anteriores.

Por fim, nos apêndices se encontram detalhes de projeto, como a planilha de cálculos e o diagrama esquemático completo do protótipo, montado e utilizado para obtenção dos resultados experimentais.



# **1 MOTIVAÇÃO, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E PROPOSTA DO TRABALHO**

## **1.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo expõe a motivação para a realização desta dissertação e uma breve revisão bibliográfica sobre o assunto. É destacada a evolução dos sistemas de geração eólica, desde sua origem até aos dias atuais, e os sistemas mais usuais voltados ao processamento de energia gerada por turbinas eólicas de pequeno porte conectadas à rede elétrica. No final do capítulo é apresentado o sistema abordado neste trabalho, cujo foco está no processamento da energia gerada para uma turbina eólica conectada à rede elétrica.

## **1.2 MOTIVAÇÃO**

A energia eólica vem tendo uma crescente importância nas matrizes energéticas mundial. A maior parte da potência gerada pelo movimento das massas de ar tem origem nos grandes parques eólicos. Tais parques eólicos ocupam uma grande área, portanto, precisam de uma característica de vento satisfatória para valorizar o investimento.

Outra linha atraente é a geração de energia eólica em pequenos geradores, que não ocupam grandes áreas e trabalham com velocidades de vento menores. São geradores com potencial para instalações em casas, prédios, fazendas, centros urbanos e praças públicas, que contribuem para a geração distribuída de energia elétrica. Todos esses atrativos impulsionaram, nos últimos anos, o estudo e desenvolvimento de pesquisa e equipamentos nesta área.

Para que sistemas eólicos de baixa potência sejam mais utilizados, é necessário que o sistema eletrônico que conecta a turbina eólica na rede elétrica ou em um banco de baterias seja robusto, eficiente e rentável economicamente.

No Brasil, a mais nova motivação para uso de energia renovável em pequena escala foi a Resolução Normativa nº 482, aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) no dia 17 de abril de 2012. A normativa estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, que incluem instalações de até 1 MW. A norma criou condições para que o consumidor possa instalar geradores que utilizem fontes incentivadas de energia (hidráulica, solar, biomassa, eólica e cogeração qualificada) em sua unidade consumidora e utilizar o crédito

recebido pela energia gerada para reduzir o custo do consumo da própria unidade consumidora ou de outra pertencente ao mesmo consumidor. Este novo cenário brasileiro motivou o desenvolvimento deste trabalho, que estuda um sistema para a conexão de um pequeno aerogerador à rede elétrica.

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão bibliográfica sobre energia eólica é apresentada nesta seção, que se inicia com uma contextualização, desde a origem de rudimentares sistemas eólicos até os grandes parques atuais. Na parte final do capítulo é apresentada uma breve explanação sobre sistemas eólicos de baixa e alta potência, conectados à rede ou a sistemas de armazenamentos.

#### 1.3.1 História da Energia Eólica

Não se sabe exatamente quando se iniciou o uso, mesmo que rudimentar, da energia eólica pelo homem. O primeiro registro que se tem é de restos de um barco a vela encontrado em um túmulo sumeriano, o qual é datado de 4000 a.C. [1]. Outros registros constam que no Japão, 2000 a.C., e na Babilônica, 1700 a.C., já haviam moinhos de ventos. Há também registros de que no século 10 a.C., aonde atualmente se encontram o Irã e o Afeganistão, típicos moinhos com 5 metros de área de captura e 9 metros de altura eram usados para moagem de grão [2]. A Figura 1.1 apresenta um desenho de um moinho utilizado em séculos passados para moagem de grãos, em que, movimento das massas de ar era transformado em movimento mecânico.

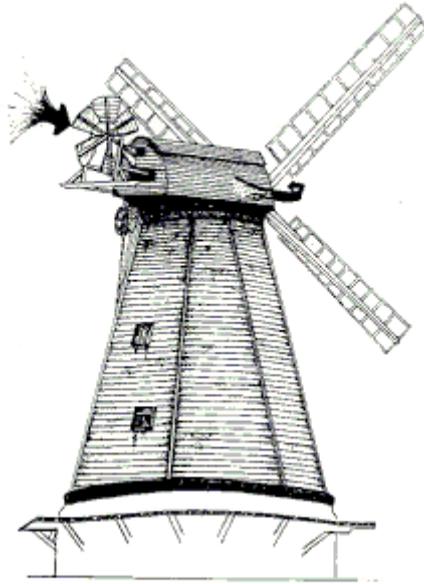


Figura 1.1 – Antigo moinho de vento[3].

No ocidente, as primeiras máquinas a vento só vieram a ser utilizadas no século XI, no retorno das cruzadas.

Durante a Idade Média, os moinhos de ventos com eixo horizontal já estavam consolidados na Europa, servindo como auxílio agrícola em todos os feudos. Neste período, houve um pequeno desenvolvimento tecnológico nos moinhos, como na melhor construção da pá e no rudimentar controle do sistema [4].

Um grande marco para a energia eólica foi a Revolução Industrial no final do século XIX, pois com o surgimento das máquinas a vapor, o número de moinhos de ventos na Europa diminuiu drasticamente. Na Holanda, por exemplo, no início do século XX, 2500 moinhos estavam em operação e, em 1960, menos de 1000. Na Figura 1.2 estão expostos alguns desses moinhos presentes em cidades holandesas.



Figura 1.2 - Moinhos de ventos situados na Holanda [5].

Muitas pesquisas com o intuito de aproveitar a energia eólica para geração de energia elétrica, tanto em grande quanto em pequena escala, começaram a serem feitas no século XIX. Por um lado a Rússia investiu nas linhas dos aerogeradores de grande porte, enquanto os Estados Unidos concentrou-se no uso de pequenos aerogeradores.

A primeira adaptação da energia cinética dos ventos para produção de energia elétrica se deu em 1888 com Charles F. Brush. O aerogerador, com potência nominal de 12 kW, foi construído na cidade de Ohio, Cleveland e o objetivo desta máquina foi de fornecer energia para 350 lâmpadas incandescentes alimentadas com corrente contínua [6].

O invento de Brush apresentou como diferenciais três importantes inovações no uso da energia eólica para geração de energia elétrica e em primeiro lugar, a altura utilizada pelo invento estava dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para beneficiamento de moagem de grãos. Em segundo, foi introduzido uma caixa de redução, mecanismo multiplicador da rotação das pás (50:1) que funcionou em dois estágios, o que possibilitou um máximo aproveitamento do dínamo. Por último, a invenção de Brush foi a primeira e mais audaciosa tentativa de se utilizar a aerodinâmica dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica.

Entretanto, desde então, houve um processo vagaroso até a geração eólica ser aceita como um método de produção economicamente viável de energia elétrica. [7]. A Figura 1.3 apresenta a turbina construída por Charles F. Brush, em 1888.

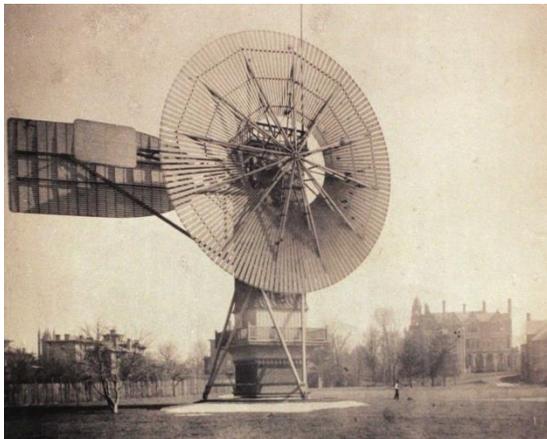


Figura 1.3 – Turbina de Charles F. Brush [7].

No século XX, durante a década de 70 e 80, ocorreram diversos fatores que impulsionaram o interesse em energias alternativas; na década de 70 houve a crise do petróleo e na de 80 o movimento contra a utilização de energia nuclear. Neste período, as turbinas eólicas estavam sendo utilizadas essencialmente no ramo de pesquisas, tendo um custo ainda elevado.

O aumento da demanda por energia, o aumento do preço dos combustíveis fósseis e o perigo associado ao uso da energia nuclear proporcionaram investimentos em pesquisas na área de energia eólica, visando torná-la mais interessante economicamente.

Novos geradores, pás, aerodinâmica, caixa de redução, sistemas e controle foram e ainda estão sendo desenvolvidos, o que tornaram essa fonte tecnologicamente e comercialmente viável. Na Figura 1.4 é possível visualizar o desenvolvimento, tanto do tamanho quanto da potência, das turbinas eólicas disponíveis atualmente no mercado [8].

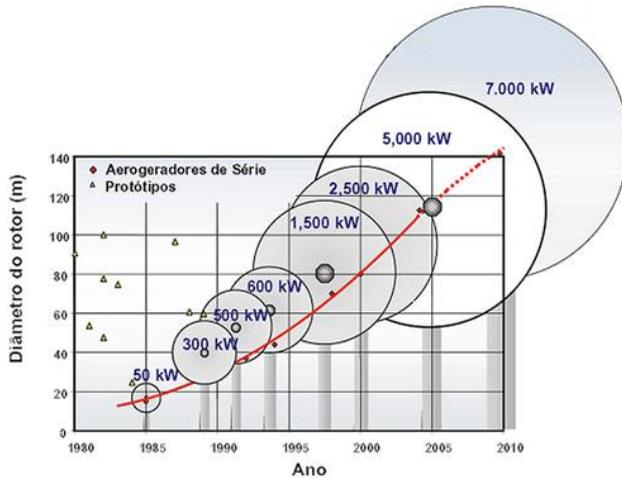


Figura 1.4 – Visualização do aumento da potência processada em função do diâmetro do rotor em três décadas [8].

Dados mostram que nesta última década (2001 – 2010) a energia eólica está em expansão globalmente de modo expressivo, com uma taxa de crescimento média anual superior a 25%.

Atualmente, a capacidade instalada no planeta é de mais de 160 GW. De acordo com a GWEC, consideráveis investimentos levarão o mundo a dobrar essa potência em três anos e meio (crescimento anual superior a 20%) [9].

A situação da energia eólica do Brasil é também positiva e segue a previsão feita para todo o mundo. A Figura 1.5 apresenta a previsão brasileira para a capacidade instalada de geradores eólicos para os próximos anos [10].

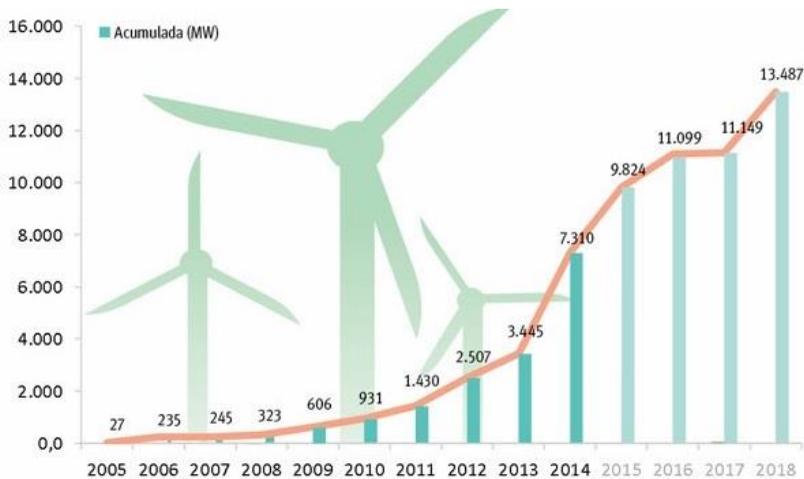


Figura 1.5 – Evolução da capacidade instalada da fonte eólica [10].

### 1.3.2 Geração em grande e em pequenos geradores eólicos

A geração de energia elétrica devido ao movimento do vento é classificada em várias categorias. A mais conhecida se refere ao tipo do eixo da turbina, existindo turbinas com eixos verticais e com eixos horizontais. Outra importante divisão é com relação à potência gerada: geradores eólicos de alta potência e de baixa potência. Turbinas eólicas de grande potência podem ser comumente observadas em parques eólicos. São aerogeradores com grande capacidade de geração (acima de 100 kW), que são compostos por grandes pás e um rotor de tamanho elevado. Turbinas de elevada potência possuem uma torre entre 80 a 150 metros, pois ventos em alturas elevadas apresentam maiores velocidades e menores turbulências. O fato de estes aerogeradores precisarem tem um porte elevado para conseguir gerar uma alta potência faz com que a área necessária para a instalação seja grande e o investimento seja elevado [11].

A fim de que a energia eólica pudesse ser aplicada à microgeração de energia distribuída, em pequena escala, como em residências, fazendas, torres de telecomunicação, plataformas de petróleo, áreas urbanas, áreas isoladas, dentre outras, (a Figura 1.6 mostra alguns exemplos) o estudo de turbinas eólicas de baixa potência foi intensificado.

No caso do emprego de geração elétrica em residências, é comum sua interligação com a rede elétrica, quando esta se encontra disponível.

A Resolução Normativa nº 482 da ANEEL legalizou essa conexão com a rede elétrica e possibilitou que pequenos consumidores também se tornem pequenos produtores, o que é um incentivo para o crescimento do número de aerogeradores conectados à rede elétrica. A potência nominal desses geradores de baixo porte podem variar desde 50 W até 100 kW, sendo que as turbinas eólicas para uso residencial são, normalmente, disponibilizadas para potências entre 300 W e 10 kW. Um exemplo é a indústria Brasileira Enersud, que produz turbinas e geradores eólico para potências compreendidas entre 300 W e 6 kW.

As turbinas eólicas de baixa potência se diferenciam daquelas de alta potência sob os seguintes aspectos:

- (a) geralmente são instaladas em residências e áreas urbanas;
- (b) operam com alta rotação;
- (c) operam com grande variação de velocidade, em virtude de sua sensibilidade e de sua leveza;
- (d) não utilizam caixas de engrenagem para a adequação da velocidade do gerador.

As turbinas eólicas atuais geralmente utilizam geradores trifásicos a imã permanente e retificadores passivos trifásicos, disponibilizando tensão contínua variável de zero até 100 V, sendo que a máxima tensão ocorre na máxima rotação. A energia gerada pode ser empregada em sistemas isolados, os quais incluem baterias, ou pode ser transferida à rede elétrica por meio de inversores.



Figura 1.6 – Aplicações de aerogeradores de pequeno porte.

### 1.3.2.1 Relevância de Geradores de Pequeno Porte

No ano de 2008, aerogeradores de pequeno porte geravam 17,3 MW de potência nos Estados Unidos, de acordo com a *American Wind Energy Association* (AWEA). O mesmo relatório apontou um crescimento de trinta vezes da capacidade instalada, entre 2008 e 2013. Consta que 30,7 MW foram instalados no mercado mundial em 2008.

Estima-se que na China atualmente existam mais de 300.000 aerogeradores de pequeno porte em operação em residências.

No Brasil, não foram encontrados dados sobre a potência instalada nem previsões de crescimento para a microgeração eólica de energia elétrica, entretanto já existem empresas nacionais que investem e impulsionam esta área, tais como a Enersud, situada no Rio de Janeiro e a Energia Pura e a Eletrovento, ambas situadas em São Paulo. Além disso, devido à similaridade geográfica, extensão territorial, população, etc, as experiências bem sucedidas na China e nos Estados Unidos possam ser extremamente apropriadas para o Brasil. Assim sendo, o desenvolvimento de tecnologias competitivas para o processamento da energia elétrica produzida por aerogeradores de pequeno porte poderá trazer grandes benefícios para a sociedade, gerando empregos, proporcionando oportunidade de negócios, reduzindo a dependência energética, etc [11].

### **1.3.3 Sistemas de Baixa Potência Isolados ou Conectados à Rede Elétrica**

Os sistemas de baixa potência podem ser divididos em duas categorias, os isolados e os conectados à rede elétrica. A Figura 1.7 apresenta uma residência com um sistema isolado usual, que é composto por:

- Aerogerador – turbina eólica que gera energia elétrica a partir do vento;
- Banco de bateria – sistema que armazenar a energia gerada;
- Regulador de carga – sistema que faz o ajuste necessário para carregar o banco de baterias.

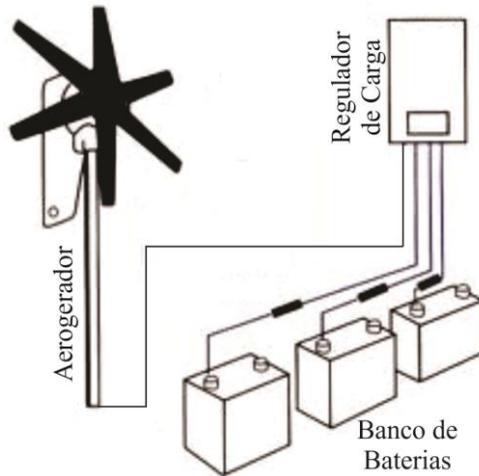


Figura 1.7 - Sistema Isolado [12].

O estágio de potência normalmente adotado em sistemas isolados geralmente consiste em um retificador passivo e um conversor CC-CC em cascata, no qual a entrada do retificador é conectada a saída do gerador elétrico da turbina eólica, enquanto a saída do conversor CC-CC é conectada diretamente ao banco de baterias. Conforme é ilustrado na Figura 1.8.

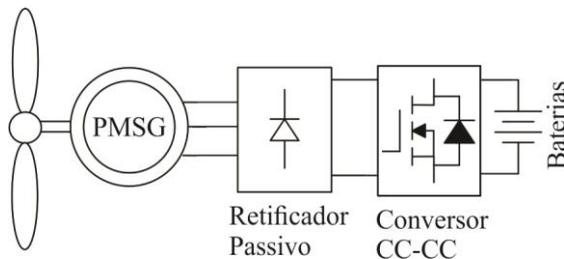


Figura 1.8 – Topologia comum utilizada em sistemas isolados.

Entretanto a necessidade de um banco de baterias faz com que todo o conjunto tenha volume e preço elevados, reduzindo sua utilização em localidades onde há rede elétrica.

Sistemas conectados à rede elétrica, por sua vez, não têm problemas em relação ao volume, uma vez que a utilização de baterias não se faz necessária. Estes sistemas são compostos por:

- Aerogerador – a turbina eólica que gera energia elétrica a partir do vento;
- Sistema de controle – sistema geralmente composto por um retificador e um conversor CC-CC para a extração da máxima potência disponível e de um inversor para a conexão apropriada à rede elétrica.

A Figura 1.9 apresenta uma residência com uma turbina eólica que está conectada à rede elétrica. Neste sistema, o aerogerador gera energia elétrica e alimenta as cargas da residência. Quando a energia gerada é insuficiente, a rede elétrica complementa a geração. No momento em que a energia gerada pela turbina eólica é superior à demanda da residência, o excedente é injetado na rede elétrica.

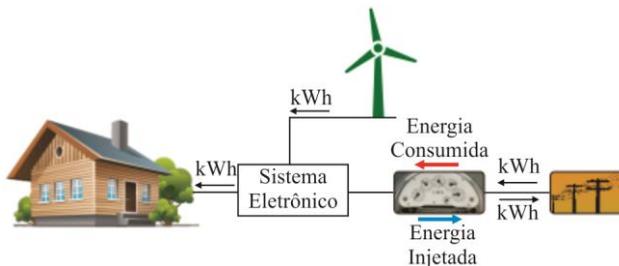


Figura 1.9 – Sistema conectado a rede elétrica [13].

Sistemas conectados usualmente são encontrados em três tipos diferentes de conexões. [14]. A primeira conexão é composta por um retificador passivo, um inversor e um transformador para adequar as tensões. Esta topologia tem como vantagem a simplicidade em sua implantação, porém possui uma baixa eficiência devido a utilização do transformador. Um exemplo desta configuração é vista na Figura 1.10.

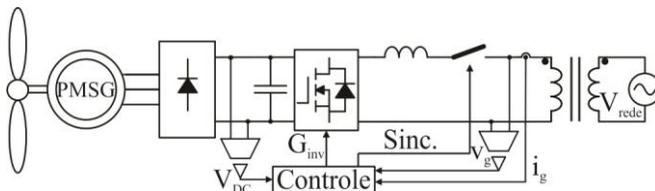


Figura 1.10 – Simples topologia para conexão de aerogeradores na rede elétrica.

A segunda conexão é formada por um retificador passivo, um conversor CC-CC e um inversor. Esta topologia é a mais empregada, possui uma eficiência superior à estrutura previamente apresentada, porém, maior grau de complexidade [14]. Neste tipo de sistemas, o controle do rastreamento da máxima potência é realizado no conversor CC-CC. A função de sincronização e proteção contra surtos de tensão e frequência que podem ocorrer na rede elétrica é do inversor. Na Figura 1.11 há um exemplo desta estrutura, percebe-se que pela utilização de um conversor *Boost* que eleva a tensão de entrada, não se fez necessária a presença de um transformador.

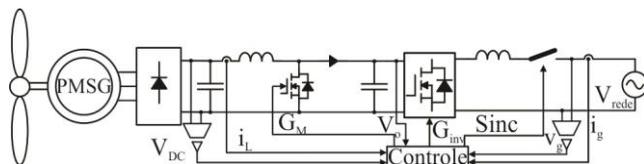


Figura 1.11 – Topologia composta por um retificador passivo, conversor CC-CC e um inversor.

A terceira topologia é composta por dois conversores bidirecionais (sistema *Back-to-Back*). Esta conexão permite acionar o gerador como motor na partida, podendo-se reduzir a distorção apresentada na corrente do gerador. Para sistemas de baixa potência essa vantagem não é tanto significativa, por isso, que este tipo de topologia é mais utilizada para conexões de turbinas eólicas de grandes potências à rede elétrica [14]. A topologia formada pelos conversores no sistema *Back-to-Back* está apresentada na Figura 1.12.

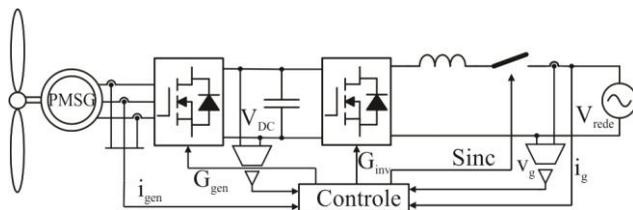


Figura 1.12 – Sistema formado por um conversor *Back-to-Back*.

#### 1.4 MPPT – TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Em sistemas de geração de energia elétrica um dos objetivos mais buscados é a extração da potência máxima disponível na fonte (eólica,

solar, hídrica, etc.). Para atingir estes objetivos, técnicas de rastreamento de máxima potência (MPPT) são constantemente pesquisadas e desenvolvidas. Algumas propostas são mais simples e usadas em micro e mini geração, enquanto outras são mais complexas e utilizadas para geração de alta potência.

#### 1.4.1 Tensão constante

Tensão constante é o método mais simples para a extração da máxima potência. Esse método tem como característica fixar a tensão de entrada do sistema em um valor que a potência extraída seja sempre a mais próxima da disponível. Por esse fator, alguns autores não consideram esse método como uma técnica de rastreamento de máxima potência.

Para que esse método seja implementado é necessário conhecimento prévio entre a tensão de saída e a potência fornecida do aerogerador.

O principal limitador desta técnica é a presença de uma diferença entre a potência disponível e a potência gerada pelo aerogerador [15].

#### 1.4.2 Perturba e observa

O princípio de operação deste método consiste em realizar ações na razão cíclica do interruptor controlado após a leitura da potência extraída.

A técnica se baseia em aplicar uma pequena variação na tensão de saída do aerogerador e realizar a leitura da variável a ser controlada. Caso a potência aumente, o incremento na tensão de saída é realizado novamente, caso a potência diminua, a perturbação ocorre no sentido de decrementar a tensão de saída [16].

A grande desvantagem deste método é que a potência extraída nunca será a máxima, mas próxima à máxima.

#### 1.4.3 Power Signal Feedback Control (PSFC)

Este método utiliza uma tabela que relaciona valores ótimos de potência em relação a velocidades de rotação observadas em experimentos. Esta tabela é conhecida como *lookup*. A tabela, usualmente não é fornecida pelo fabricante, cabendo ao projetista obtê-la [17].

A técnica se baseia em obter o valor ótimo da variável (velocidade de rotação) e comparar este sinal com o valor da potência instantânea do gerador. O sinal de erro é compensado pelo controlador a fim de que a variável se aproxime de seu valor ótimo.

Este método é considerado simples e rápido [17], o único problema é que a tabela necessária para a realização geralmente precisa ser determinada de forma experimental, o que acarreta elevados custos.

## 1.5 PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO

O foco do trabalho consiste no estudo e desenvolvimento do sistema proposto na Figura 1.13, com objetivo de utilizá-lo na conexão de pequenos aerogeradores à rede elétrica.

O sistema da Figura 1.13 é constituído de um retificador passivo, um conversor CC-CC e um inversor. A estrutura tem potencial para oferecer um melhor custo benefício na conexão à rede elétrica de uma turbina de 1 kVA.

O retificador utilizado no sistema é um retificador passivo a diodo, mais comumente conhecido na literatura como Ponte de *Graetz*. O conversor CC-CC escolhido foi o conversor *Buck*, devido à simplicidade permitir condições de implementar facilmente o MPPT proposto. O inversor empregado é o inversor *Push-Pull* alimentado em corrente. Sua escolha foi baseada na simplicidade da topologia e na possibilidade de trabalhar com a frequência de comutação igual a frequência da rede elétrica, o que proporciona menores perdas.

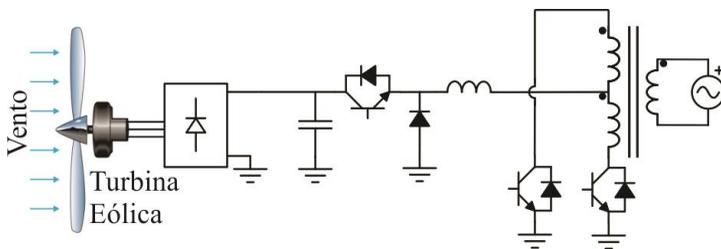


Figura 1.13 – Topologia do sistema proposto.

O sistema proposto foi desenvolvido para conectar qualquer turbina eólica (eixo vertical ou horizontal) de baixa potência à rede elétrica. A faixa de potência estipulada foi de 500 a 1000 W, sendo que esses limites podem ser alterados com alguns ajustes de projeto. As características de turbina utilizadas para a realização deste trabalho são

da turbina GERAR 246, da empresa nacional Enersud. Um estudo mais elaborado deste aerogerador é encontrado em [18].

### 1.5.1 Objetivos da dissertação

- Implementação de um sistema para o processamento da energia elétrica gerada por uma turbina eólica de baixa potência conectada à rede elétrica.
  - Análise do sistema proposto composto por um conversor CC-CC *Buck* em série com um inversor *Push-Pull* com entrada em corrente;
  - Desenvolvimento de um sistema de controle analógico capaz de realizar o controle da tensão de entrada e da corrente injetada na rede elétrica;
  - Estudo de técnicas e de tecnologias para a implementação do barramento capacitivo.;
  - Projeto e implementação de um protótipo para validação da análise.

### 1.5.2 Desafios e contribuições

A principal contribuição do trabalho é o estudo do sistema de potência que integra um conversor CC-CC *Buck* em alta frequência e um inversor *Push-Pull* com entrada em corrente que opera em baixa frequência.

Os desafios para o desenvolvimento desta proposta é a implementação de um sistema que seja simples, robusto e de baixo custo, com longa vida útil e com baixa manutenção.

## 1.6 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou uma breve história da evolução da energia eólica, desde os primeiros registros até atualmente. Também foi explicada a diferença entre sistemas de alta e baixa potência, e sistemas isolados e conectados à rede elétrica. Após, foram exibidos os sistemas mais usuais que são utilizados para a conexão de turbinas eólicas de baixa potência à rede elétrica. No final do capítulo foi apresentado o tema do trabalho, com ênfase em algumas características do mesmo.

## 2 ANÁLISE QUANTITATIVA DO SISTEMA PROPOSTO PARA CONEXÃO DE AEROGERADORES À REDE ELÉTRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo a análise quantitativa do sistema proposto é desenvolvida. O sistema é composto por um retificador passivo trifásico com filtro capacitivo, um conversor CC-CC *Buck* e um inversor *Push-Pull* com entrada em corrente. O sistema injeta a potência gerada por uma turbina eólica de baixa potência na rede elétrica. A Figura 2.1 ilustra a topologia proposta a ser analisada.

Inicialmente, o capítulo explica o funcionamento do sistema e, posteriormente, desenvolve-se a análise analítica do sistema, na qual as etapas de operação, as expressões utilizadas para escolha adequada dos componentes, as equações dos esforços em cada semicondutor e cálculo de perdas serão abordados.

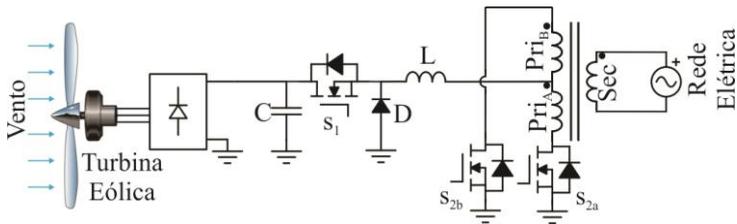


Figura 2.1 - Sistema proposto.

### 2.2 ETAPAS DE OPERAÇÃO

A análise das etapas de operação são apresentadas para os semiciclo positivo e negativo da rede elétrica. Durante ambos os ciclos, o conversor CC-CC *Buck* opera em modo de condução contínua com uma frequência de comutação na ordem de quilohertz, já o inversor *Push-Pull* opera também em modo de condução contínua, porém, com frequência igual a da rede elétrica (60 Hz).

Desta maneira, são apresentadas as etapas de operação para cada semiciclo da rede elétrica.

## 2.2.1 Etapas de Operação – Semiciclo Positivo

### 2.2.1.1 Etapa de Operação (Interruptor $s_1$ conduzindo)

Neste intervalo de operação, o interruptor do conversor CC-CC *Buck*,  $s_1$ , conduz e a corrente flui do barramento CC para o indutor, caracterizando a fase de armazenamento de energia. A rede elétrica está no semiciclo positivo, assim o interruptor  $s_{2a}$  está em condução, e  $s_{2b}$  está aberto. Desta forma a corrente circula pelo enrolamento primário A ( $Pri_A$ ) e é refletida como positiva no enrolamento secundário (Sec) permanecendo em fase com a tensão da rede elétrica.

Durante este intervalo, a tensão nos terminais do indutor,  $v_L$ , é definida por (2.1), conforme ilustra a Figura 2.2 a).

$$v_L(\theta) = V_i - v_o(\theta). \quad (2.1)$$

Sendo que a tensão  $v_o(t)$  possui uma variação senoidal advinda do secundário do transformador, então reescrevendo a equação (2.1), tem-se

$$v_L(\theta) = V_i - V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2.2)$$

onde:

- $v_L(\theta)$  é a tensão sobre o indutor.
- $V_i$  é a tensão média do barramento capacitivo.
- $V_{Ppri_A}$  é a tensão de pico no enrolamento primário.

A tensão  $V_D$  aplicada aodiodo do conversor *Buck* é dada por

$$V_D = V_i, \quad (2.3)$$

Esta etapa termina quando o interruptor é comandado a bloquear, o que interrompe sua corrente e o diodo de roda livre do conversor *Buck* entra em condução.

### 2.2.1.2 Etapa de Operação (interruptor $s_1$ bloqueado)

Com o final da etapa anterior, inicia-se uma nova etapa, na qual a fonte de entrada (Aerogerador + Retificador + Banco Capacitivo) está

desconectada da rede elétrica. Neste intervalo, a energia produzida pelo aerogerador é acumulada no banco capacitivo e a energia armazenada no indutor é entregue para a rede. O interruptor  $s_{2a}$  continua com fluxo de corrente, pois o semiciclo ainda é o positivo, mantendo a corrente no secundário em fase com a tensão da rede. A Figura 2.2 b) apresenta esta etapa de operação e a tensão no indutor,  $L$ , neste intervalo, é expressa por (2.4) e o esforço de tensão sob o interruptor, por (2.5).

$$v_L(\theta) = V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta). \quad (2.4)$$

$$V_S = V_i, \quad (2.5)$$

Esta etapa de operação finaliza quando o interruptor  $s_1$  é comandado a conduzir novamente.

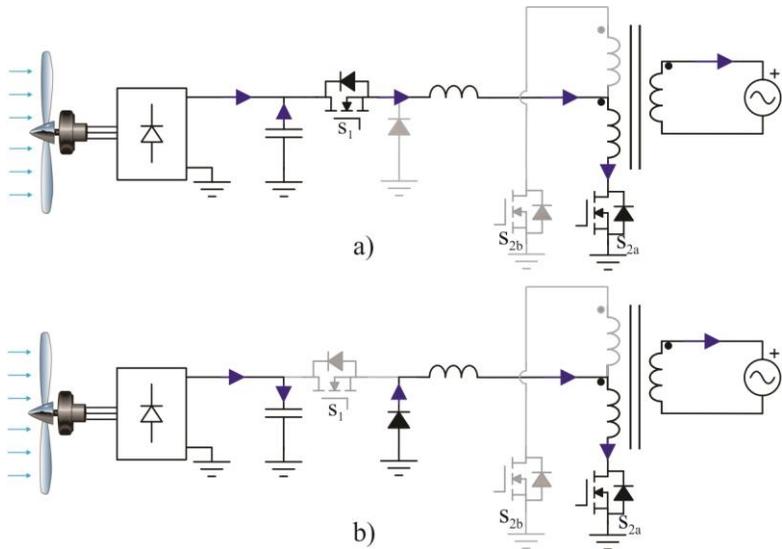


Figura 2.2 – Etapas de operação no semiciclo positivo da rede elétrica.

a) Interruptor conduzindo. b) Interruptor em aberto.

## 2.2.2 Etapas de Operação – Semiciclo Negativo

Durante o semiciclo negativo da rede elétrica, novamente as duas etapas do conversor *Buck* são obtidas; uma na qual a fonte de entrada está enviando energia para a rede elétrica (interruptor  $s_1$  está conduzindo) e outra na qual a fonte está desconectada da rede (interruptor  $s_1$  bloqueado) e o diodo está em condução e o indutor está

entregando a energia para a rede elétrica. A única diferença entre o semiciclo negativo e o positivo, é que no semiciclo negativo o interruptor,  $s_{2b}$ , do inversor *Push-Pull* conduz a corrente elétrica. Nesta etapa a corrente do indutor flui pelo enrolamento primário B ( $P_{rimB}$ ), portanto é refletida como negativa no enrolamento secundário. Assim, a corrente está em fase com a tensão negativa da rede elétrica. A Figura 2.3 apresenta estas etapas de operação.

As equações de (2.1) a (2.5) também são válidas para a operação no semiciclo negativo da rede.

O retificador passivo e o aerogerador não serão analisados profundamente neste trabalho, pois estudos mais aprofundados são apresentados em [1], [19] e [20]. Já a análise dos conversores é realizada em detalhes e está dividida em duas partes: a primeira analisa o conversor CC-CC *Buck* e a segunda analisa o inversor *Push-Pull* com entrada em corrente.

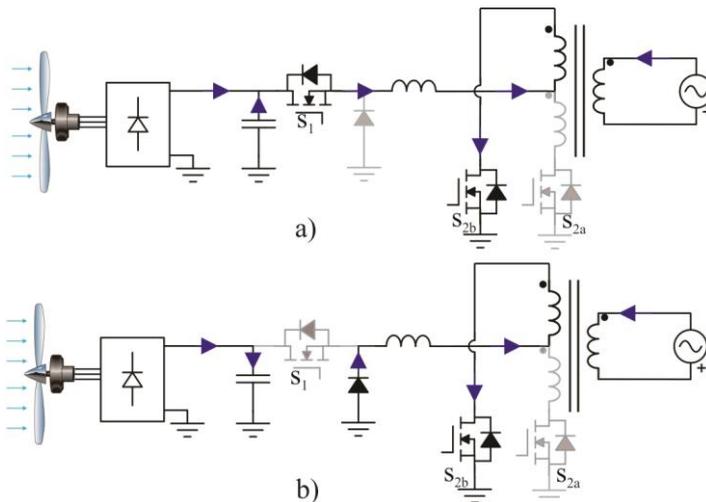


Figura 2.3 - Etapas de operação no semiciclo negativo da rede elétrica.

a) Interruptor conduzindo. b) Interruptor em aberto.

### 2.3 TURBINA EÓLICA GERAR 246

Aerogeradores de pequeno porte são comuns, contudo, poucas marcas nacionais são vendidas comercialmente. Com o intuito de fortalecer a tecnologia nacional, o trabalho foi empregou a turbina eólica Gerar 246, fabricada e comercializada pela empresa brasileira Enersud.

Está turbina (mostrada na Figura 2.4) possui as características descritas na Tabela 2.1 e é vendida para sistemas isolados, ou seja, ela é comercialmente conectada a um banco de baterias. Entretanto o trabalho desenvolverá um sistema para conectar a turbina na rede elétrica.

A turbina Gerar 246 é de eixo horizontal e tem características como: (i) robustez mecânica, (ii) baixo nível de ruído e (iii) sistema de segurança extremamente confiável [18].

Tabela 2.1- Características Turbina Eólica Gerar 246 [18].

| Parâmetros                                   | Valor                                   |
|--|---|
| Diâmetro da Hélice                           | 2,46 m                                  |
| Potência a 12m/s                             | 1000 W                                  |
| Rotação a 12m/s                              | 630 rpm                                 |
| Número de Pás                                | 3                                       |
| Torque de partida                            | 0,3 Nm                                  |
| Velocidade de partida                        | 2,2 m/s                                 |
| Controle de Velocidade                       | Stall                                   |
| Proteção contra altas velocidades            | <i>Active Stall</i> (Controle de Passo) |
| Sistema Elétrico                             | Trifásico                               |
| Tensão de Saída (com baterias)               | 12/24/48/300 V                          |
| Alternador                                   | Fluxo Axial                             |
| Escovas da cabeça giratória                  | Redundante (duas fases)                 |
| Peso Total (Alternador + hélice + cab. Rot.) | 32 kg                                   |
| Material Anti-corrosão                       | Alumínio/ Inox/ Mat. Galvanizado        |
| Balanceamento                                | Dinâmico                                |



Figura 2.4 – Turbina Eólica Gerar 246.

### 2.3.1 Modelo Elétrico da turbina

Uma turbina eólica possui um modelo elétrico composto por um gerador trifásico com frequência e tensões variáveis, em série com indutâncias. Um modelo elétrico de um aerogerador é apresentado na Figura 2.5, sendo que as variáveis  $V_g$  e  $f_g$  são definidas em função das características do vento e da turbina, conforme apresentado em [1].

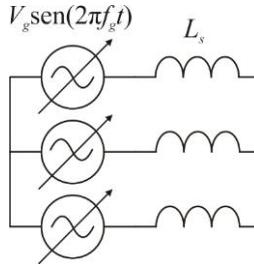


Figura 2.5- Modelo Elétrico da Turbina Eólica.

## 2.4 PONTE DE GRAETZ

A ponte de Graetz é um dos conversores estáticos retificadores mais utilizados na indústria, pois é uma forma robusta de fornecer uma tensão de saída contínua a partir de um sistema trifásico sem neutro [21]. A ponte de Graetz com filtro capacitivo é ilustrada na Figura 2.6.

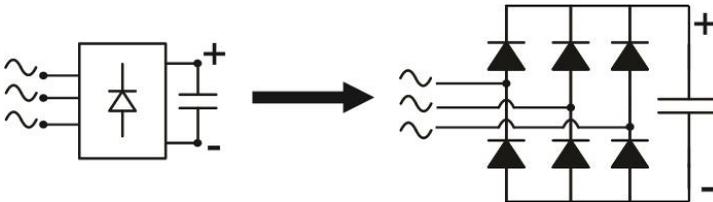


Figura 2.6 - Ponte de Graetz

A ponte de Graetz tem a função de retificar as tensões de saída do aerogerador, para fornecer uma tensão contínua ao conversor *Buck*.

A ponte de Graetz é simples e robusta, contudo, a sua desvantagem é a distorção harmônica imposta na corrente de entrada pode ter. Entretanto, como o gerador possui indutâncias em série (estator) de valores elevados, a distorção na corrente de saída de pequenos geradores não é significativa e não prejudicam a máquina. Em

[19] são apresentados os principais modos de operação da Ponte de Graetz com indutância série e filtro capacitivo.

A Figura 2.7 apresenta as formas de onda das correntes de entrada da ponte retificadora quando o sistema proposto está conectado a ela.

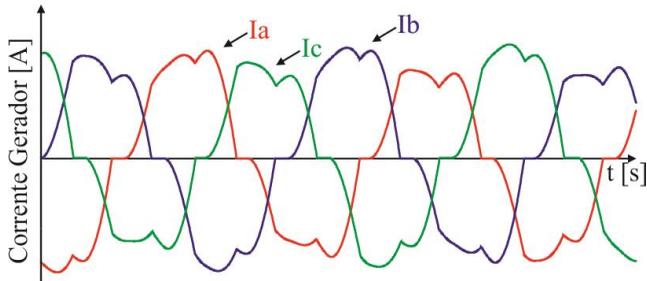


Figura 2.7 - Correntes de saída da ponte retificadora.

## 2.5 CARACTERÍSTICA DA TURBINA EÓLICA E DA PONTE DE GRAETZ INTEGRADOS

Como neste trabalho a turbina eólica irá trabalhar com uma ponte de Graetz em sua saída foi obtida a curva que relaciona a potência disponibilizada na saída da ponte, em função da tensão aplicada a seus terminais para várias velocidades de vento. Esta característica está apresentada na Figura 2.8.

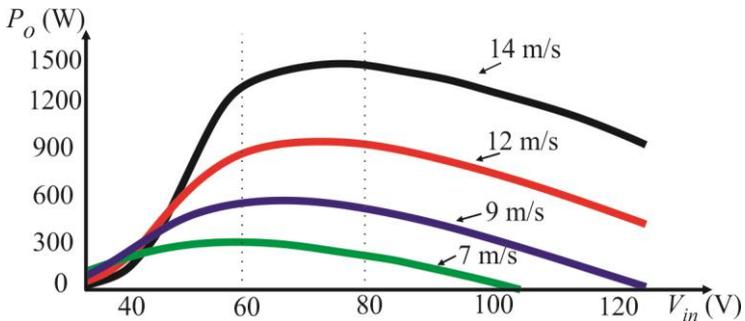


Figura 2.8 - Característica da turbina eólica integrada com a ponte de Graetz.

## 2.6 CONVERSOR *BUCK*

O conversor *Buck*, também conhecido como conversor abaixador de tensão, como o nome sugere, gera um valor médio de tensão na saída menor que o valor médio de tensão na entrada.

Esta topologia, representada na Figura 2.9, possui característica de fonte de tensão na entrada e fonte de corrente na saída, o que se mostrou uma grande vantagem para este projeto. Outra característica positiva advém do fato de a tensão sobre interruptores ser igual à tensão de entrada, a qual, neste trabalho, não é elevada. Além disso, o interruptor do conversor *Buck* quando bloqueado, desconecta o gerador e a rede elétrica.

Uma das grandes desvantagens de se utilizar o conversor *Buck* surge pela necessidade de usar um *driver* isolado para o acionamento do interruptor.

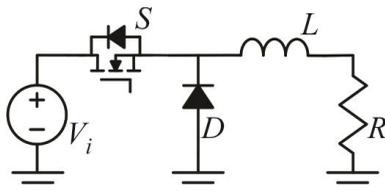


Figura 2.9 - Estrutura de potência conversor *Buck* convencional.

A análise da topologia desenvolvida nesta seção é em relação a estrutura apresentada na Figura 2.10, na qual  $V_i$  é uma fonte CC e representa o conjunto gerador e pelo retificador com filtro capacitivo e  $i_o(t)$  é uma fonte de corrente senoidal retificada que equivale a entrada do conversor *Push-Pull*.

Um dos objetivos desta seção consiste em apresentar as características do conversor, que o fizeram ser a topologia escolhida para integrar o sistema. Também é realizada uma análise qualitativa para o dimensionamento de todos os componentes necessários à implementação do conversor.

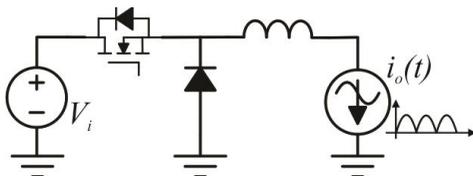


Figura 2.10 - Conversor CC-CC *Buck* - Circuito Equivalente.

### 2.6.1 Característica de saída

A determinação da característica de saída do circuito equivalente proposto do conversor *Buck* é baseada nas curvas de onda da tensão e da corrente nos terminais do indutor em um período de comutação. Tais parâmetros estão ilustrados na Figura 2.11 e Figura 2.12, respectivamente.

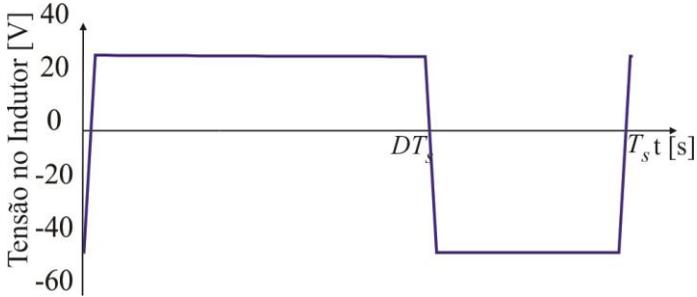


Figura 2.11 - Tensão no Indutor.

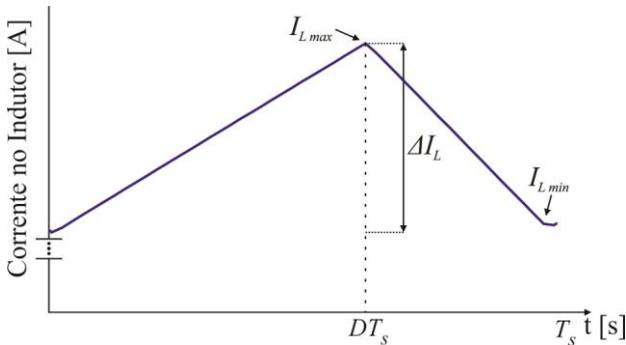


Figura 2.12 - Corrente no Indutor.

Durante a primeira etapa de operação do conversor *Buck*, a fonte de tensão de entrada está conectada à saída pelo indutor transferindo energia para o indutor e para a carga. Neste intervalo a tensão sob o indutor é positiva e a corrente possui derivada positiva (como visto na Figura 2.12). A expressão da tensão sobre o indutor é dada por

$$V_L = \frac{\Delta i_L}{DT_S} L. \quad (2.6)$$

Reescrevendo (2.6), tem-se

$$V_i - V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta) = \frac{\Delta i_L}{d(\theta) \cdot T_S} L. \quad (2.7)$$

Durante a segunda etapa de operação a tensão sobre o indutor é expressa por (2.8).

$$V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta) = \frac{\Delta i_L}{[1 - d(\theta)] \cdot T_S} L. \quad (2.8)$$

Isolando o termo  $\frac{\Delta i_L \cdot L}{T_S}$  nas equações (2.7) e (2.8) e igualando-as, obtêm-se:

$$[V_i - V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta)] \cdot d(\theta) = V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta) \cdot [1 - d(\theta)] \quad (2.9)$$

Dessa maneira, pode-se determinar o ganho estático do conversor através da equação,

$$d(\theta) = \frac{V_{Ppri_A} \cdot \text{sen}(\theta)}{V_i}. \quad (2.10)$$

### 2.6.2 Razão Cíclica

A característica estática do conversor *Buck* depende do ângulo  $\theta$ , assim, a razão cíclica do conversor altera-se em um ciclo da rede elétrica em função de  $\theta$  (2.10). A Figura 2.13 ilustra o gráfico que representa relação entre a razão cíclica e ângulo da senóide retificada. A análise da figura demonstra que o valor da razão cíclica máxima acontece em  $\frac{\pi}{2}$ .

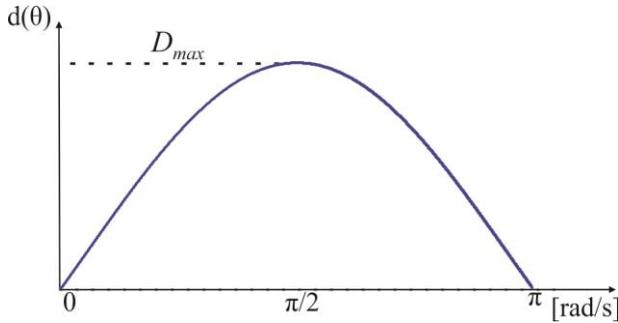


Figura 2.13 – Curva que representa a evolução da razão cíclica em função de  $\theta$ .

### 2.6.3 Indutor

O dimensionamento do indutor pode ser realizado com auxílio das Figura 2.11 e da Figura 2.12. Neste caso, é necessária apenas a primeira etapa do período de comutação para proceder a análise, no qual o tempo máximo é  $dT_S$ . Isolando a indutância na expressão (2.7) encontra-se,

$$L(\theta) = \frac{[V_i - V_{Ppri_A}] \cdot \text{sen}(\theta) \cdot D \cdot T_S}{\Delta I_L} \quad (2.11)$$

Para que o indutor possa operar dentro dos limites estabelecidos pelo projetista, ele deve ser calculado para atender aos requisitos nas condições críticas, as quais estará submetido. Neste trabalho, foi usado o valor máximo da razão cíclica e a tensão de pico de um dos enrolamentos do primário. A ondulação é geralmente pré-definida, sendo usual a utilização de um valor entre 1% a 10% da corrente nominal.

$$L = \frac{(V_i - V_{Ppri_A}) \cdot D_{\max}}{\Delta i_L \cdot f_S} \quad (2.12)$$

### 2.6.4 Esforços nos Semicondutores

O conversor *Buck* é composto por dois semicondutores, um ativo e um passivo. Os esforços sobre tais dispositivos são calculados para que se tenha o maior número de informações para escolher os componentes do projeto, como também calcular as perdas do sistema.

### 2.6.4.1 Esforços no Interruptor Controlado – $s_1$

De acordo com o modelo proposto na Figura 2.10, a corrente que circula pelo indutor é apresentada na Figura 2.14. A corrente no indutor possui valor de pico  $I_p$  e uma variação senoidal retificada em função do ângulo  $\theta$ . O valor de  $I_p$  é definido por

$$P_o = \frac{V_{Ppri_\lambda} I_p}{2}, \quad (2.13)$$

Isolando-se  $I_p$ , obtém-se:

$$I_p = \frac{2P_o}{V_{Ppri_\lambda}}. \quad (2.14)$$

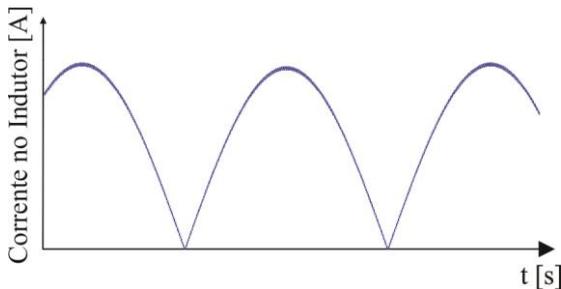


Figura 2.14 – Forma de onda da corrente no indutor.

Segundo a equação (2.14) e a Figura 2.14 pode-se escrever a equação da corrente no indutor para meio período da rede ( $0 < \theta < \pi$ ).

$$i_L(\theta) = I_p \cdot \text{sen}(\theta), \quad (2.15)$$

A corrente que flui pelo interruptor controlado,  $s_1$ , é a mesma que circula pelo indutor na primeira etapa, porém comutada em alta frequência. Portanto a corrente no interruptor ativo é definido por

$$i_S(\theta) = i_L(\theta) \cdot d(\theta). \quad (2.16)$$

A Figura 2.15 apresenta a forma de onda em  $s_1$ .

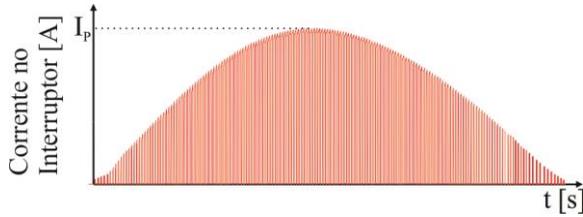


Figura 2.15 - Corrente no interruptor controlado em meio período da rede elétrica.

Por meio de (2.16), pode se encontrar a expressão que calcula os valores eficaz e médio da corrente no interruptor, dado respectivamente, por:

$$I_{Srms} = \frac{I_P \sqrt{V_{Ppri_A}}}{\sqrt{V_i \cdot \pi}} \sqrt{\int_0^{\pi} \text{sen}(\theta)^3 d\theta}, \quad (2.17)$$

$$I_{Smed} = \frac{I_P \cdot V_{Ppri_A}}{V_i \cdot \pi} \int_0^{\pi} \text{sen}(\theta)^2 d\theta. \quad (2.18)$$

A tensão a qual o interruptor é submetido é nula quando ele estiver conduzindo e igual à tensão de entrada,  $V_i$ , quando estiver bloqueado.

#### 2.6.4.2 Esforços no Interruptor não Controlado – D

Uma análise similar a do interruptor controlado, é feita para o não controlado. Durante a etapa em que  $s_1$  conduz, o diodo D permanece bloqueado. Quando  $s_1$  é comandado a bloquear, o diodo entra em condução. Dessa maneira, pode-se resumir que o interruptor não controlado conduz a mesma corrente que circula pelo indutor no tempo em que o interruptor estiver bloqueado. Portanto, a corrente de D é

$$i_D(\theta) = i_L(\theta) \cdot [1 - d(\theta)]. \quad (2.19)$$

A tensão sob o interruptor não controlado é similar do interruptor controlado. Quando o diodo estiver conduzindo a tensão é nula, quando estiver bloqueado a tensão a qual fica submetida é igual a tensão de entrada.

## 2.6.5 Banco Capacitivo

O sistema proposto tem característica de entrada em corrente no retificador, pois na saída do gerador eólico há a presença de uma elevada indutância. A saída do conversor *Buck* igualmente tem característica de fonte de corrente. A Figura 2.16 ilustra tais características.

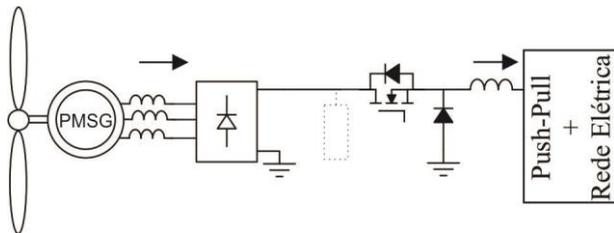


Figura 2.16 – Sistema proposto sem a presença de capacitores no barramento CC.

A potência média na entrada do sistema é a mesma que a da saída, quando as perdas são desconsideradas. Entretanto, não se pode dizer que a potência instantânea da entrada é igual a da saída, pois em muitos casos a corrente de entrada apresenta uma ondulação que não aparece na corrente de saída, causando uma diferença na potência instantânea transmitida. Para absorver esta ondulação e armazenar a diferença de potência se utiliza, geralmente, um barramento capacitivo, como mostrado na Figura 2.17.

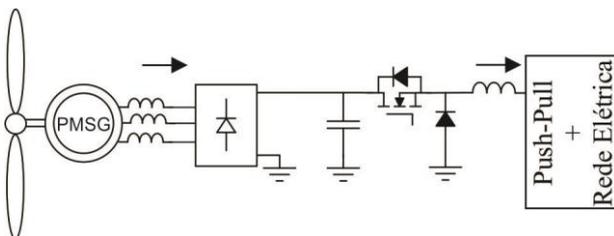


Figura 2.17 – Sistema proposto com a inclusão de capacitores no barramento CC.

A escolha da capacitância do capacitor de barramento depende da ondulação de tensão limite desejada. Caso a ondulação seja maior que a estipulada alguns problemas podem ocorrer, como a tensão de entrada

do conversor *Buck* ser, por alguns instantes, inferior a tensão de saída do mesmo, o que leva a razão cíclica à saturação.

Outro importante parâmetro para a definição do banco capacitivo é o valor eficaz da corrente que o atravessará. Para valores elevados, a vida útil do componente fica comprometida e as perdas por condução se tornam maiores.

A corrente que circula pelo barramento capacitivo é composta pela componente alternada da corrente de entrada e da saída do banco de capacitores. Como a ondulação de corrente no interruptor *s1* (saída do barramento capacitivo) é muito mais significativa que a ondulação de corrente da entrada, apenas essa parcela será considerada para o cálculo da valor eficaz da corrente no barramento,

$$I_{Crms} = \sqrt{I_{Srms}^2 - I_{Smed}^2} . \quad (2.20)$$

## 2.7 CONVERSOR *PUSH-PULL* COM ENTRADA EM CORRENTE

A topologia básica do conversor *Push-Pull* está apresentada na Figura 2.18. Esta estrutura pode ser considerada como dois conversores *Forward* operando de maneira complementar [20].

O conversor *Push-Pull* é um conversor isolado que possui dois interruptores comandados alternadamente. Tal topologia, devido à presença do transformador, além de isolar o sistema galvanicamente, permite a utilização de múltiplas saídas no secundário, evitando, dessa maneira, a necessidade do emprego de vários conversores.

Dentre os conversores isolados, o conversor *Push-Pull* é um dos mais recomendados para sistemas que processam potências entre 500 W a 2000 W com baixas tensões, pois os interruptores ficam submetidos ao dobro do valor da tensão de entrada [20].

O *Push-Pull* projetado neste trabalho apresenta algumas peculiaridades em relação ao apresentado em [20]. Primeiramente, o conversor opera como inversor. Outra diferença se dá pelo fato de esse *Push-Pull* ser alimentado por uma fonte de corrente e não por uma fonte de tensão.

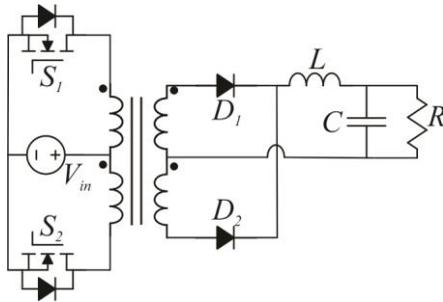


Figura 2.18 - Conversor CC-CC *Push-Pull* tradicional.

### 2.7.1 Inversor *Push-Pull* com Entrada em Corrente

Diferentemente do conversor *Push-Pull* com entrada em tensão, o interruptores do conversor *Push-Pull* alimentado em corrente devem trabalhar sobrepostos [21]. Neste trabalho o inversor *Push-Pull* opera em 60 Hz, o comando para o acionamento dos interruptores ativos é sincronizado com a rede elétrica. As principais funções do conversor são inverter a corrente e adequar as tensões de saída do conversor *Buck*. Além disto, o inversor isola galvanicamente o sistema da rede elétrica. O transformador do inversor pode ser projetado para 60 Hz com chapas de ferro silício de grão orientado, o que torna-o muito robusto, entretanto com um volume elevado. A Figura 2.19 apresenta o conversor *Push-Pull* utilizado no projeto.

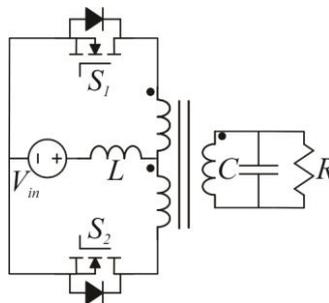


Figura 2.19 - Conversor *Push-Pull* alimentado em corrente.

### 2.7.2 Relação Transformação

A relação transformação projetada para o sistema é definida pela tensão máxima possível no primário A e no primário B do

transformador, pois o enrolamento secundário está ligado diretamente à rede elétrica. Na Figura 2.20 é representada tal conexão.

O limite imposto pelo sistema é a tensão de entrada do conversor CC-CC. Como o conversor *Buck* é um abaixador (a tensão de saída é menor que a tensão de entrada) a tensão de pico nos enrolamentos dos primários do transformador deve ser inferior à tensão mínima de entrada definida.

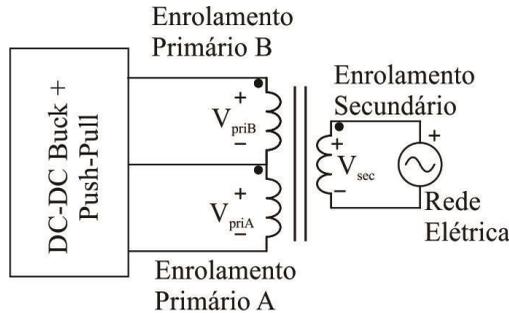


Figura 2.20 – Conexão do sistema à rede elétrica por meio de um transformador de 3 enrolamentos.

Para o cálculo da relação transformação é utilizado a tensão de pico da rede elétrica quando ela está operando em seu limite inferior, para garantir a operação satisfatória do sistema para todos os casos.

A Figura 2.21 apresenta as duas formas de ondas necessárias para a definição da relação transformação, e a expressão (2.21) apresenta os termos matemáticos que descrevem tal situação.

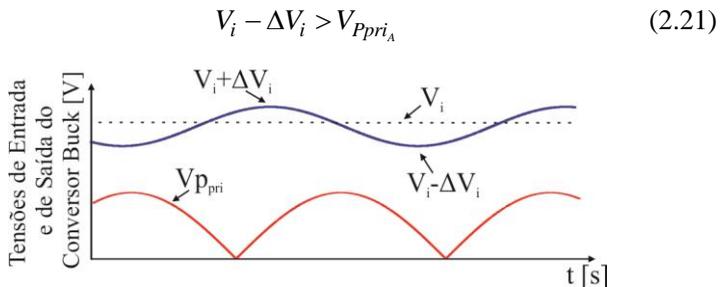


Figura 2.21 - Nível de Tensão da Entrada e de Saída do Conversor CC-CC *Buck*.

Na seção 4.3.2. é apresentado um exemplo detalhado sobre como o transformador é projetado.

### 2.7.3 Sincronismo

Para que o sistema funcione como desejado é necessário que a forma de onda da corrente no indutor do conversor *Push-Pull* esteja em fase com a forma de onda da tensão da rede elétrica.

O sistema estará em fase com a rede elétrica caso os interruptores do inversor forem comandados com sincronismo com a rede. A cada momento que a forma de onda da tensão da rede cruza o zero, o sistema precisa comandar o interruptor que previamente estava bloqueado.

O circuito proposto no trabalho é detalhado na seção 4.4.2.

### 2.7.4 Esforços nos semicondutores

O inversor *Push-Pull* possui dois interruptores comandados com frequência igual a da rede elétrica, 60 Hz. A grande vantagem da comutação dos interruptores em baixa frequência é a baixa perda por comutação, estabelecendo que a única relevante perda seja por condução.

De acordo com a Figura 2.14, a corrente que circula pelo indutor fluirá pelo interruptor  $s_{2a}$  no semiciclo positivo da rede e pelo interruptor  $s_{2b}$  no semiciclo negativo.

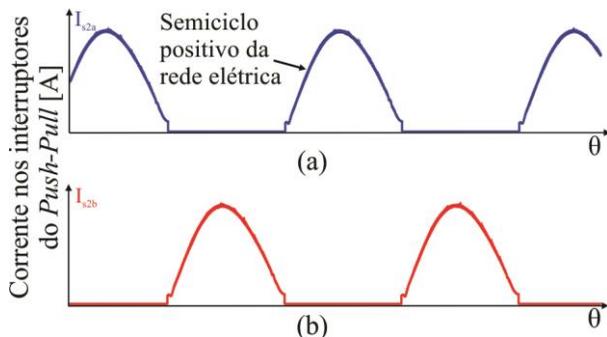


Figura 2.22 - Correntes nos interruptores do conversor *Push-Pull*. a) Corrente do interruptor  $s_{2a}$ . b) Corrente no interruptor  $s_{2b}$ .

Os valores eficazes da corrente nos interruptores do inversor *Push-Pull* são obtidos pela integração da forma de onda da Figura 2.22 durante meio período da rede ( $0 - \pi$ ). A expressão obtida é dada por,

$$I_{s2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_P^2 \cdot \text{sen}^2(\theta) d\theta}. \quad (2.22)$$

Resolvendo a expressão, obtém-se:

$$I_{s2} = \frac{I_P}{2}. \quad (2.23)$$

A tensão máxima a qual os semicondutores ficam submetidos é igual ao dobro da tensão de pico no primário do transformador.

### 2.7.5 *Snubber* Passivo Dissipativo

Os interruptores do conversor *Push-Pull* precisam de um circuito grampeador, *snubber*, devido às indutâncias de dispersão existentes no componente magnético e ao fato de a entrada do inversor ser em corrente.

*Snubbers* ou circuitos grampeadores são circuitos eletrônicos colocados em conversores estáticos de potência, com função de controlar os efeitos geradores pelas indutâncias parasitas do circuito.

Os *snubbers* podem ser passivos ou ativos: os passivos, como o próprio nome sugere, são circuitos grampeadores que são compostos apenas por componentes passivos, como resistores, diodos, capacitores e indutores. Os ativos além dos componentes passivos, são também compostos por transistores, por exemplo. Os circuitos grampeadores ativos são geralmente mais complexos de serem implementados.

Outra divisão existente entre os grampeadores é em relação ao destino final da energia armazenada no próprio. Grampeadores dissipativos dissipam toda a energia armazenada em um resistor, enquanto os regenerativos transferem a energia armazenada para a fonte de entrada ou para a carga.

Neste projeto foi implementado um grampeador passivo dissipativo para a proteção dos interruptores do inversor *Push-Pull*, os quais são submetidos a elevados níveis de tensão decorrente das indutâncias de dispersão do transformador. Outro motivo para a utilização de um circuito grampeador é o fato de os pulsos para comando dos interruptores do inversor serem sobrepostos, devido à fonte de corrente de entrada. Caso os comandos não sejam sobrepostos, haverá sobretensões nos semicondutores e o grampeadores protegerá. A escolha por este grampeador se deu pela simples implementação e pelo

custo reduzido. Deve-se ressaltar que o grameador só atuará na comutação dos interruptores, ou seja, na frequência da rede elétrica. Portanto, mesmo sendo dissipativo, as perdas no grameador serão reduzidas.

A Figura 2.23 apresenta o circuito elétrico do *snubber* utilizado no projeto. Os cálculos para o dimensionamento dos componentes podem ser encontrados em [22].

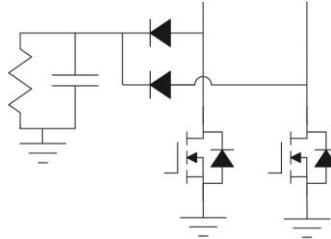


Figura 2.23 - *Snubber* Passivo Dissipativo.

## 2.8 CONCLUSÃO

O capítulo 2 apresentou as etapas de operação do sistema completo e uma análise quantitativa dos conversores envolvidos no processamento de energia do aerogerador. Os modos de operação para comutação do sistema foram apresentados e as equações de projeto desenvolvidas. Assim, a análise do circuito de potência foi concluída.

Verificou-se que a topologia empregada é simples, apresentando apenas quatro etapas de operação. Constatou-se que a arquitetura do sistema é composta por conversores conhecidos na literatura o que facilita o estudo do trabalho proposto.

### 3 CONTROLE

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Em um sistema composto por conversores estáticos é de extrema importância a utilização de um ou vários controladores, para que o projetista tenha um domínio maior sobre o comportamento das variáveis de interesse.

Um exemplo no qual a utilização do controle necessária é quando o sistema apresenta uma entrada com comportamento variável ao longo do tempo, como um aerogerador. Sistemas eólicos apresentam variações em sua entrada devido a alterações nos ventos, o que exige um sistema de controle para garantir a operação adequada e extrair a máxima potência e transferi-la para a rede elétrica.

Neste capítulo será apresentada a proposta e a implementação das malhas de controle utilizadas neste trabalho. O controle do sistema proposto deve ser capaz de controlar a corrente que flui pelo indutor de saída e, conseqüentemente, a corrente injetada na rede elétrica, e também garantir que a tensão do barramento capacitivo permaneça constante para diferentes variações na entrada, ou seja, extrair uma potência próxima da máxima que o gerador pode fornecer.

#### 3.2 CONTROLE DO SISTEMA

Em um sistema eólico, de alta ou de baixa tensão, geralmente é necessário um sistema de controle para garantir que a máxima potência elétrica seja extraída da energia cinética contida nas massas de ar em movimento.

No sistema proposto, o sistema de controle para adquirir a máxima potência é realizado através da imposição da tensão do barramento CC (entrada de conversor *Buck*). Tal abordagem só é possível de ser realizada devido às características da turbina escolhida. A Figura 3.1 apresenta a potência elétrica disponível pela variação da tensão no barramento capacitivo para algumas velocidades do vento [1].

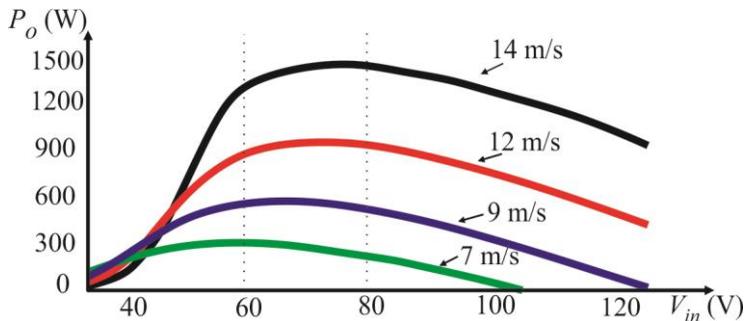


Figura 3.1 - Potência elétrica disponível na saída da ponte retificadora em função da variação da velocidade do vento.

As curvas mostradas na Figura 3.1 mostram uma região entre 60 e 80 V na qual a potência elétrica disponível é máxima para a maioria das velocidades de vento. Assim, foi decidido que o controle fixará a tensão de barramento em 70 V e, desta maneira, a potência elétrica gerada pelo gerador da turbina eólica sempre estará na, ou próxima da máxima potência. Desta forma, o sistema de controle torna-se simples e robusto e extraindo sempre uma potência próxima a máxima disponível.

Com o intuito de conectar o aerogerador na rede elétrica é necessário injetar uma corrente em fase com a tensão da rede elétrica. Para atender esta necessidade, foi implementado uma malha de controle que regula a corrente do indutor de saída do conversor *Buck*. Esta malha tem como objetivo garantir que a corrente do indutor siga a referência de uma onda senoidal retificada, em fase com a tensão da rede elétrica. A Figura 3.2 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle utilizado no trabalho. O diagrama apresenta duas malhas, uma malha interna, que controla a corrente, e uma malha externa, que controla a tensão. A malha de controle de corrente opera em uma frequência de cruzamento elevada, o que a torna uma malha rápida. O oposto ocorre com a malha de tensão, a qual a frequência de cruzamento é baixa, tornando-a uma malha mais lenta. É importante que a velocidade das malhas sejam diferentes para que sejam desacopladas dinamicamente

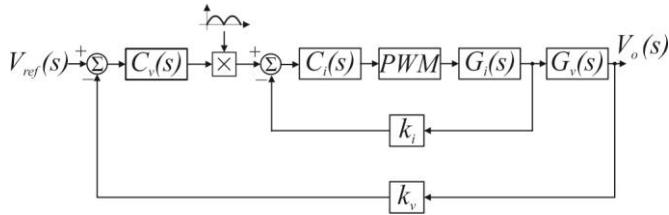


Figura 3.2 - Diagrama de blocos das malhas de controle do conversor *Buck*.

### 3.3 MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE

A malha para controle da corrente é a responsável por controlar a corrente de saída do conversor *Buck* e, conseqüentemente, a corrente de saída do inversor *Push-Pull*. Portanto, ela regula a forma da corrente injetada na rede elétrica.

Ao se medir a corrente do indutor do conversor *Buck*, a qual se deseja controlar, por um sensor de corrente com ganho  $k_i$ , e comparar com a referência de corrente, um erro de corrente não compensado é gerado, conforme (3.1).

$$e_{ncv} = i_{ref} - k_i \cdot i_L \quad (3.1)$$

Este erro não compensado é aplicado no compensador de corrente  $C_i(s)$ , gerando um sinal de erro compensado que ao ser aplicado no modulador *PWM*, determinará o sinal de comando dos interruptores. O diagrama de blocos que representa a malha de corrente é apresentado na Figura 3.3.

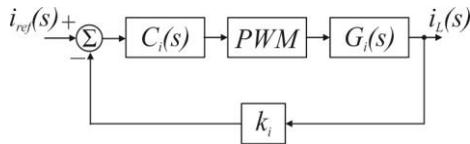


Figura 3.3 - Diagrama de blocos da malha de controle da corrente.

O ganho do modulador *PWM* é determinado de acordo com a tensão dos sinais da portadora ( $V_{p_{tri}}$ ). Uma análise matemática para obtenção do valor do ganho do modulador é encontrada em [24] e é expressa por:

$$PWM = \frac{1}{V_{p_{tri}}} \quad (3.2)$$

onde,  $V_{pri}$  representa o valor de pico do sinal dente de serra da portadora.

A fim de encontrar o compensador que controle de maneira desejada a corrente do indutor, resta encontrar o modelo da planta do conversor,  $G_i(s)$ , que relaciona a corrente conduzida pelo indutor com a razão cíclica.

### 3.3.1 Modelagem da planta de corrente

A malha de controle de corrente recebe a referência de corrente do produto entre o sinal de erro compensado da malha de tensão e a componente senoidal retificada sincronizada com a rede elétrica, conforme mostrada na Figura 3.2. O sinal de erro compensado desta malha é aplicado no modulador *PWM* e, assim, determina a razão cíclica do interruptor. Portanto, é necessário encontrar uma função de transferência que relacione a corrente do indutor com a razão cíclica e, para isto, algumas considerações devem ser feitas:

- A frequência de comutação ( $f_s$ ) é muito maior que a frequência da rede elétrica ( $f_{rede}$ ).
- O comportamento do sistema é analisado no semiciclo da rede elétrica é positivo.
- A tensão de entrada ( $V_i$ ), a tensão no primário A ( $V_{priA}$ ) e no primário B do transformador ( $V_{priB}$ ) são consideradas constantes em um período de comutação.

As considerações feitas são traduzidas no circuito equivalente da Figura 3.4. A equação (3.3) expressa a tensão de entrada do circuito.

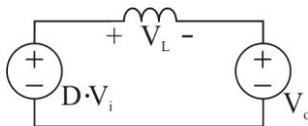


Figura 3.4 - Circuito Equivalente levando em consideração as restrições para o projeto do compensador de corrente.

$$V_i D = V_L + V_{priA} \quad (3.3)$$

O comportamento do circuito no domínio do tempo é definido por

$$V_i d(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + V_{priA}. \quad (3.4)$$

Aplicando uma pequena perturbação:

$$V_i [D + \Delta d(t)] = \frac{d[I_L + \Delta i_L(t)]}{dt} L + V_{priA} \quad (3.5)$$

Linearizando e aplicando Laplace, encontra-se a função de transferência do modelo da planta de corrente (3.6):

$$\frac{\Delta i_L(s)}{\Delta d(s)} = \frac{V_i}{sL} \quad (3.6)$$

Uma simulação para validar a planta encontrada foi realizada e as formas de onda da corrente no indutor, obtidas com o modelo da planta e o circuito comutado estão apresentadas na Figura 3.5.

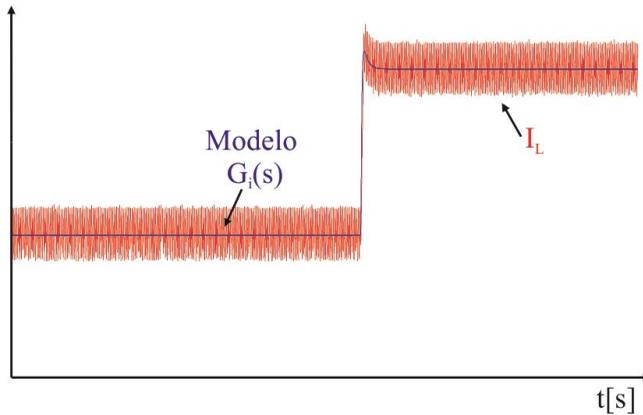


Figura 3.5 - Validação do modelo da planta de corrente.

### 3.3.2 Projeto do Compensador de Corrente

O compensador de corrente será projetado no domínio da frequência.

De acordo com a Figura 3.3, a função de transferência de laço aberto não compensado é obtida por:

$$FTLA_{i\_nc} = PWM \cdot G_i(s) \cdot k_i. \quad (3.7)$$

A função de transferência de laço aberto não compensada apresenta um polo na origem, contudo, as resistências intrínsecas do circuito, que foram desprezadas na modelagem, deslocam este polo para fora da origem.

Assim, um controlador que poderia ser empregado na malha de corrente é o compensador Proporcional-Integral (PI), o que garante seguimento com erro nulo ao degrau e seguimento com erro constante a uma referência em rampa. Sendo a referência de corrente uma senoidal retificada, porém em baixa frequência, o sistema também apresentaria erro constante ao seguinte da referência de corrente. A expressão deste compensador é dada por:

$$C_i(s) = k_{ci} \frac{(s + \omega_z)}{s}. \quad (3.8)$$

O controlador da função de transferência (3.8) foi utilizado na análise teórica para fins didáticos, a qual está apresentada no Apêndice A e detalhada em [24].

Outra opção para o controlador da malha de corrente é o compensador avanço-atraso, o qual garante estabilidade e oferece um erro ao seguimento da referência de corrente. Esta estrutura pode ser usada, pois erros em regime permanente da malha de corrente são compensado pela malha externa de tensão para manter o equilíbrio de potência. O emprego de um controlador avanço-atraso permite a utilização do circuito integrado CI3854, o que torna a implementação do controle muito simples e, por isto, é a escolhida deste estudo.

### 3.4 MALHA DE CONTROLE DE TENSÃO

A malha de controle da tensão de entrada é a responsável por manter a tensão no barramento CC constante e, assim, extrair a máxima potência ou um valor próximo da máxima potência elétrica disponível no aerogerador. A referência de tensão,  $V_{ref}$ , é um valor contínuo, definido em projeto.

A leitura da tensão de entrada é realizada por meio de um sensor de tensão de ganho  $k_v$ , composto de um divisor resistivo posto em

paralelo com o banco capacitivo. O cálculo do erro da malha de tensão é expresso por:

$$e_{nci} = V_{ref} - k_v \cdot V_i \quad (3.9)$$

O controlador  $C_v$  compensa o sinal de erro e o resultado é multiplicado por uma componente senoidal retificada para gerar a referência de controle da corrente. A Figura 3.6 ilustra o diagrama de blocos das malhas de tensão e de corrente.

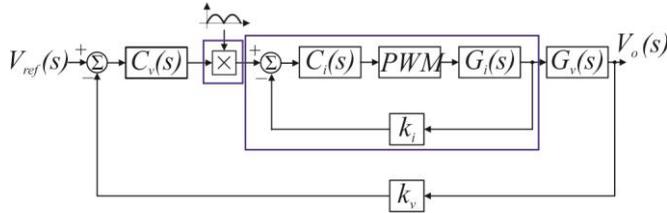


Figura 3.6 – Diagrama de blocos das malhas para controle da tensão e da corrente.

A obtenção do modelo da planta e o projeto do compensador de tensão exigem duas simplificações do diagrama de blocos apresentado na Figura 3.7. Uma das simplificações no diagrama é baseada na obtenção da função transferência de laço fechado da malha interna de corrente. Uma análise desta mesma simplificação pode ser encontrada em [24], sendo que a equação (3.10) apresenta o ganho que a malha interna representa em baixa frequência.

$$FTMI_i = k_{mi} = 1 / k_i \quad (3.10)$$

A outra simplificação se dá em relação ao ganho do multiplicador., que realiza a multiplicação entre o erro compensado e o sinal senoidal retificado. O resultado gera o sinal de referência de corrente, que é expresso por:

$$I_{ref} = e_{cv} \cdot I_{sen\_ref} \quad (3.11)$$

Reescrevendo  $I_{sen\_ref}$  de outra maneira:

$$I_{sen\_ref} = K \cdot V_{p\_sec} \text{sen}(\omega t), \quad (3.12)$$

onde,  $V_{p\_sec}$  é o valor da tensão de pico da rede elétrica.

De acordo com [25], o sinal do erro compensado é contínuo, entretanto o sinal de referência é senoidal, logo, não linear. Para encontrar um modelo linear desta multiplicação, foi utilizado o valor médio do sinal de referência da corrente, dado por

$$\frac{I_{ref}}{e_{cv}} = K \cdot \frac{Vp_{sec} \cdot 0.9}{\sqrt{2}}. \quad (3.13)$$

Definindo um valor adequado de  $K$ , é possível a obtenção de um ganho unitário para o multiplicador, resultando em um novo diagrama de blocos apresentado na Figura 3.7.

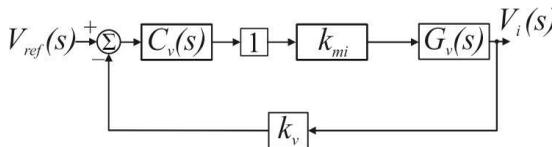


Figura 3.7 – Diagrama de blocos simplificado da malha de tensão.

Para o projeto do compensador de tensão é necessário o modelo da planta de tensão,  $G_v(s)$ , que relaciona a tensão  $V_i(s)$  com a corrente  $I_L(s)$ .

### 3.4.1 Modelo da planta de tensão

A modelagem proposta para a planta de tensão está voltada à obtenção de uma representação por valores médios da tensão de entrada em relação a corrente no indutor, já que esta é imposta pela malha de controle de corrente.

O circuito elétrico equivalente para o modelo por valores médios, que representa a tensão de entrada do conversor *Buck*,  $V_i$ , e uma fonte de corrente alternada na saída,  $I_L$ , é ilustrada na Figura 3.8.

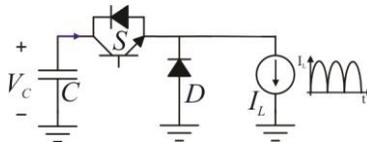


Figura 3.8 - Modelo para planta de tensão de saída.

Analisando o circuito da Figura 3.8, obtém-se a seguinte equação,

$$-C \frac{dV_i}{dt} = i_L(t) \cdot D. \quad (3.14)$$

Aplicando uma perturbação em (3.14), tem-se:

$$-C \cdot \frac{d[V_i + \Delta v_i(t)]}{dt} = D \cdot [I_L + \Delta i_L(t)]. \quad (3.15)$$

Linearizando e aplicando a transformada de Laplace na equação (3.15), obtém-se:

$$\frac{\Delta v_i(s)}{\Delta i_L(s)} = \frac{-D}{sC} \quad (3.16)$$

onde D é o valor médio da razão cíclica e é dado por:

$$D = 0,9 \cdot \frac{D_{\max}}{\sqrt{2}}. \quad (3.17)$$

O cálculo para o valor de  $D_{\max}$  é apresentado na seção 2.5.2.

Após a obtenção do modelo da planta de tensão, alguns pontos devem ser ressaltados:

- O barramento capacitivo fornece energia ao sistema apenas na etapa de operação, na qual o interruptor ativo estiver conduzindo.
- Há uma relação inversamente proporcional entre a tensão do barramento e a corrente no indutor. Quando uma variação positiva ocorre na corrente do indutor, uma variação negativa ocorre na tensão de entrada.
- Não houve uma perturbação na razão cíclica, pois esta é considerada constante no modelo de valores médios.

### 3.4.2 Projeto do Compensador da Tensão de Entrada

A escolha da estrutura do compensador de tensão é feita através de uma análise da planta. Um dos métodos para desenvolver esta análise é usar o domínio da frequência e este foi escolhido no projeto. A função de transferência de laço aberto não compensada é descrita como:

$$FTLA_{nc}(s) = k_{mi} \cdot G_v(s) \cdot k_v, \quad (3.18)$$

sendo:

$$G_v = -\frac{D}{sC}. \quad (3.19)$$

A planta apresenta um polo na origem, exatamente como a planta da malha de corrente. A mesma análise inicial é aplicada para este caso. Devido ao fato de as resistências intrínsecas terem sido desprezadas é necessária a utilização de um compensador com polo na origem, para garantir erro nulo. Entretanto, para a malha de tensão é necessária a adição de um filtro passa-baixa (um polo) ao compensador, para proporcionar atenuação de ruídos em altas frequências. Desta forma, a estrutura final do controlador de tensão é um PI com filtro.

O compensador proporcional-integral, PI, apresenta uma faixa de atenuação de 20 dB/década até a frequência do zero  $\omega_z$  e, a partir dela, todas as componentes recebem ganho constante [24]. A presença do polo do filtro adiciona uma atenuação assintótica de 20 dB/década acima da sua posição, o que aumentará a capacidade do compensador de filtrar ruídos. Com a adição do compensador de tensão a função de transferências compensada é expressa por:

$$FTLA_c(s) = C_v(s) \cdot FTLA_{nc}(s) \quad (3.20)$$

Sendo a função transferência do compensador de tensão,  $C_v(s)$ , dada por:

$$C_v(s) = k_v \frac{(s + \omega_z)}{s(s + \omega_{p2})} \quad (3.21)$$

O cálculo para a determinação dos valores de ganho, do zero e dos polos está apresentado no Apêndice B, assim como imagens do diagrama de Bode do sistema antes e depois da compensação.

Pela expressão (3.19), verifica-se que a planta da malha de tensão é negativa, ou seja, quando há uma variação positiva em uma das variáveis da planta a outra sofre uma variação negativa. Quando a potência elétrica disponível no gerador se eleva, seria natural a tensão do barramento CC se elevar, entretanto o que acontece é um aumento da corrente no indutor e uma leve redução no barramento CC para que o sistema continue operando ao ponto de máxima potência.

Para compensar esse sinal negativo da planta, a malha de tensão é realimentada negativamente, como apresentado na Figura 3.9. Os cálculos matemáticos para a obtenção dos componentes do compensador de tensão estão apresentados no Apêndice C.

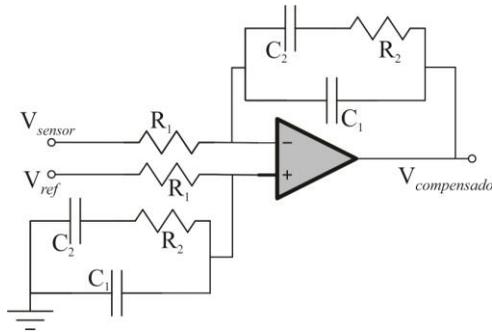


Figura 3.9 – Controlador PI com filtro da malha de tensão.

Uma simulação para validar a planta de tensão encontrada foi realizada e formas de onda da tensão no barramento CC e da corrente no indutor para o sistema modelado e para o sistema elétrico foram levantadas e estão apresentadas na Figura 3.10. Observa-se que o controle apresenta o comportamento descrito anteriormente, de que uma variação positiva em uma das variáveis acarreta em uma variação negativa na outra.

O modelo da planta de tensão reproduz corretamente a tensão de barramento do sistema, o que valida a função de transferência encontrada.

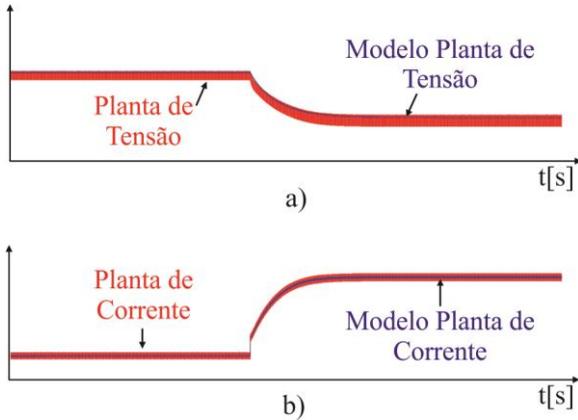


Figura 3.10 - Validação da planta de tensão.

### 3.5 IMPLEMENTAÇÃO DO COMPENSADOR DE CORRENTE: CI 3854

Afim de simplificar, tornar o sistema mais robusto e com baixo custo econômico, o controle utilizado nesse projeto se fez com o circuito integrado 3854. Este CI é muito utilizado em sistemas que realizam correção de fator de potência ativo e apresentou uma resposta satisfatória para o controle requerido nesse trabalho.

#### 3.5.1 Detalhes da conexão usada no CI 3854

A Figura 3.11 apresenta o diagrama do circuito integrado 3854, o qual foi utilizado para realizar o controle do trabalho proposto.



- Pino 3 – Resultado da comparação entre o pino 5 e a leitura de corrente do pino 4;

O Pino 3 é a saída de um amplificador operacional e contém o sinal de erro compensado da malha de corrente. Este sinal é aplicado ao modulador PWM para que a corrente correta seja obtida. A rede de resistores e capacitores conectados ao pino 3 é exibida na Figura 3.13. Os elementos  $C_{CZ}$ ,  $K_{CZ}$  e  $C_{CZ}$  implementam o controlador de corrente.

A estrutura apresentada na Figura 3.13 é a de um compensador avanço-atraso de fase, o qual foi escolhido por ter uma boa resposta em regime transitório e estabilidade, mas principalmente por se adequar ao CI3854. Embora o compensador não apresente um polo na origem o sistema funciona adequadamente.

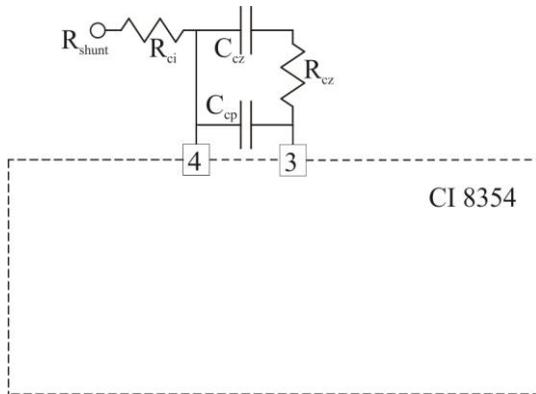


Figura 3.13 – Rede de componentes conectados aos pinos 3 e 4 do controlador da malha de corrente.

- Pino 4 – Entrada inversora do amplificador de corrente;
- Pino 5 – Saída da multiplicação do pino 6, 7 e 8;

Na saída do pino 5 é conectado um resistor em série de alta resistência similar ao que é utilizado para a leitura da corrente. Tal configuração é realizada para que o amplificador de corrente se comporte como um amplificador diferencial, rejeitando o modo comum [23]. Esta configuração está ilustrada na Figura 3.12 (Pino 2).

A equação (3.22) apresenta a multiplicação que ocorre internamente no circuito integrado definido por

$$X = \frac{A \cdot B}{C^2}, \quad (3.22)$$

sendo, A o valor do pino 7, B o valor da porta 6 e C o do pino 8. Este bloco é responsável em fazer a multiplicação do sinal de erro compensado da malha de tensão pelo sinal senoidal retificado, o que gera a referência da malha de corrente. O fator C é usado para ajustar o valor máximo de pico da referência de corrente. Detalhes sobre a multiplicação são ilustrados na Figura 3.14.

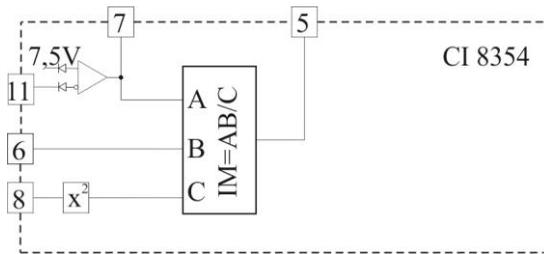


Figura 3.14 – Multiplicador do CI8354.

- Pino 6 – Entrada do sinal de referência do controle de corrente;

No pino 6 é imposto um sinal em corrente senoidal retificado que define o formato senoidal da referência de corrente. Esta corrente senoidal pode ser gerada por um circuito auxiliar que, conectado ao terminal por uma resistência,  $R_{AC}$ , limita o pico da corrente em  $400 \mu A$ . A Figura 3.15 apresenta o sinal de referência do pino 6.

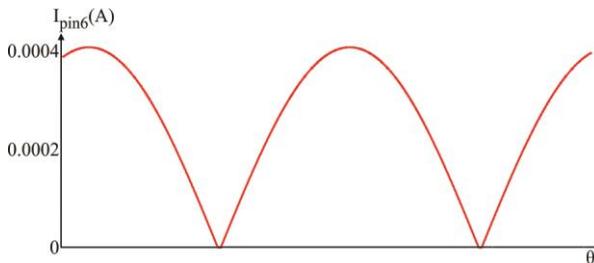


Figura 3.15 – Sinal em corrente aplicado ao pino 6 para gerar a referência senoidal da malha de corrente.

É aconselhável a utilização de um resistor,  $R_{EF}$ , com um quarto do valor de  $R_{AC}$ , entre os pinos 6 e 9. Esta configuração faz com que a

corrente tenha uma mínima distorção de *cross-over* [23]. O circuito auxiliar utilizado neste projeto para a geração do sinal senoidal retificado é apresentado no Capítulo 4. A Figura 3.16 ilustra a conexão externa do pino 6.

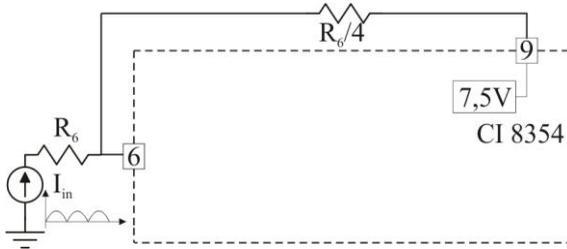


Figura 3.16 – Rede de resistores dos pinos 6 e 9.

- Pino 7 – Saída do amplificador de tensão;

No pino 7 foi conectado o compensador de tensão apresentado na Figura 3.9.

- Pino 8 – Tensão RMS de linha;

Neste projeto foi definida a utilização de uma tensão fixa no pino 8 de 2,5 V, o que garante que o controlador opere sem saturação.

- Pino 9 – Sinal de tensão regulado em 7,5 V (Modelo CI 3854N);

O pino 9 é a saída da tensão de referência, 7,5 V, do integrador. Tal saída é capaz de fornecer 10 mA para circuitos adjacentes [23].

- Pino 10 – Sinal habilitador;

Este pino permite desabilitar o controle. Para não usar esta função é conectado, entre os pinos 10 e 15, um resistor de 22 k $\Omega$ . Tal configuração é apresentada na Figura 3.17.

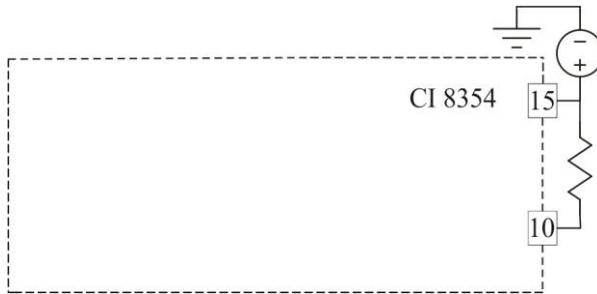


Figura 3.17 – Conexão entre os pinos 10 e 15.

- Pino 11 – Entrada do sensor de tensão;

O pino 11 é a entrada do sensor de tensão, entretanto, como o projeto utiliza um compensador de tensão externo, este pino é curto circuitado com o pino 9, a fim de formar um circuito *buffer* com o amplificador operacional.

- Pino 13 – *Soft Start*;

Como mencionado anteriormente, a tensão de referência utilizada é de 7,5 V. Para que se possa obter esse nível de tensão no pino 9 é necessário que o pino 13 fique desconectado [23].

- Pinos 12 e 14 – Oscilador;

Nos pinos 12 e 14 foram conectados um resistor e um capacitor, respectivamente. Tais componentes configuram a frequência do PWM de acordo com a equação (3.23). A Figura 3.18 apresenta o sinal da portadora, com frequência constante e igual à projetada.

$$f_s = \frac{1,25}{R_{set} \cdot C_t} \quad (3.23)$$

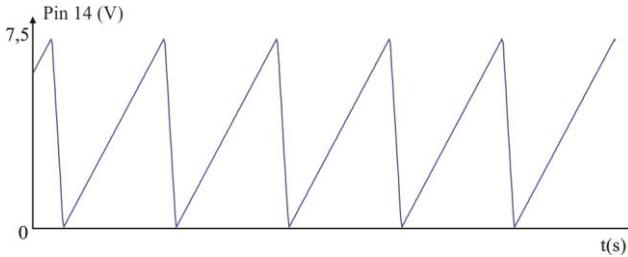


Figura 3.18 – Portadora do *PWM* do CI3854 disponível no pino 14.

- Pino 15 – Alimentação;

O CI 3854 necessita de uma fonte de tensão estável conectada ao pino 15, que consiga injetar no mínimo 20 mA acima de 17 V, para que possa operar normalmente, Figura 3.16.

- Pino 16 – Saída do *PWM*;

A saída do CI3854, estando ele alimentado adequadamente, é grampeada em 15 V. De acordo com [23] a resistência de *gate* mínima necessária é de 5  $\Omega$ . A Figura 3.19 apresenta o sinal de saída simulado do pino 16, quando o sistema já se encontra em regime permanente.

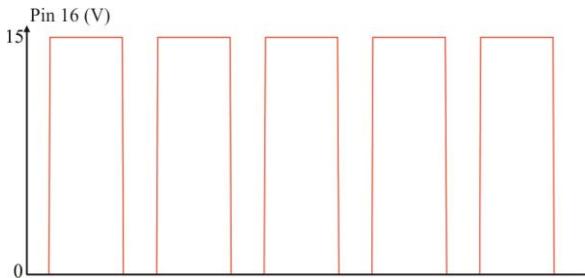


Figura 3.19 – Sinal de comando do interruptor de potência fornecido pelo pino 16.

Os componentes utilizados em um exemplo de projeto que utiliza o CI3854 são apresentados na Tabela 3.1. Os sinais de erro compensado de tensão e de corrente, em regime permanente são ilustrados na Figura 3.20.

A Figura 3.21 apresentada a resposta das variáveis controladas ao ser simulado um degrau na velocidade do vento.

Tabela 3.1- Valores de um projeto exemplo para os componentes empregados na configuração do CI3854.

| Componentes | Valor            |
|-------------|------------------|
| $R_{pk1}$   | 10 k $\Omega$    |
| $R_{pk2}$   | 1,333 k $\Omega$ |
| $R_{mo}$    | 4 k $\Omega$     |
| $R_{ci}$    | 4 k $\Omega$     |
| $R_{cz}$    | 200 k $\Omega$   |
| $C_{cz}$    | 331 pF           |
| $C_{cp}$    | 33 pF            |
| $R_{ac}$    | 750 k $\Omega$   |
| $R_{ref}$   | 180 k $\Omega$   |
| $R_{ena}$   | 22 k $\Omega$    |
| $C_t$       | 3,2 nF           |
| $C_{ss}$    | 1 nF             |
| Rset        | 15k $\Omega$     |
| Cp9         | 1uF              |

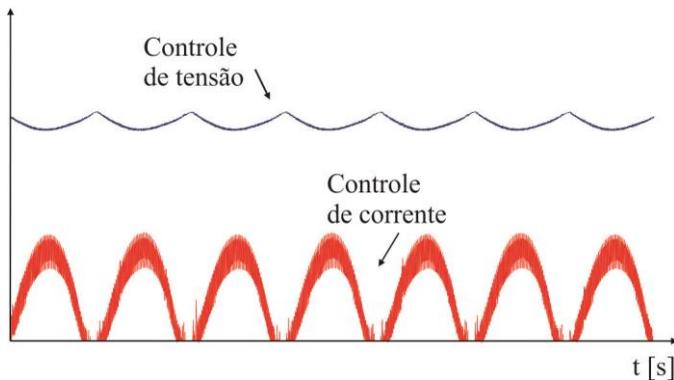


Figura 3.20 - Sinal de controle das malhas de tensão e corrente em regime permanente.

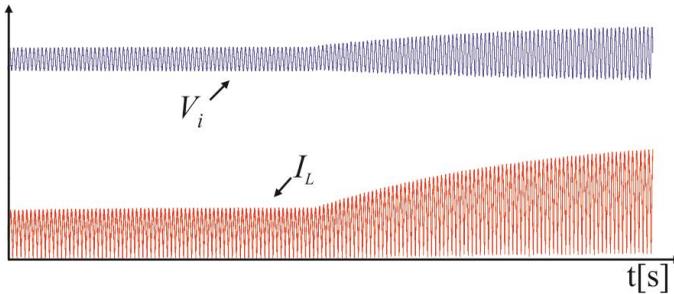


Figura 3.21- Resposta das variáveis controladas para um degrau na velocidade do vento.

### 3.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas as duas malhas de controle necessárias para a realização do sistema proposto. Inicialmente foi exibida a curva de potência do aerogerador utilizado, e após foi explicado como seria realizado o rastreamento de potência máxima. Após esta primeira etapa, as duas malhas, com as respectivas plantas e projetos de compensadores foram apresentados. Por fim, foi exposta uma tabela com os valores de todos os componentes utilizados na confecção do protótipo.

Verificou-se que os compensadores necessários para a realização do controle do sistema são simples e muito usuais. Notou-se também que o controle do sistema operou satisfatoriamente em simulações realizadas.

## 4 PROJETO DO SISTEMA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o projeto, o desenvolvimento e a implementação de um protótipo do sistema proposto, com o intuito de validar os estudos realizados nos capítulos antecessores.

Também são projetados e implementados os circuitos auxiliares tais como fonte externa, sincronismo com a rede elétrica, referencia de corrente e circuito grameador passivo dissipativo, necessários para a operação do conversor.

### 4.2 ESPECIFICAÇÃO DO PROJETO

O protótipo foi desenvolvido para atender as especificações da Tabela 4.1, com intuito de conectar a microturbina GERAR 246 da empresa Enersud de 1000 W à rede elétrica de distribuição em Santa Catarina (220 V).

Tabela 4.1- Especificação do projeto

| Parâmetros  | Valor  |
|---|--------|
| Potência nominal ( $P_o$ )  | 1000 W |
| Frequência de comutação ( $f_s$ )   | 24 kHz |
| Tensão eficaz no barramento capacitivo ( $V_i$ )  | 70 V   |
| Ondulação da tensão no barramento ( $\Delta V_i$ )  | 10%    |
| Valor eficaz da tensão de saída ( $V_o$ )   | 220 V  |
| Valor eficaz da tensão nos enrolamentos secundário e terciário do transformador ( $V_{sec} / V_{ter}$ ) | 33 V   |
| Valor eficaz da tensão no enrolamento primário do transformador ( $V_{pri}$ )                           | 220 V  |
| Corrente de pico no indutor ( $I_{Lp}$ )  | 42,8 A |
| Ondulação da corrente no indutor ( $\Delta i_L$ )   | 5%     |

### 4.3 PROJETO DOS COMPONENTES UTILIZADOS

### 4.3.1 Indutor

A fim de definir uma indutância mínima que atende a especificação de ondulação de corrente máxima em um semiciclo completo da rede elétrica, foi levantada a curva presente na Figura 4.1, a qual apresenta a variação da indutância para cada ângulo  $\theta$  da tensão da rede.

Sendo a razão cíclica uma função do ângulo  $\theta$  em um semiciclo da rede, ao promover uma variação do ângulo  $\theta$ , encontra-se um valor de indutância necessária em cada ângulo  $\theta$  para atender a especificação de 5% de ondulação de corrente. O valor da indutância em função de  $\theta$  é ilustrado na Figura 4.1, na qual é possível definir que o máximo valor necessário de indutância ocorre em  $\frac{\pi}{4}$ .

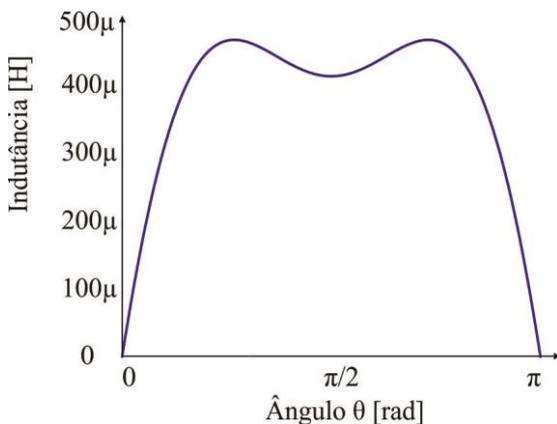


Figura 4.1- Variação da indutância em função do ângulo  $\theta$ .

$$\theta_{\max} = \frac{\pi}{4} \quad (4.1)$$

Substituindo as variáveis expostas em (2.12) pelos valores fornecidos na subseção 4.2 e em (4.1), se encontra o valor mínimo da indutância que atenda os limites de projeto.

$$L = 480\mu\text{H} \quad (4.2)$$

O indutor foi especificado e encomendado na empresa BLUTRAFOS. Ele foi projetado com chapas de ferro silícios de grão

orientado (ideal para baixa frequência), por sua maior componente ser em 60 Hz. A Tabela 4.2 mostra os principais parâmetros do indutor e uma imagem do componente é apresentada na Figura 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros Indutor.

| Parâmetros        | Valor     |
|-------------------|-----------|
| Indutância        | 0,48 mH   |
| Frequência        | 60 Hz     |
| Resistência Série | 10 mΩ     |
| Dimensão (cm)     | 9,5x8x4,3 |
| Peso              | 2,5 kg    |



Figura 4.2 - Indutor utilizado no projeto.

#### 4.3.2 Transformador

A relação de transformação do transformador foi definida em função da tensão de entrada do conversor *Buck* (Barramento DC-Link) e da tensão da rede elétrica, como discutido no subcapítulo 2.6.2. A tensão no barramento foi ajustada em 70 V em função das características do aerogerador GERAR 246.

O projeto também considera a ondulação de tensão no barramento capacitivo, a qual foi definida em 10% do valor médio definido. Portanto a ondulação deverá ser de 7 V para a tensão nominal. Assim a tensão mínima de entrada do conversor *Buck* será de 63 V.

De acordo com o Módulo 8 – Qualidade de Energia do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico

Nacional (PRODIST), para pontos de conexão em Tensão Nominal igual a 220 V, a faixa de variação da tensão de leitura para diferentes níveis da tensão de atendimento é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Limites das tensões de atendimento permitidas [31].

| <b>Tensão de Atendimento (TA)</b> | <b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL)</b> |
|-----------------------------------|--|
| Adequada                          | $201 < TL < 229$                                   |
| Precária                          | $189 < TL < 201$ ou $229 < TL < 233$               |
| Crítica                           | $TL < 189$ ou $TL > 233$                           |

Assim foi definido o nível máximo e mínimo aceitável de tensão no terciário do transformador.

$$V_{\min} = 189 \text{ V} \quad (4.3)$$

A fim de estabelecer uma margem de segurança para o conversor, o valor eficaz da tensão nos enrolamentos primário e secundário foi de 33 V. Dessa maneira, mesmo com tensão da rede elétrica de 233 V (tensão de nível precário superior), o pico da tensão nos enrolamentos primário e secundário não ultrapassará 50 V. Sendo assim, no pior caso, haverá 70 V na tensão de entrada do conversor *Buck* e 50 V de pico na saída, fato que respeita a característica do conversor *Buck* de ser abaixador.

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros do transformador utilizado. Devido ao fato de o transformador ser de baixa frequência, sua confecção foi feita pela empresa BLUTRAFOS. A Figura 4.3 mostra o transformador utilizado na construção do protótipo.

Tabela 4.4 - Parâmetros Transformador.

| <b>Parâmetros</b>                                 | <b>Valor</b> |
|---|--------------|
| Potência processada                               | 1200 VA      |
| Valor eficaz da tensão no secundário              | 220 V        |
| Valor eficaz da tensão no primário A              | 33 V         |
| Valor eficaz da tensão no primário B              | 33 V         |
| Indutância de dispersão do enrolamento secundário | 1 mH         |
| Indutância de Dispersão do enrolamento primário A | 0,5 mH       |
| Indutância de Dispersão do enrolamento primário B | 1,5 mH       |

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| Indutância magnetizante               | 361,3 mH     |
| Resistência do enrolamento secundário | 0,3 $\Omega$ |
| Resistência do enrolamento primário A | 1,4 $\Omega$ |
| Resistência do enrolamento primário B | 2,5 $\Omega$ |
| Frequência                            | 60 Hz        |
| Rendimento                            | 93,2%        |
| Dimensão (cm)                         | 18,5x15x12   |
| Peso                                  | 12 kg        |



Figura 4.3 – Transformador de três enrolamentos utilizado no protótipo.

### 4.3.3 Barramento Capacitivo (DC-Link)

O barramento capacitivo exige algumas discussões, pois tecnologias diferentes de capacitores podem ser empregadas; os eletrolíticos ou os de polipropileno.

#### 4.3.3.1 Capacitores Eletrolíticos

Um capacitor eletrolítico é um dispositivo que usa um eletrólito (um líquido condutor iônico), como uma de suas placas para se alcançar uma maior capacitância por unidade de volume. A grande capacitância

de capacitores eletrolíticos os torna particularmente adequados para o armazenamento de grandes quantidades de energia. Atualmente são largamente utilizados em fontes de energia, e interligando as fases de amplificadores nas frequências de áudio [26].

Os capacitores eletrolíticos são componentes de menores volumes, de custo reduzido, porém com vida útil de pequena duração.

#### 4.3.3.2 Capacitores de Polipropileno

É o mais popular entre os capacitores de filme, os quais possuem uma película plástica isolante como dielétrico. Os capacitores de polipropileno possuem capacitâncias precisas, cujo valor não varia com a temperatura de operação.

Os capacitores de polipropileno, diferentemente dos eletrolíticos, possuem maior volume para mesma tensão e capacitância e tem um custo mais elevado, entretanto, a vida útil é consideravelmente mais longa.

Neste projeto foram comparados dois barramentos, um formado por capacitores eletrolíticos e um com de polipropileno. A escolha baseou-se no critério custo, portanto, a opção de capacitores eletrolíticos foi escolhida. A Figura 4.4 mostra uma foto do barramento com capacitores eletrolíticos utilizado no protótipo. Salienta-se que a opção dos capacitores de polipropileno apresenta uma vida útil maior, o que torna atraente para aplicações em energias renováveis. Assim, ela não deve ser descartada, e sim, discutida em projetos futuros.



Figura 4.4 – Barramento capacitivo.

### 4.3.3.3 Cálculo da Capacitância Total do Barramento

A definição do valor mínimo de capacitância necessária no barramento CC é baseado na análise do modelo médio no período da rede, mostrado na Figura 4.5, que representa a corrente injetada pelo gerador ( $I_{in}$ ) e a corrente fornecida para o conversor *Buck* ( $I_{out}$ ). Este circuito equivalente foi obtido exclusivamente para o sistema pesquisado, possuindo uma fonte de corrente variável na entrada e na saída, pode-se chegar a estrutura representada na Figura 4.5(b).

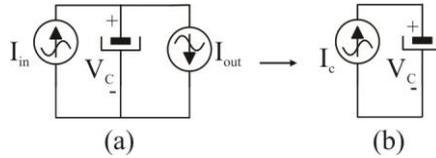


Figura 4.5 – (a) Modelo médio para um período de rede, (b) Circuito equivalente para um período de rede.

De acordo com a Figura 4.5(b), tem-se que:

$$V_c = X_c \cdot I_c \rightarrow \Delta V_c = X_c \cdot I_{c_p} \quad (4.4)$$

Sendo a reatância do capacitor

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot C_o \cdot f} \quad (4.5)$$

isolando o termo que representa a capacitância, e substituindo (4.4) em (4.5), tem-se,

$$C_o = \frac{I_{c_p}}{2\pi \cdot f \cdot \Delta V_c} \quad (4.6)$$

A potência máxima processada pelo capacitor pode ser escrita da seguinte forma:

$$P_o = \frac{V_c \cdot I_{c_p}}{2} \rightarrow I_{c_p} = \frac{2P_o}{V_c} \quad (4.7)$$

Substituindo (4.7) em (4.6), obtém-se o valor da capacitância necessário do banco de capacitores.

$$C_o = \frac{P_o}{4\pi \cdot V_c \cdot f_{rede} \cdot \Delta V_c} \quad (4.8)$$

Dessa maneira, o valor da capacitância utilizado no projeto é de:

$$C_o = 2,707 \text{ mF} \quad (4.9)$$

O barramento foi composto com 66 capacitores de 33  $\mu\text{F}$  conectados em paralelo. O capacitor utilizado é fabricado pelo Rubycon e suas principais características estão apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros do Capacitor.

| Parâmetros                        | Valor            |
|-----------------------------------|------------------|
| Capacitância ( $C_o$ )            | 33 $\mu\text{F}$ |
| Tensão máxima ( $V_{\max}$ )      | 150 V            |
| Resistência interna ( $R_{don}$ ) | 0,5 $\Omega$     |
| Corrente eficaz ( $I_{\max}$ )    | 1,03 A           |

### 4.3.4 Interruptores

#### 4.3.4.1 Interruptor - Conversor CC-CC *Buck*

A escolha do interruptor utilizado no conversor CC-CC foi baseado no esforço de corrente e de tensão. De acordo com a equação (2.17) é obtido o valor da corrente *rms* do interruptor em (4.11) e (4.10).

$$I_{s_{rms}} = \frac{42,8\sqrt{46,7}}{\sqrt{70} \cdot \pi} \sqrt{\int_0^{\pi} \text{sen}(\theta)^3 d\theta} \quad (4.11)$$

$$I_{s_{rms}} = 22,8 \text{ A} \quad (4.12)$$

A tensão máxima sob o interruptor é igual à máxima tensão de entrada, definida por:

$$V_{S_{\max}} = 70 + 7 \text{ V} = 77 \text{ V} \quad (4.13)$$

Ao conhecer estes valores, buscou-se um componente que atende os esforços calculados. Também se buscou um componente com baixa

resistência interna, para que haja baixas perdas de condução. Diante destes critérios, se optou pela utilização do interruptor IPP075N15N3 G, OptiMOS *Power-Transistor* da Infineon [28]. Suas principais características são mostradas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6- Características do Interruptor IPP075N15N3 G.

| Parâmetros                        | Valor          |
|-----------------------------------|----------------|
| Tensão máxima ( $V_{\max}$ )      | 150 V          |
| Resistência interna ( $R_{don}$ ) | 7,2 m $\Omega$ |
| Corrente máxima ( $I_{\max}$ )    | 100 A          |

#### 4.3.4.2 Interruptores - Inversor *Push Pull*

Para os interruptores do inversor *Push-Pull* também foram calculados os esforços de corrente e de tensão, que estão apresentados em (4.14) e (4.15) respectivamente.

$$I_{s2,1} = \frac{42,8}{2} = 21,4 \text{ A} \quad (4.14)$$

$$V_{s2\max} = 2 \cdot 46,7 = 93,4 \text{ V} \quad (4.15)$$

Os interruptores do inversor precisam ser protegidos por um *snubber*, pois estes estão submetidos à sobretensões durante a comutação. As sobretensões são causadas por atrasos de comutação entre os interruptores de cada braço, sendo que o circuito possui uma elevada indutância série com os interruptores (dispersão do transformador e indutância de saída do conversor *Buck*). A comutação do inversor é em baixa frequência (60 Hz), então um *snubber* dissipativo foi usado pois suas perdas serão baixas.

O *snubber* foi projetado para que a tensão em seus terminais não ultrapasse 120 V, logo foi possível a utilização do mesmo interruptor utilizado no conversor CC-CC *Buck*.

#### 4.3.5 Diodos

O diodo de roda livre do conversor CC-CC *Buck* é definido em função dos esforços de corrente e de tensão os quais o componente estará submetido.

Para se obter os valores médio ( $I_{d_{med}}$ ) e eficaz ( $I_{d_{rms}}$ ) da corrente que é conduzida pelo diodo de roda livre, é necessário resolver a integral de (2.19) que é dada nas equações (4.16) e (4.17) para se obter (4.18) e (4.19).

$$I_{d_{med}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_d(\theta) d(\theta) \quad (4.16)$$

$$I_{d_{rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} [I_d(\theta)]^2 d(\theta)} \quad (4.17)$$

$$I_{d_{med}} \approx 13 \text{ A} \quad (4.18)$$

$$I_{d_{rms}} \approx 20 \text{ A} \quad (4.19)$$

Considerando o conversor em regime permanente a tensão reversa máxima sob o semiconductor é igual a tensão da fonte de entrada (4.20).

$$V_{d_{max}} = V_i = 70 \text{ V} \quad (4.20)$$

O diodo utilizado na construção do protótipo foi o V80170PW, *Dual High Voltage Trench MOS Barrier Schottky Rectifier*, fabricado pela Vishay [29]. A Tabela 4.7 apresenta os principais parâmetros do diodo.

Tabela 4.7- Características do diodo V80170PW.

| Parâmetros                                 | Valor   |
|--|---------|
| Tensão máxima ( $V_{max}$ )                | 170 V   |
| Queda de tensão durante condução ( $V_F$ ) | 0,68 V  |
| Corrente máxima ( $I_{max}$ )              | 2 x 40A |

#### 4.4 CIRCUITOS AUXILIARES

Para o devido funcionamento do sistema, se faz necessária a presença de outros circuitos, que auxiliam no desempenho total dos conversores. Foram implementados neste trabalho três circuitos

auxiliares, uma fonte externa de 15 V e 5 V, um sistema eletrônico que tem como objetivo realizar a sincronização entre os interruptores do inversor com a forma de onda da tensão da rede elétrica e um outro circuito, já brevemente apresentado, que seria o circuito que grampeia a tensão aplicada aos semicondutores presentes no conversor *Push-Pull*.

#### 4.4.1 Fonte de Alimentação Externa

A fonte de Alimentação externa tem como objetivo fornecer o nível de tensão necessário projetado para o sistema. A implementação deste circuito auxiliar é simples e robusta. O esquemático do circuito pode ser visto na Figura 4.6.

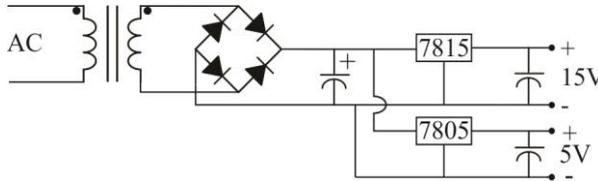


Figura 4.6 – Fonte externa.

A fonte projetada para este trabalho fornece dois níveis de tensão, 15 V e 5 V. Praticamente a fonte externa tem como objetivo alimentar os componentes de outros circuitos auxiliares como também todo o sistema de controle utilizado.

#### 4.4.2 Sincronismo

Para que o sistema possa conectar a turbina eólica na rede elétrica é necessário que a corrente de saída esteja em fase com a tensão disponível na rede. Dessa maneira, se faz necessário a utilização de um circuito auxiliar que faça esse sincronismo.

O circuito de sincronismo foi projetado para que fosse um simples e robusto circuito eletrônico. O esquemático do circuito pode ser visto na Figura 4.7.

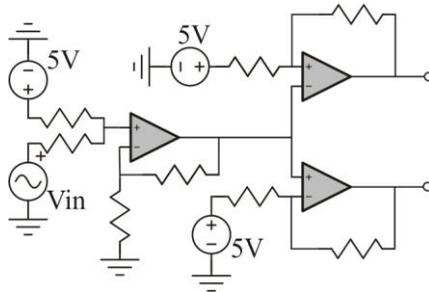


Figura 4.7 - Circuito de sincronismo.

O circuito de sincronismo é formado por um somador e dois comparadores. A tensão de entrada, que está em fase com a tensão de saída e apenas com um valor de tensão reduzido, é somada com uma fonte contínua de 5 V a fim de evitar problemas recorrentes na passagem por zero.

Após o somador a forma de onda com offset de 5 V é comparada com uma tensão fixa de 5 V, ocasionando pulsos opostos com metade do período nas saídas dos comparadores. Estes pulsos acionam os *drivers* que geram o sinal para a comutação dos interruptores presentes no inversor *Push-Pull*. A Figura 4.8 apresenta as formas de onda vista no circuito de sincronismo.

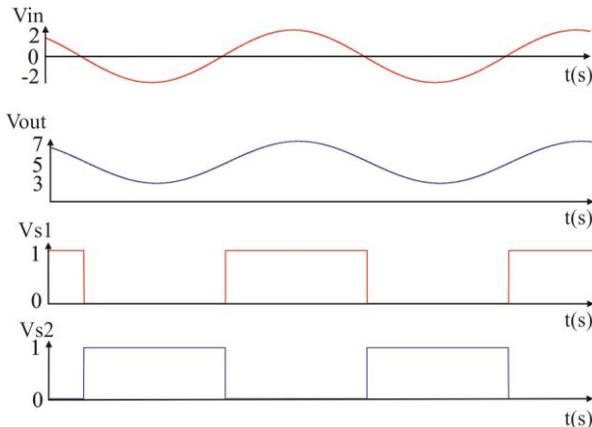


Figura 4.8 - Formas de onda; Circuito de sincronismo.

Dessa maneira se conclui todo o projeto realizado para a implementação do protótipo. No Apêndice D é apresentada a planilha de cálculo utilizada para a realização do projeto. No Apêndice E, pode ser

visto o esquemático utilizado para a criação dos *layouts* das placas. Foram fresadas quatro placas, uma com a ponte retificadora e o barramento capacitivo, outra com o restante do circuito de potência, a terceira placa é constituída pelas duas malhas de controle e pelos *drivers*, a quarta é composta da fonte externa e do sinal de sincronismo. A Figura 4.9 apresenta o esquemático do sistema de potência e de controle do trabalho proposto.

No Capítulo 5 será apresentado como foram feitos os testes com o protótipo e os resultados obtidos.

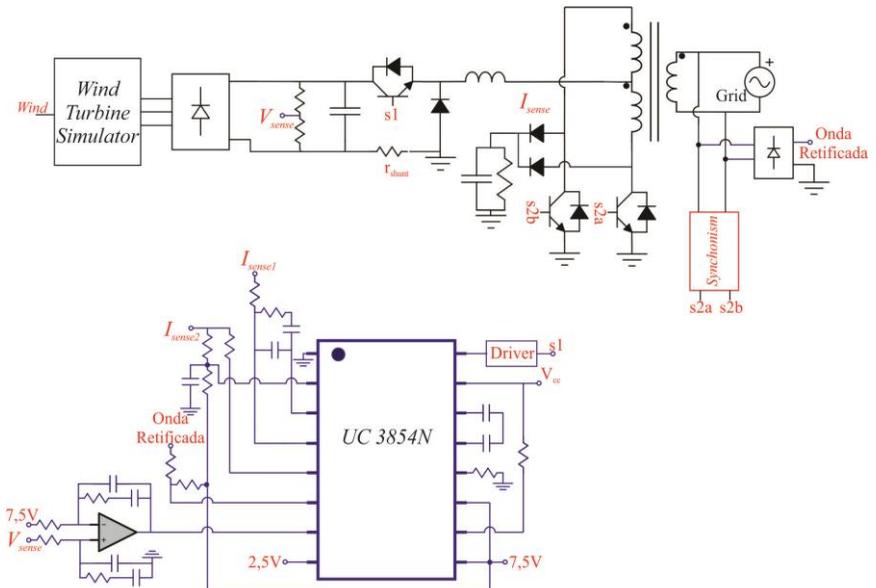


Figura 4.9 - Esquemático do projeto.

## 4.5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou a especificação de um projeto e a realização dos cálculos de corrente e tensão sobre cada componente do sistema. Com esses dados foi possível fazer a escolha de quais componentes seriam utilizados no protótipo.

Na parte final do capítulo foram exibidos com detalhe os circuitos auxiliares presentes, como o circuito grampeador e o circuito eletrônico de sincronismo.

Pode-se concluir que os semicondutores do sistema são de baixa tensão e elevada corrente. Notou-se também que os circuitos auxiliares

propostos são simples. Por fim, observou-se que circuito de sincronismo, necessário para o correto funcionamento do sistema, apresentou boa resposta nas simulações realizadas.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de comprovar a análise teórica apresentada nos capítulos anteriores um protótipo foi construído. Os resultados experimentais obtidos serão expressos e discutidos neste capítulo.

Inicialmente, serão apresentados os resultados obtidos em malha aberta, tais como esforços nos semicondutores, sinais de sincronismo, de comando e etc.

Após serão exibidos os resultados alcançados em malha fechada, com o sistema injetando uma corrente em fase na rede elétrica. Testes dinâmicos e em potência nominal também foram realizados e os resultados serão também apresentados.

No decorrer do capítulo será realizada também uma breve descrição do protótipo, de como os testes foram realizados e os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios.

### 5.2 PROTÓTIPO IMPLEMENTADO

O protótipo construído foi fundamentado na metodologia de projeto apresentado no capítulo 2. A Figura 5.1 apresenta um diagrama de blocos composto pelos componentes utilizados nos experimentos. Todos os elementos foram projetados e construídos no INEP (Instituto de Eletrônica de Potência), exceto os componentes magnéticos que foram construídos pela BLUTRAFOS.

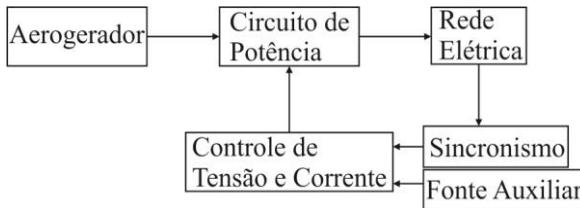


Figura 5.1 - Diagrama do sistema completo.

Foram confeccionadas quatro placas de circuito impresso. Uma composta pela parte de potência do conversor CC-CC *Buck* e do inversor *Push-Pull* (Figura 5.2), outra com a parte de controle implementada (Figura 5.2). Foi implementada uma placa composta pela fonte externa, pelo circuito de sincronismo e pelo circuito que gera o sinal de referência da corrente (Figura 5.3). O barramento capacitivo

também foi implementado em uma placa de circuito impresso separada, a Figura 5.4 apresenta uma foto da placa do barramento construído.

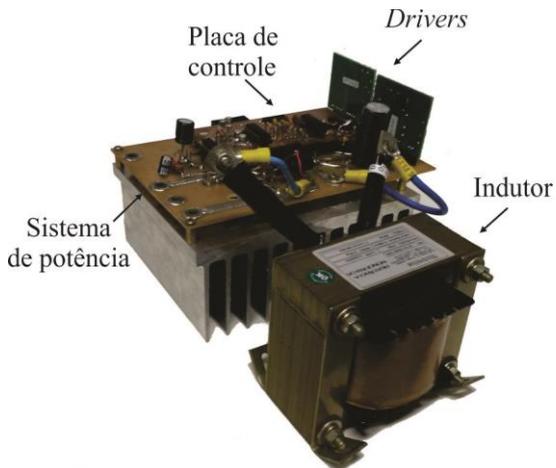


Figura 5.2 – Protótipo conversor *Buck + Push-Pull* e o controle do sistema.

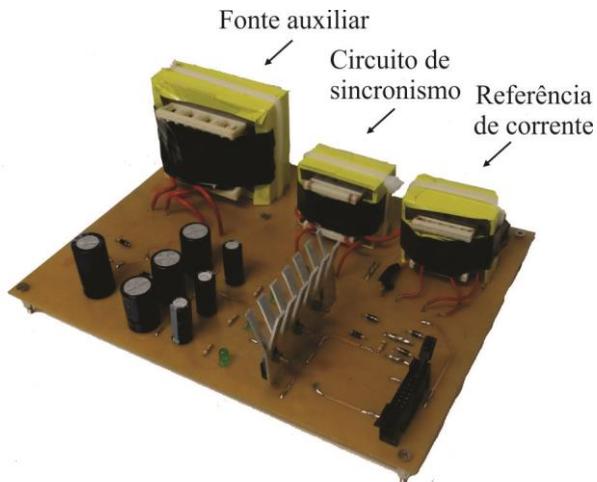


Figura 5.3 – Placa da fonte externa e dos circuitos auxiliares.



Figura 5.4 – Barramento Capacitivo.

Nos testes em laboratório foi utilizado um gerador eólico do modelo Gerar 246, movimentado mecanicamente por um motor de indução controlado por um inversor de tensão. O acoplamento do motor e do gerador foi feito por meio de uma correia lisa. Assim, a bancada permite emular o gerador em condições de velocidade imposta. O recurso da bancada foi fundamental no desenvolvimento do trabalho e permitiu testar o sistema proposto com um gerador eólico. A Figura 5.5 apresenta o sistema motor-gerador utilizado para os experimentos e a Figura 5.6 apresenta o protótipo completo e com todas as conexões realizadas.



Figura 5.5 – Sistema Motor-Gerador utilizado nos experimentos.

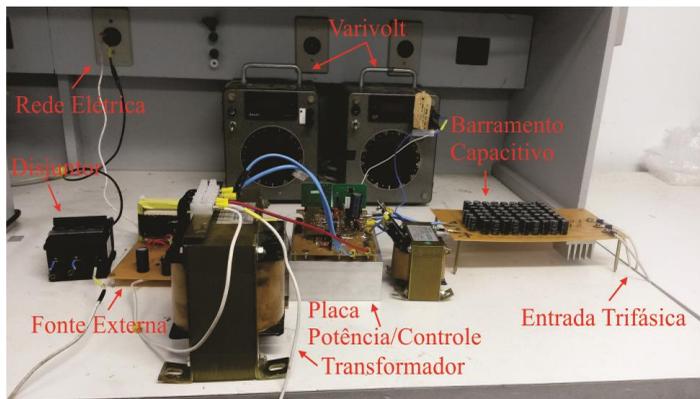


Figura 5.6 – Bancada com o sistema completo conectado.

### 5.3 RESULTADOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA ABERTA

Esta seção apresenta os resultados obtidos em malha aberta. São testes que validam os circuitos periféricos e o projeto dos semicondutores, indutor, transformador e dissipador.

O sinal de sincronismo gerado pelo circuito auxiliar e os dois pulsos para o comando dos dois interruptores do inversor *Push-Pull* são mostrados na Figura 5.7. Destaca-se na imagem a frequência de comutação em 60 Hz.

A Figura 5.8 exhibe os esforços aos quais os semicondutores do inversor *Push-Pull* estão submetidos. A tensão dos interruptores na passagem por zero, instante que ocorre a comutação, não apresenta sobretensão, o que demonstra o bom funcionamento do grameador.

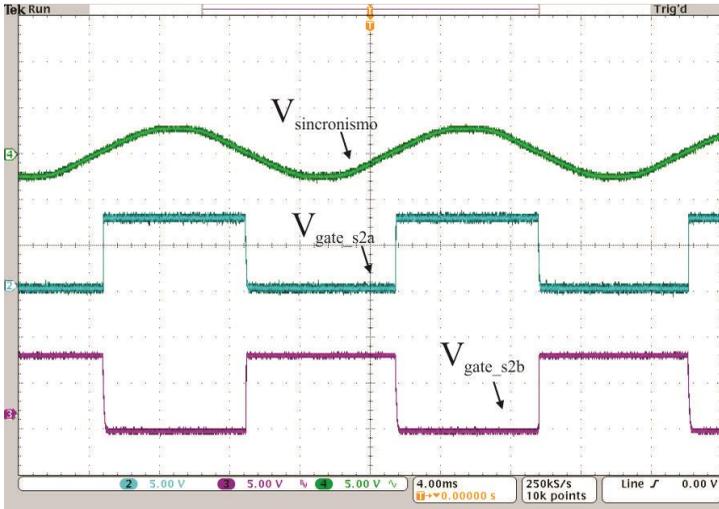


Figura 5.7 - Sinal de sincronismo e sinais de comando dos interruptores do inversor.

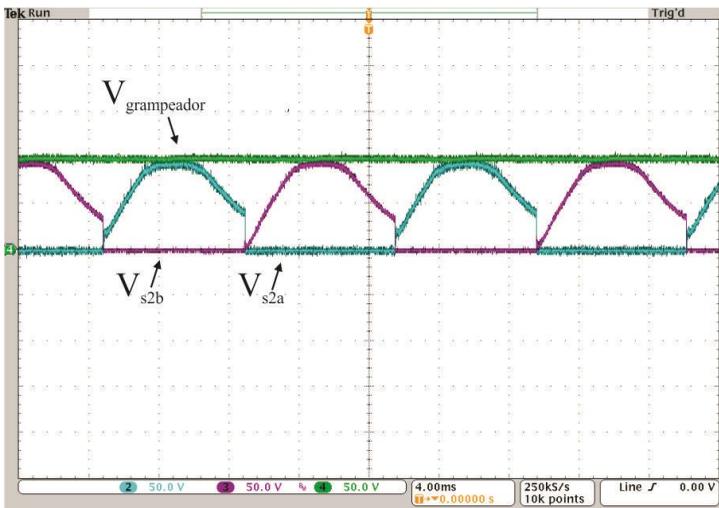


Figura 5.8 - Esforços de tensão dos interruptores do inversor e tensão do grameador *snubber* passivo.

A Figura 5.9 apresenta a tensão sob os interruptores passivo e ativo utilizados no conversor CC-CC *Buck*. É possível visualizar que há uma pequena sobretensão nos componentes, o que comprova a não necessidade de um circuito grameador nesses semicondutores.

Na Figura 5.10 estão expostas as formas de onda da tensão sobre o interruptor ativo do conversor CC-CC *Buck* e sobre um dos interruptores do inversor. As duas formas de onda foram postas no mesmo referencial de tempo para que fosse destacada a diferença no número de comutações que cada semicondutor realiza em um período da rede elétrica.

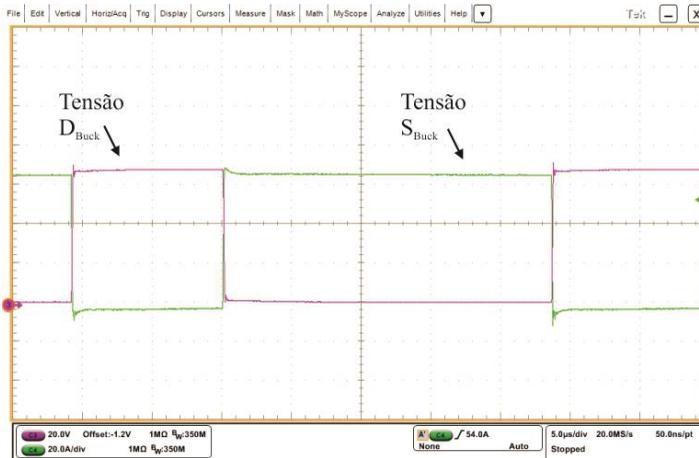


Figura 5.9 – Sinal de tensão sob o interruptores ativo e passivo do conversor CC-CC *Buck*.

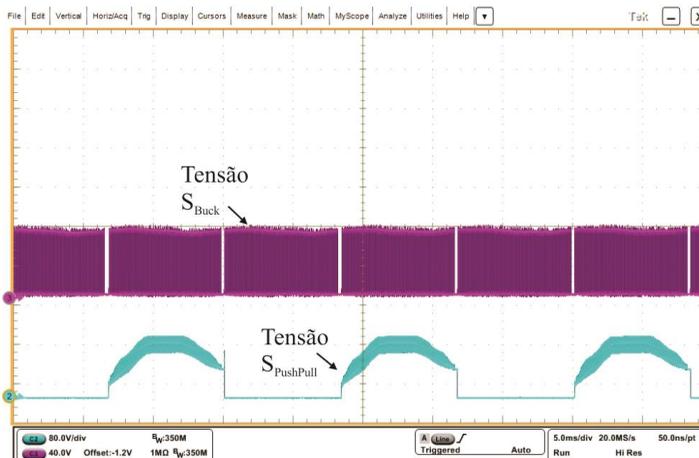


Figura 5.10- Sinal de tensão do interruptor ativo do conversor CC-CC *Buck* e de um interruptor do inversor *Push-Pull*.

## 5.4 RESULTADOS DO SISTEMA OPERANDO EM MALHA FECHADA

Esta secção expõe os resultados obtidos com o sistema operando em malha fechada, ou seja, injetando corrente na rede eléctrica. Os testes foram realizados de acordo com o esquemático representado na Figura 5.11. Foi utilizado um varivolt monofásico com a saída conectada a uma ponte completa de diodos para que se fosse possível variar a referência de corrente. O sistema motor gerador existente na bancada não possui características idênticas ao sistema simulado, pois não apresenta a realimentação da velocidade angular no eixo da máquina. Entretanto, os resultados obtidos podem ser conclusivos pelo fato de uma turbina eólica poder ser emulada por um sistema motor gerador em malha aberta ou também uma fonte de tensão contínua em série com uma resistência [29].

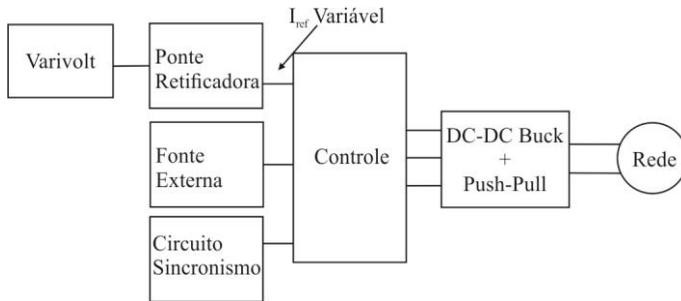


Figura 5.11 – Esquemático utilizado para os teste de bancada.

A estrutura foi montada como ilustrada na Figura 5.11 e foram realizados testes para validar o sistema proposto. Um dos testes foi visualizar as formas de onda da tensão de entrada, da corrente do indutor, da tensão de saída e da corrente de saída para duas velocidades angulares diferentes do gerador eólico.

A Figura 5.12 apresenta as formas de onda da tensão de entrada e da corrente no indutor para uma rotação de 600 rpm (valor obtido no *display* do inversor CFW10). Nota-se pela forma de onda da tensão de entrada que o controle de tensão opera adequadamente, garantindo uma tensão regulada de 70 V com uma ondulação dentro dos limites estabelecidos de 10%. A mesma observação pode ser feita para a corrente no indutor, no qual seu valor de pico e rms estão dentro do projetado e o formato da onde evidencia o funcionamento adequado do controle de corrente.

As formas de ondas da tensão e corrente de saída na rede elétrica são apresentadas na Figura 5.13. Observa-se que a fase da corrente injetada está próxima da fase da tensão da rede elétrica, ou seja, o sistema apresenta fator de deslocamento perto do unitário. Na rotação de 600 rpm e com a tensão de saída fixada em torno de 70 V a potência injetada na rede elétrica foi de 420W. É importante salientar que a referência de corrente é uma amostra da rede, assim, uma tensão de rede distorcida (como da Figura 5.13) gera uma corrente distorcida. Para o trabalho proposto o importante é comparar a corrente injetada com a tensão da rede.

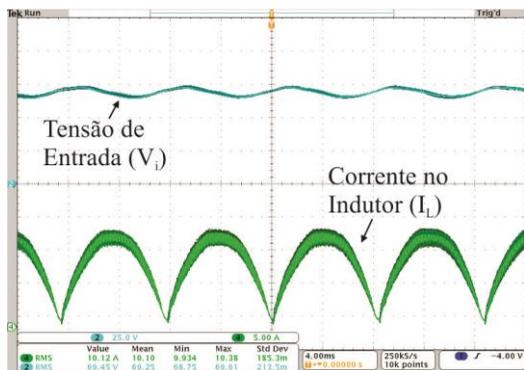


Figura 5.12 – Tensão na entrada e corrente no indutor para uma rotação de 600 rpm.

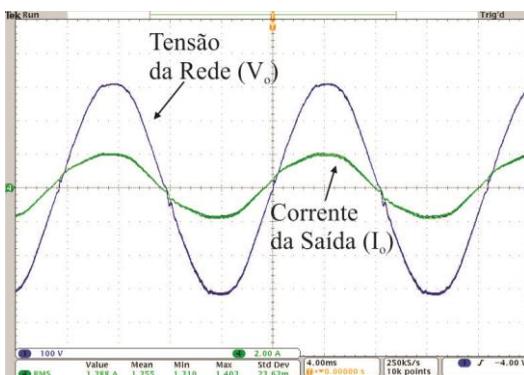


Figura 5.13 - Tensão e corrente de saída para uma rotação de 600 rpm.

As formas de onda da tensão de entrada e da corrente no indutor para o caso de uma velocidade angular de 700 rpm no gerador são mostradas na Figura 5.14. Novamente os compensadores de tensão e de corrente se mostraram satisfatórios. A tensão do barramento se aproximou do valor de referência, enquanto a corrente no indutor continuou com seu formato senoidal retificado. Os valores de pico e rms da corrente aumentaram, o que condiz com o projeto implementado. A tensão de barramento permaneceu fixa mesmo com o aumento da potência gerada pelo aerogerador, enquanto a corrente injetada na rede elétrica, aumentou.

A corrente e a tensão de saída podem ser observadas na Figura 5.15. Novamente, a rotação angular utilizada para a obtenção desses dados foi de 700 rpm. Observa-se que mesmo com o aumento da potência injetada o sistema continua com um fator de potência próximo ao unitário do lado da rede elétrica. A potência injetada nesta velocidade foi de aproximadamente 510 W.

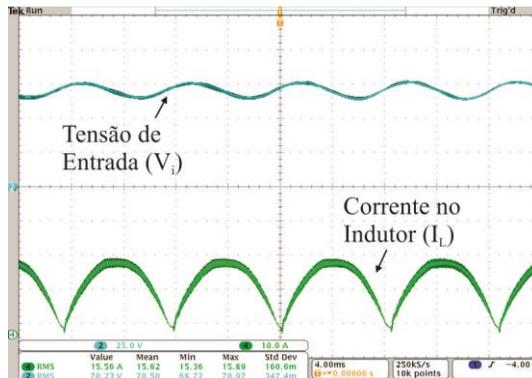


Figura 5.14 - Tensão na entrada e corrente no indutor para uma rotação de 700 rpm.

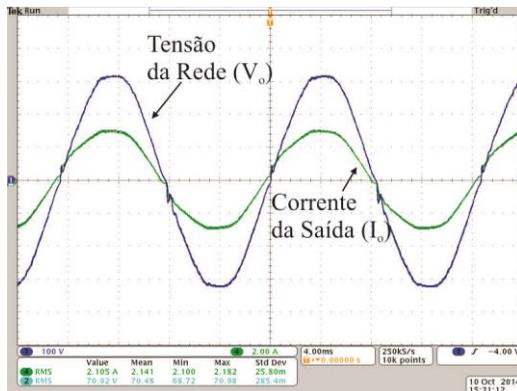


Figura 5.15 - Tensão e corrente de saída para uma rotação de 700 rpm

As formas de onda do sinal compensado resultante da malha para o controle da tensão e da malha para o controle da corrente são apresentadas na Figura 5.16. Nota-se que ambos os sinais não se encontram saturados e com uma forma de onda semelhante ao simulado (Figura 5.17).

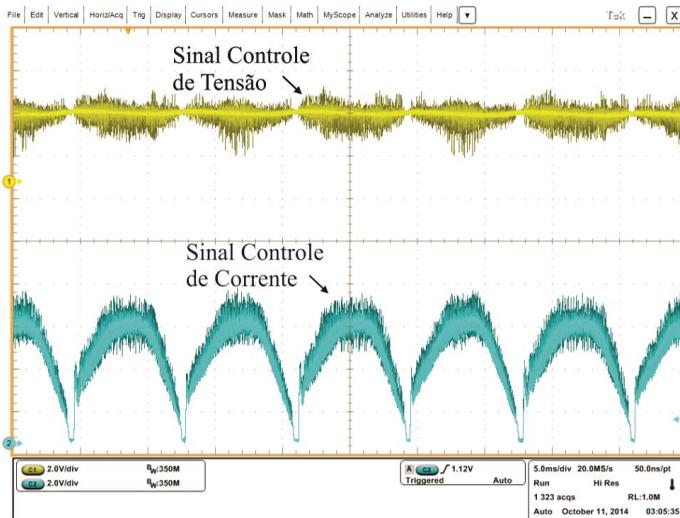


Figura 5.16 – Sinais de controle observados em bancada.

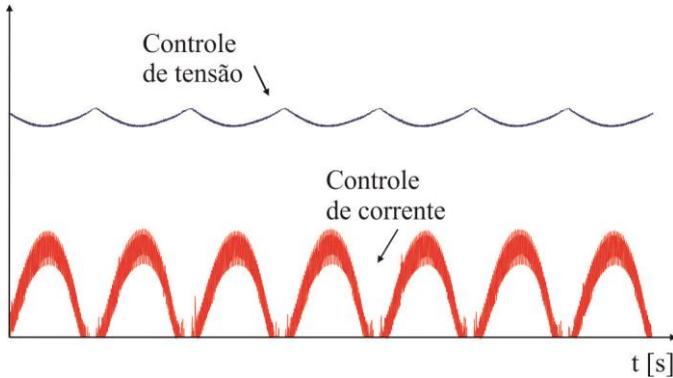


Figura 5.17 - Sinais de controle simulado.

#### 5.4.1 Teste com Potência Nominal

Para a realização do teste com potência nominal do sistema completo conectado à rede elétrica foi necessária a utilização de um variôlt trifásico, pois o motor utilizado na bancada de testes não tem condições de fornecer o torque necessário para que o gerador pudesse operar com potência nominal.

O sistema permaneceu injetando em torno de 1 kW na rede elétrica durante 5 minutos, depois disso o sistema foi desligado adequadamente. As formas de onda da tensão no barramento CC e das correntes no indutor e na saída do sistema estão apresentadas na Figura 5.18.

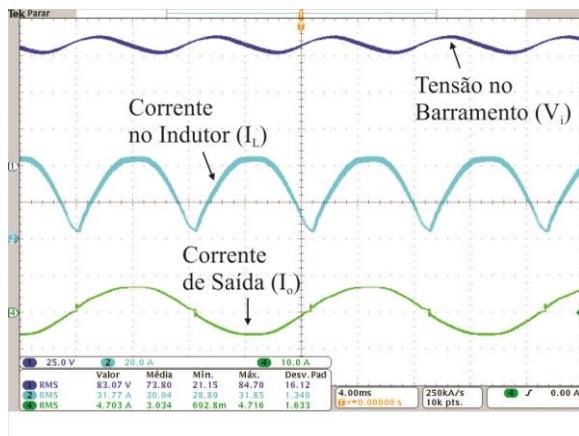


Figura 5.18 - Resultado para o processamento de 1 kW.

## 5.5 EXPERIMENTO DINÂMICO

A realização do experimento dinâmico utilizou a mesma configuração apresentada na Figura 5.11. Primeiramente, o sistema foi posto em regime permanente com o aerogerador em 550 rpm. Após a estabilidade do sistema, a velocidade foi alterada para 700 rpm, ocasionando um aumento na potência disponível pelo gerador. As formas de onda da tensão de saída, da corrente no indutor e da corrente injetada na rede são visualizadas na Figura 5.19.

Os resultados para o primeiro caso (aumento da velocidade) do experimento dinâmico foram satisfatórios; a tensão CC se manteve constante com o aumento da potência gerada. A corrente no indutor aumentou com o aumento da velocidade, logo, a corrente injetada na rede elétrica foi maior.

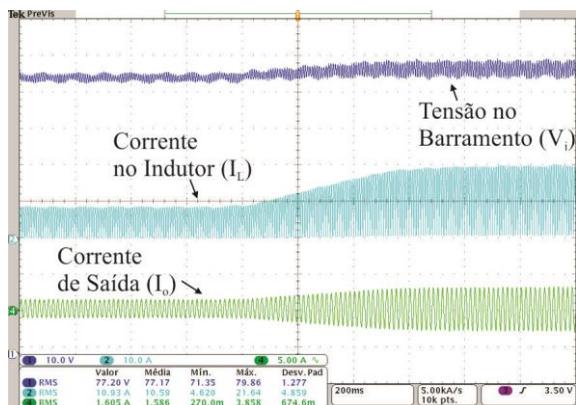


Figura 5.19 – Resultado experimento dinâmico, aumento da velocidade angular de 500 rpm para 700 rpm.

A Figura 5.20 apresenta as formas de onda da tensão e da corrente de saída e da corrente no indutor para a redução da velocidade angular do eixo do motor de 700 rpm para 500 rpm.

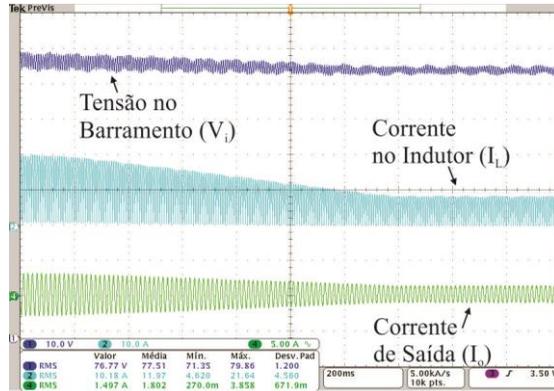


Figura 5.20 - Resultado experimento dinâmico, redução da velocidade angular de 700 rpm para 500 rpm.

A corrente injetada na rede aumentou com o aumento da velocidade angular, pois o gerador começou a fornecer mais potência para o sistema. Mesma situação ocorreu com a corrente no indutor.

Já a tensão no barramento CC permaneceu praticamente constante durante todo o intervalo, comprovando a efetividade do controle de tensão.

É importante também ressaltar que a transição tanto da corrente no indutor quanto a injetada na rede foi suave em ambos os casos.

Para finalizar é apresentado na Figura 5.21 três gráficos de rendimento: um com todo o sistema projetado, um com apenas o conversor *Buck* e o inversor *Push-Pull* sem a presença do transformador e um com apenas o transformador de baixa frequência.

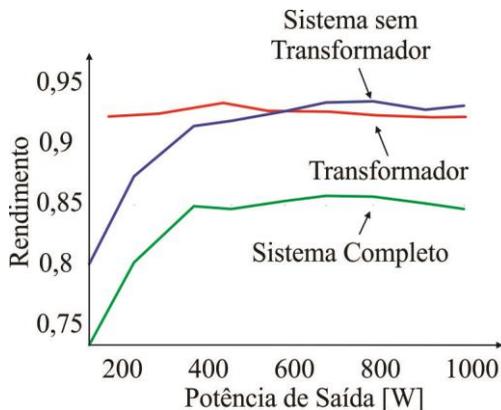


Figura 5.21 - Rendimento do Sistema.

O rendimento do sistema completo na potência nominal ou próxima da é de 87%. O do sistema sem transformador (Conversor *Buck* + *Push-Pull*) é de 95% e o do transformador é praticamente constante (92%) para qualquer potência de saída.

Os conversores *Buck* + *Push-Pull* operam em baixa tensão, consequentemente, com elevadas correntes, o que proporciona maiores perdas de condução nas estruturas. Além disso, as correntes elevadas também provocam maiores perdas nas resistências do indutor e do transformador. As perdas teóricas presentes no conversor *Buck* e no inversor *Push-Pull* são apresentadas na Tabela 5.1 e o desenvolvimento matemática realizado para calcular teoricamente as perdas está ilustrado no Apêndice F.

Tabela 5.1 - Perdas teóricas do sistema.

| Componente                   | Perdas por [Condução] e (Comutação) W | Quantidade de Componente | Perdas Totais (W) | (%)  |
|------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|------|
| Interruptor <i>Buck</i>      | [2,54] e (0,964)                      | 1                        | 3,504             | 7,5  |
| Diodo <i>Buck</i>            | [8,38] e (0,092)                      | 1                        | 8,472             | 18,3 |
| Interruptor <i>Push-Pull</i> | [3,214]                               | 2                        | 6,428             | 13,8 |
| <i>Snubber</i>               | [0,1]                                 | 1                        | 0,1               | 0,34 |

|                       |          |   |        |      |
|-----------------------|----------|---|--------|------|
| Resistor <i>Shunt</i> | [18,365] | 1 | 18,365 | 39,6 |
| Indutor               | [9,486]  | 1 | 9,486  | 20,5 |
| Total                 | -        | - | 46,355 | 100  |

## 5.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com o protótipo implementado em situações diferentes de testes. No início do capítulo foram exibidas as placas que constituem o sistema implementado e os testes realizados em malha aberta. Após esses primeiros resultados, foram expostas as formas de ondas significantes para o experimento em malha fechada, com o sistema conectado na rede elétrica.

No final do capítulo foram exibidos os testes que emulavam uma variação crescente e decrescente da velocidade do vento.

Verificou-se que o sistema se comportou como esperado em todos os testes realizados. Notou-se também que o rendimento do sistema foi satisfatório e semelhante ao calculado teoricamente.

## 6 CONCLUSÃO GERAL E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou uma proposta de sistema para a conexão de pequenas turbinas eólicas à rede elétrica. A topologia proposta é nova para esta aplicação e é composta por um retificador passivo, um conversor CC-CC *Buck* e um inversor *Push-Pull* com entrada em corrente.

Foi apresentada, no Capítulo 1, uma contextualização da energia eólica, desde sua primeira utilização para moagem de grãos até a construção de grandes parques eólicos, evidenciando a importância desta forma de energia na história e no futuro da sociedade. Neste capítulo, ainda, se fez a diferenciação de turbinas de pequeno e grande porte. No final do capítulo foram apresentadas as estruturas de potência mais convencionais utilizadas para conexão de pequenos aerogerados na rede elétrica e também a topologia proposta nesta dissertação.

No Capítulo 2 foram abordadas as etapas de operação do sistema proposto e desenvolvido uma análise qualitativa da estrutura. Também foi apresentada, no capítulo, a metodologia de projeto, contendo os cálculos matemáticos realizados para a melhor escolha dos componentes utilizados, tanto do conversor CC-CC *Buck* quanto do inversor *Push-Pull*. Pelos resultados obtidos, concluiu-se que a topologia estudada é eficaz para esta aplicação. A estrutura possui três interruptores, sendo que apenas um comutando em alta frequência e obteve baixos esforços de tensão nos semicondutores. Por outro lado, os elementos do sistema ficaram submetidos à elevadas correntes.

No Capítulo 3 foi abordada a metodologia de projeto e implementação do controle do sistema proposto. Foram apresentadas as modelagens das plantas e os esquemas construídos para o melhor funcionamento do sistema de controle. Foram propostas duas malhas, uma de tensão que regula a tensão CC na entrada do conversor *Buck* e uma de corrente, que controla a corrente injetada na rede elétrica. O controle do sistema foi considerado adequado, pois atendeu aos parâmetros de projeto. A implementação foi simples, sendo utilizado um circuito integrado comercial para a realização.

O Capítulo 4 abordou os cálculos numéricos realizados para a escolha dos componentes utilizados. Foram apresentados os parâmetros de entrada do sistema, e explicado a escolha dos principais componentes. No final do Capítulo 4 foram exibidos os valores numéricos dos componentes utilizados para a obtenção dos circuitos auxiliares utilizados. Os elementos do sistema foram satisfatórios, os circuitos auxiliares realizaram suas funções adequadamente e os

sensores implementados, os semicondutores e os capacitores do barramento CC apresentaram boas respostas nos experimentos realizados. Entretanto, os componentes magnéticos utilizados revelaram-se muito pesados e com elevado volume. Outro ponto negativo foi o *driver* necessário para comutar o interruptor do conversor *Buck*. A princípio o *driver* foi projetado com um circuito de *bootstrap*, porém problemas ocorreram e se fez necessário a utilização de um *driver* isolado fabricado pela *Semikron*.

Com base nos resultados obtidos no capítulo 5 verificou-se que a estrutura é estável em malha aberta e que para o correto funcionamento é necessário operá-la em malha fechada, de modo a garantir que a corrente injetada na rede seja senoidal e em fase com a tensão da rede elétrica. Também, pode-se dizer que a estrutura apresenta um comportamento satisfatório em relação aos esforços de tensão sobre os componentes, não apresentando sobressinal, em função do grameamento realizado pelo *snubber*.

Pode-se dizer que o sistema apresentado neste trabalho atendeu a todos os objetivos propostos no início. A análise do sistema foi concluída, assim como a implementação do protótipo. Estudos sobre o barramento capacitivo foram realizados, como também o desenvolvimento do sistema de controle necessário para o funcionamento do protótipo.

Assim, conclui-se que além dos objetivos propostos, o trabalho também atendeu o desafio de se construir um sistema simples, robusto e de baixo custo que processe a energia elétrica gerada em uma pequena turbina eólica e injete na rede elétrica. No Apêndice G é apresentado o artigo gerado por este trabalho que foi publicado no RPG (*Renewable Power Generation Conference*), congresso que ocorreu em Setembro de 2014 em Nápoles, na Itália.

Por fim, o autor sugere algumas propostas de estudos futuros visando explorar mais benefícios do sistema proposto.

- Realização da proteção do lado da rede elétrica.
- Realização da proteção do lado da turbina eólica.
- Criação de um banco de baterias que permita o funcionamento do sistema mesmo quando não há vento ou quando não há a rede elétrica.

- Mudança dinâmica da referência da malha de tensão, com objetivo de melhorar a performance do sistema para ventos de baixa velocidade.
- Operação com controle digital.

## REFERÊNCIAS

- [1] G. Tibola, "Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de potência máxima" Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.
- [2] History of Wind Energy <[www.iowaenergycenter.org](http://www.iowaenergycenter.org)>. acessado em 20 de Agosto de 2014.
- [3] Volunteers in Technical Assistance (VITA) <[journeytoforever.org/farm\\_library/VITAlist.html](http://journeytoforever.org/farm_library/VITAlist.html)>. acessado em 20 de Agosto de 2014.
- [4] Energia Eólica <[www.ammonit.com/pt/energia-eolica](http://www.ammonit.com/pt/energia-eolica)>. acessado em 21 de Agosto de 2014.
- [5] Moinhos de Vento <[www.holland.com](http://www.holland.com)>. acessado em 20 de Agosto.
- [6] E. P. Milléo, E. A. A. dos Santos, J. C. Rivabem, M. M. Baqui, V. S. Costa, "Gerador Eólico de baixo custo," Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2003
- [7] Energia Eólica – Parte 2 <<http://www.ammonit.com/pt/energia-eolica2>>. acessado em 21 de Agosto de 2014.
- [8] História da Energia Eólica e suas utilizações, <[http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial\\_eolica.htm](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/tutorial/tutorial_eolica.htm)>. acessado em 25 de Agosto de 2014.
- [9] A Energia eólica no mundo, <<http://www.mmlenergia.com.br/mmlenergia/ui/EnergiaEolica/NoMundo.aspx>>. acessado em 26 de Agosto de 2014.
- [10] Produção Eólica de mais que dobrar em 2014, <<http://ate2050.blogspot.com.br/2014/02/producao-eolica-deve-mais-que-dobrar-em.html>>. acessado em 30 de Agosto de 2014.
- [11] I. Barbi, T. B. Lazzarin, E. A. Junior, C. H. I. Font, "Desenvolvimento de Tecnologia para Conexão com a Rede Elétrica de Aerogeradores de Pequeno Porte," Relatório Interno, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

- [12] Charge Controllers, <[www.helioselectric.com/renewables.php](http://www.helioselectric.com/renewables.php)>. acessado em 8 de Setembro.
- [13] ANEEL, Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF, Brasil: Centro de Documentação – Cedoc, 2014.
- [14] Kortabarria E Ibarra, and I.D. Alegria, "Power converters used in grid connected small wind turbines: Analisis of Alternatives," 5th IET Int. Conf. on Power Electron., Machines and Drives (PEMD 2010), 2010.
- [15] J. P. P. T. Marques, "Modelação e Controlo de Conversor DC/AC para interligação de painéis fotovoltaicos à Rede" Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2009.
- [16] J. Capellaro, "Sistema autônomo de geração de energia solar fotovoltaica para estações telemétricas" Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Regional de Blumenau, 2013.
- [17] V.L.S.Gomes, A.W.F.V.Silveira, "Comparação entre métodos do máximo ponto de extração de potência MPPT de uma turbina eólica," 2014.
- [18] Datasheet GERAR 246. Disponível em <<http://www.enersud.com.br>>, acessado em 19 de Março de 2014.
- [19] B. S Nora, "Retificador trifásico associado ao conversor boost aplicado a sistemas de geração eólico" Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- [20] MARTINS, Denizar Cruz , Eletrônica de Potência – Semicondutores de Potência Controlados, Conversores CC-CC Isolados e Conversores CC-CC a Tiristor (Comutação Forçada).
- [21] D. A R Caballero "Novo conversor CC-CC Flyback-Push-Pull alimentado em corrente: Desenvolvimento teórico e experimental" Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
- [22] BARBI, Ivo; Projetos de Fontes.

- [23] Datasheet UC3854. Disponível em <<http://www.unitrode.com>>, acessado em 15 de Junho de 2014.
- [24] L. Schmitz, "Estágio de processamento da energia gerada a partir de células a combustível para aplicação em um sistema de microgeração interligado à rede elétrica comercial," Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [25] Karanayil, B, Agelidis, V. G, Pou, J. Evaluation of DC-link decoupling using electrolytic or polypropylene film capacitors in three-phase grid-connected photovoltaic inverters, In: Industrial Electronics Society, IECON 2013 – 39<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE, 14003551, 2013, Vienna, p. 6980-6986.
- [26] General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors, <[www.nichicon.co.jp/english/products/pdf/aluminum.pdf](http://www.nichicon.co.jp/english/products/pdf/aluminum.pdf)>. acessado em 15 de Maio.
- [27] Datasheet IPB072N15N3G. Disponível em <<http://www.infineon.com>>, acessado em 30 de Junho de 2014.
- [28] Datasheet V80170PW. Disponível em <<http://www.vishay.com>>, acessado em 30 de Junho de 2014.
- [29] R. F. Coelho "Concepção, análise e implementação de uma microrede interligada à rede Elétrica para alimentação ininterrupta de cargas cc a partir de fontes renováveis" Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- [30] ANEEL, Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2010. 62p.

## APÊNDICE A

### Projeto do compensador de corrente:

$$k_v := 0.107$$

$$V_{\text{trip}} := 7V$$

$$k_i := 0.1 \cdot \frac{V}{A}$$

$$K_{\text{PWM}} := \frac{1}{V_{\text{trip}}} = 0.143 \frac{1}{V}$$

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

$$\omega := 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, 5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} .. 10^6 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Planta para controle da corrente

$$G_i(\omega) := \frac{V_c}{j \cdot \omega \cdot L}$$

$$G_{\text{mod}}(\omega) := 20 \cdot \log \left( \left| G_i(\omega) \cdot \frac{1}{A} \right| \right)$$

$$G_{\text{fase}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(G_i(\omega))$$

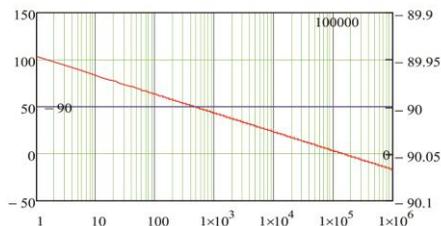


Figura 3 -  $G_{\text{mod}}$  em vermelho e  $G_{\text{fase}}$  em azul.

FT de laço aberto não-compensado

$$FTL_{\text{NC}}(\omega) := K_{\text{PWM}} \cdot k_i \cdot G_i(\omega)$$

$$FTL_{\text{NC\_mod}}(\omega) := 20 \cdot \log \left( \left| FTL_{\text{NC}}(\omega) \right| \right)$$

$$FTL_{\text{NC\_fase}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(FTL_{\text{NC}}(\omega))$$

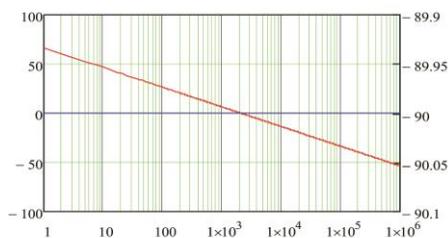


Figura 4 -  $FTL_{\text{NC\_mod}}$  em vermelho e  $FTL_{\text{NC\_fase}}$  em azul.

## Projeto do compensador PI

$$\omega_{c\_comp} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_s}{10} = 1.508 \times 10^4 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

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

$$\omega_z := \frac{\omega_{c\_comp}}{\tan\left(M_\phi - \frac{\pi}{2} - \arg(\text{FTLA}_{\text{NC}}(\omega_{c\_comp}))\right)} = 8.706 \times 10^3 \cdot \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

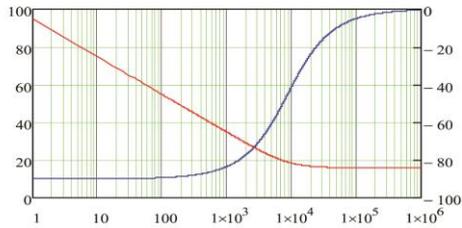
$$\tau_z := \frac{1}{\omega_z} = 114.86 \mu\text{s}$$

$$k_c := \frac{\omega_{c\_comp}}{|\text{FTLA}_{\text{NC}}(\omega_{c\_comp})| \cdot \sqrt{(\omega_{c\_comp}^2 + \omega_z^2)}} = 6.264$$

$$C_i(\omega) := k_c \cdot \frac{(j \cdot \omega + \omega_z)}{j \cdot \omega}$$

$$C_{i\text{mod}}(\omega) := 20 \cdot \log(|C_i(\omega)|)$$

$$C_{i\text{fase}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(C_i(\omega))$$

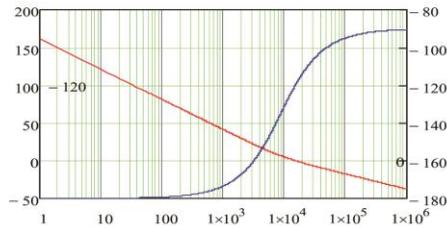
Figura 5 -  $C_{i\text{mod}}$  em vermelho e  $C_{i\text{fase}}$  em azul.

## FT de Laço aberto compensado

$$\text{FTLA}_C(\omega) := C_i(\omega) \cdot \text{FTLA}_{\text{NC}}(\omega)$$

$$\text{FTLA}_{C_i\text{mod}}(\omega) := 20 \cdot \log(|\text{FTLA}_C(\omega)|)$$

$$\text{FTLA}_{C_i\text{fase}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(\text{FTLA}_C(\omega))$$

Figura 6 -  $\text{FTLA}_{C_i\text{mod}}$  em vermelho e  $\text{FTLA}_{C_i\text{fase}}$  em azul.

## APÊNDICE B

### Projeto do compensador de tensão:

#### Planta para controle da tensão

$$\omega := 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}} .. 10^5 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$G_V(\omega) := \frac{-D}{j \cdot \omega \cdot C}$$

$$G_{V\text{mod}}(\omega) := 20 \cdot \log \left( \left| G_V(\omega) \cdot \frac{A}{V} \right| \right)$$

$$G_{V\text{fase}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(G_V(\omega))$$

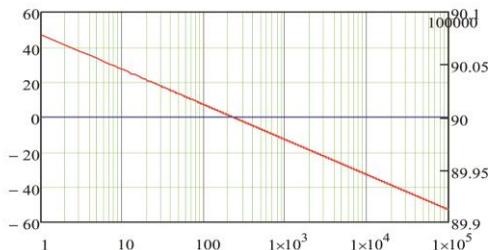


Figura 7 -  $G_{V\text{mod}}$  em vermelho e  $G_{V\text{fase}}$  em azul.

#### FT de laço aberto não-compensado

$$FTL_{NCV}(\omega) := \frac{k_V \cdot G_V(\omega)}{k_i}$$

$$FTL_{NCV\_mod}(\omega) := 20 \cdot \log \left( \left| FTL_{NCV}(\omega) \right| \right)$$

$$FTL_{NCV\_fase}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(FTL_{NCV}(\omega))$$

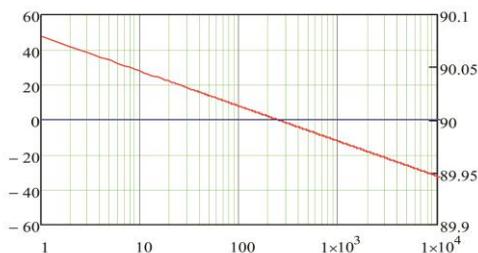


Figura 8 -  $FTL_{NCV\_mod}$  em vermelho e  $FTL_{NCV\_fase}$  em azul.

## Projeto do compensador PI

$$\omega_{c\_comp} := 2 \cdot \pi \cdot \frac{2 \cdot f_{rede}}{10} = 75.398 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

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

$$\omega_z := \frac{\omega_{c\_comp}}{\tan\left(M_{\phi} - \frac{\pi}{2} - \arg(\text{FTLA}_{NCV}(\omega_{c\_comp}))\right)} = 43.531 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

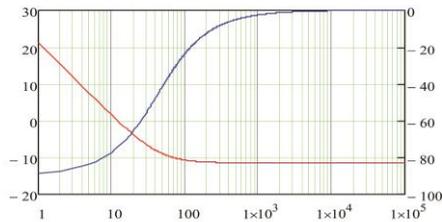
$$\tau_z := \frac{1}{\omega_z} = 22.973 \text{ms}$$

$$k_{cv} := \frac{\omega_{c\_comp}}{\left|\text{FTLA}_{NCV}(\omega_{c\_comp})\right| \cdot \sqrt{(\omega_{c\_comp}^2 + \omega_z^2)}} = 0.268$$

$$C_v(\omega) := k_c \cdot \frac{(j \cdot \omega + \omega_z)}{j \cdot \omega}$$

$$C_{v\text{mod}}(\omega) := 20 \cdot \log(|C_v(\omega)|)$$

$$C_{v\text{fase}}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(C_v(\omega))$$

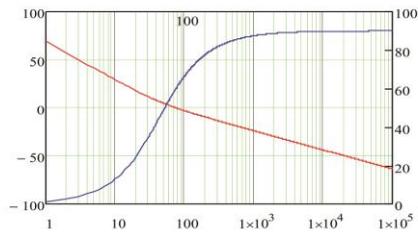
Figura 9 -  $C_{mod}$  em vermelho e  $C_{fase}$  em azul.

## FT de Laço aberto compensado

$$\text{FTLA}_{C_v}(\omega) := C_v(\omega) \cdot \text{FTLA}_{NCV}(\omega)$$

$$\text{FTLA}_{C_v\_mod}(\omega) := 20 \cdot \log(|\text{FTLA}_{C_v}(\omega)|)$$

$$\text{FTLA}_{C_v\_fase}(\omega) := \frac{180}{\pi} \cdot \arg(\text{FTLA}_{C_v}(\omega))$$

Figura 10 -  $\text{FTLA}_{C_v\_mod}$  em vermelho e  $\text{FTLA}_{C_v\_fase}$  em azul.

## APÊNDICE C

### Planilha para calcular os componentes do PI ou o PI com filtro a partir do PI básico (do PSIM)

$$f := 1, 2, \dots, 100000 \quad j := \sqrt{-1} \quad \hat{s}(f) := j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f$$

#### Estrutura - PI com filtro

Parâmetros do PI:

$$K_{pi} := 0.268 \quad T_{pi} := 0.023$$

$$H_{pi}(f) := K_{pi} \frac{1 + s(f) \cdot T_{pi}}{s(f) \cdot T_{pi}}$$

Componentes: PI (C1=0) ou PI com Filtro

$$R_1 := 100000$$

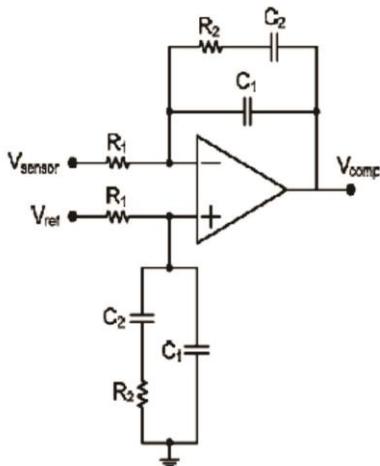
$$R_2 := R_1 \cdot K_{pi} = 2.68 \times 10^4$$

$$R_2 C_2 = T_{pi}$$

$$C_2 := \frac{T_{pi}}{R_2} = 8.582 \times 10^{-7}$$

$$f_{pf} := 10000$$

$$C_1 := \frac{1}{\left(2 \cdot \pi \cdot f_{pf} \cdot R_2 + \frac{1}{C_2}\right)} = 5.935 \times 10^{-10}$$



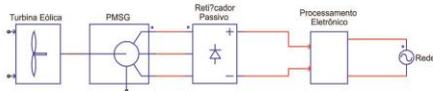
$$H(s) = \frac{s \cdot R_2 \cdot C_2 + 1}{s \cdot R_1 \cdot (s \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 + C_1 + C_2)}$$

## APÊNDICE D

### Conexão com a rede de Turbinas Eólicas de Baixa Potência

Orientador: Telles Lazzarin, Dr Co - orientador: Ivo Barbi, Dr. Ing  
Mestrando: Rafael Henrique Eckstein

Florianópolis - 2013/14



#### Dados Turbina Eólica

Fabricante: Enersud

Modelo: Gerar 248 - 1kW

Diâmetro da hélice

$R_g = 2,46$

Potência a 12m/s - 1000W

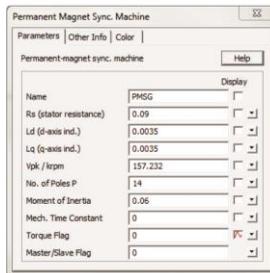
Rpm a 12m/s - 630 rpm

Número de Pás - 3

Velocidade de Partida - 2,2m/s

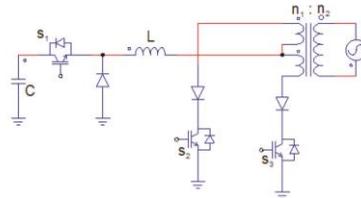
Controle de Velocidade - Stall

#### Dados PMSG



#### Dados Processamento Eletrônico

O bloco Processamento Eletrônico é formado por um conversor Buck em série com um inversor do tipo Push-Pull alimentado em corrente. O esquema está apresentado na figura abaixo.

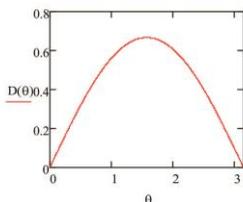


## Parâmetros do Sistema

|   |   |
|---|---|
| Frequência de chaveamento                   | $f_s := 24\text{kHz}$                                   |
| Frequência da rede                          | $f_{\text{rede}} := 60\text{Hz}$                        |
| Tensão de entrada                           | $V_c := 70\text{V}$                                     |
| Tensão eficaz da rede                       | $V_{\text{ef, rede}} := 220\text{V}$                    |
| Tensão de pico da rede                      | $V_p := \sqrt{2} V_{\text{ef, rede}} = 311.127\text{V}$ |
| Relação de transformação                    | $a := 0.15$   |
| Tensão de pico no primário do transformador | $V_{0p} := V_p \cdot a = 46.669\text{V}$                |
| Tensão eficaz no primário do transformador  | $V_o := \frac{V_{0p}}{\sqrt{2}} = 33\text{V}$           |
| Potência Máxima de saída                    | $P_o := 1000\text{W}$                                   |
| Corrente eficaz de saída                    | $I_o := \frac{P_o}{V_o} = 30.303\text{A}$               |
| Corrente de pico de saída                   | $I_{0p} := I_o \sqrt{2} = 42.855\text{A}$               |
| Ondulação de corrente no indutor            | $\Delta i_l := 0.05 I_o = 1.515\text{A}$                |

## Ganho Estático

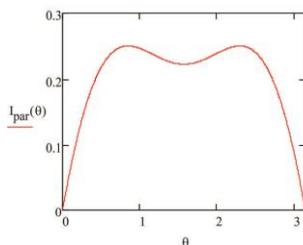
$$D(\theta) := \frac{V_{0p} \cdot \sin(\theta)}{V_c}$$



$$D_w := D\left(\frac{\pi}{4}\right) = 0.471$$

## Corrente Parametrizada

$$I_{\text{par}}(\theta) := \frac{V_{0p} \cdot \sin(\theta)}{V_c} - \left(\frac{V_{0p} \cdot \sin(\theta)}{V_c}\right)^2$$



### **Cálculo Indutor**

$$i_L(\theta) := \frac{V_{0p} \sin(\theta)}{I_s \Delta_{il}} \left( 1 - \frac{V_{0p} \sin(\theta)}{V_c} \right)$$

### **Dados Indutor**

$$i_L(\theta) := I_{0p} \sin(\theta)$$

Corrente Máxima

$$I_{0p} := I_{0p} = 42.855A$$

$$I_{projeto} := I_{0p} + 0.1 I_{0p} = 47.14A$$

Corrente Média

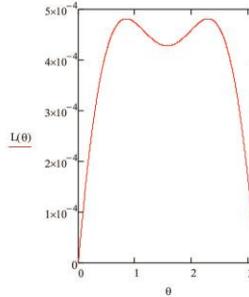
$$I_{m} := \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{0p} \sin(\theta) d\theta = 27.282A$$

Corrente Eficaz

$$I_{ef} := I_0 = 30.303A$$

Tensão máxima VL

$$V_c - a \cdot V_p \sin(\theta) = 70V$$



Indutância Crítica

$$L \left( \frac{\pi}{4} \right) = 4.797 \times 10^{-4} H$$

$$L := L \left( \frac{\pi}{4} \right) = 4.797 \times 10^{-4} H$$

### **Parâmetros Transformador**

Obs: Transformador composto por três enrolamentos 2 primários e um secundário. (Secundário conectado a rede elétrica).

|                                 |
|---------------------------------|
| Potência Processada = 1200W     |
| Tensão Eficaz Secundário = 220V |
| Tensão Eficaz Primário = 33V    |
| Frequência = 60Hz               |

### **Esforços nos Semicondutores**

#### **Interrupitor Buck**

Corrente Média

$$I_{smed} := \frac{I_{0p} V_{0p}}{\pi \cdot V_c} \int_0^{\pi} \sin(\theta)^2 d\theta = 14.286A$$

Corrente Eficaz

$$I_s := \frac{I_{0p} \sqrt{V_{0p}}}{\sqrt{V_c} \sqrt{\pi}} \int_0^{\pi} \sin(\theta)^3 d\theta = 22.796A$$

Corrente de Pico

$$I_{spico} := I_{0p} = 42.855A$$

Tensão Máxima em cima do interruptor Buck é a Tensão máxima do Barramento CC.  $V_i = 70V + 7V + MargemSegurança = 85V$

## Diodo Roda Livre

$$I_d(\theta) := I_{o_p} \cdot \sin(\theta) - \frac{I_{o_p} \cdot V_{o_p}}{V_c} \cdot \sin(\theta)^2$$

### Corrente Média

$$I_{d_{med}} := \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} I_d(\theta) d\theta = 12.997A$$

### Corrente Eficaz

$$I_{d_{rms}} := \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \left( \sqrt{1 - \frac{V_{o_p}}{V_c} \sin(\theta)} \right)^2 \cdot I_{o_p}^2 \cdot \sin(\theta)^2 d\theta} = 19.965A$$

Tensão Máxima em cima do diodo é a Tensão do Barramento CC de entrada.  $V_d = 70V + ?V$   
+ MargemSegurança = 85V

## Interruptores Push-Pull

### Corrente Média

$$I_{s1_{med}} := \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} I_{o_p} \cdot \sin(\theta) d\theta = 13.641A$$

### Corrente Eficaz

$$I_{s1_{rms}} := \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} I_{o_p}^2 \cdot \sin(\theta)^2 d\theta} = 21.427A$$

### Corrente de Pico

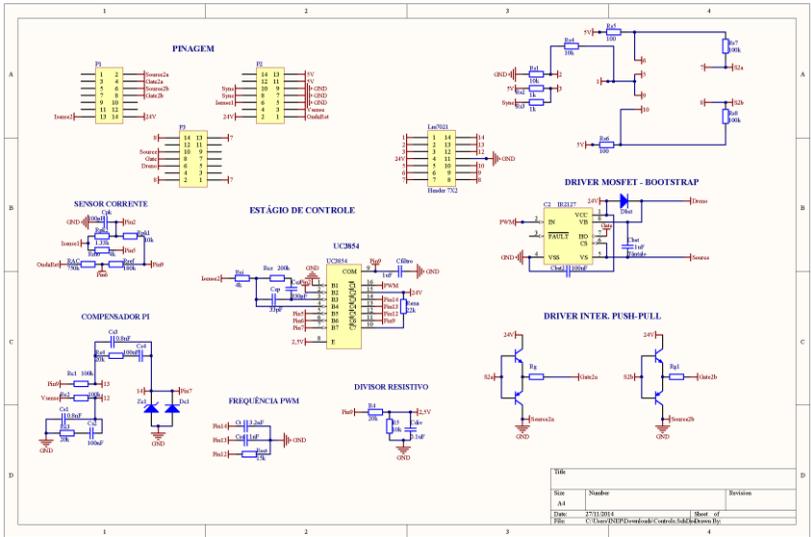
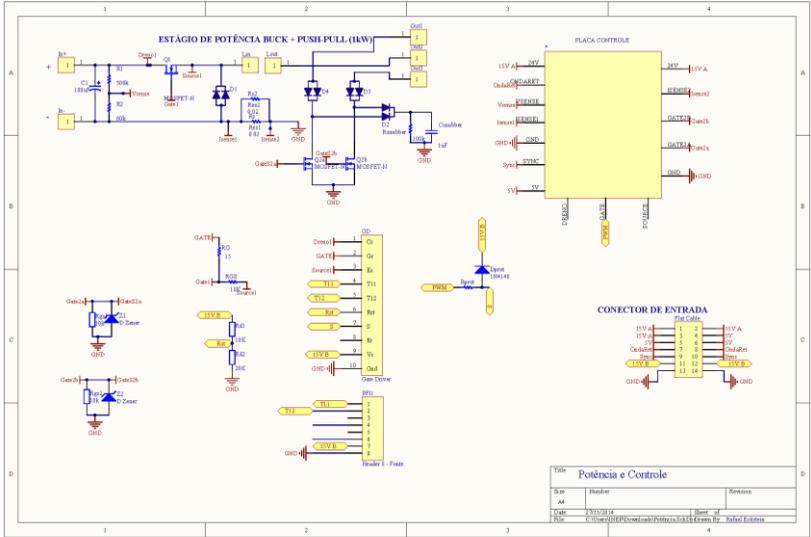
$$I_{s1_{pico}} := I_{o_p} = 42.855A$$

$$V_{push} := 2 \cdot V_{o_p} = 93.338V$$

Frequencia de operação: 60 Hz

Tensão Máxima em cima de cada interruptor é igual a duas vezes a tensão de pico do primário do transformador

# APÊNDICE E



## APÊNDICE F

### CÁLCULO DAS PERDAS

#### Interruptor Buck

##### Dados Projeto

$$\begin{aligned} f_s &:= 24\text{kHz} \\ I_{s\text{med}} &:= 14,28\text{A} \\ I_s &:= 22,796\text{A} \end{aligned}$$

##### Dados Interruptor

$$\begin{aligned} r_{ds} &:= 7 \times 10^{-3}\Omega & I_q &:= 100\text{A} & V_{s\text{max}} &:= 77\text{V} \\ t_r &:= 14\text{ns} & t_f &:= 59\text{ns} & V_{ds} &:= 150\text{V} \\ T_a &:= 125\text{K} & T_j &:= 140\text{K} & R_{thjc} &:= 0,5\frac{\text{K}}{\text{W}} \end{aligned}$$

##### Perdas de condução

$$P_{s\text{cond}} := I_s^2 \cdot r_{ds} = 3,638\text{W}$$

##### Perdas de comutação

$$P_{s\text{com}} := \frac{f_s}{2} \cdot I_{s\text{med}} \cdot V_{s\text{max}} \cdot (t_r + t_f) = 0,964\text{W}$$

##### Perdas Totais no MOSFET - Buck

$$P_{s\text{total1}} := P_{s\text{cond}} + P_{s\text{com}} = 4,601\text{W}$$

#### Diodo Roda Livre

##### Dados Projeto

$$\begin{aligned} I_{d\text{med}} &:= 12,997\text{A} \\ I_{d\text{rms}} &:= 19,965\text{A} \end{aligned}$$

##### Dados Diodo

$$\begin{aligned} V_{f\text{max}} &:= 120\text{mV} & V_{d\text{max}} &:= 77\text{V} & t_s &:= 50\text{ns} \\ V_{f\text{max}} &:= 0,68\text{V} & I_{f\text{max}} &:= 13\text{A} \\ I_{gq} &:= 0 & Q_{rr} &:= 50\text{nC} \end{aligned}$$

##### Perdas de condução

$$P_{d\text{cond}} := V_{f\text{max}} \cdot I_{d\text{med}} + r_d \cdot I_{d\text{rms}}^2 = 8,838\text{W}$$

##### Perdas de comutação

$$P_{d\text{com}} := Q_{rr} \cdot V_{d\text{max}} \cdot f_s = 0,092\text{W}$$

##### Perdas Totais - Diodo

$$P_{d\text{total}} := P_{d\text{cond}} + P_{d\text{com}} = 8,93\text{W}$$

#### Interruptores Push-Pull

##### Dados Projeto

$$\begin{aligned} I_{s1\text{med}} &:= 13,641\text{A} \\ I_{s1\text{rms}} &:= 21,427\text{A} \\ f_{\text{rede}} &:= 60\text{Hz} \end{aligned}$$

##### Dados Interruptor

$$\begin{aligned} r_{ds} &:= 7 \times 10^{-3}\Omega & I_d &:= 56\text{A} & V_{s\text{max}} &:= 112\text{V} \\ t_{f\text{rede}} &:= 4\text{ns} & t_{rr} &:= 9\text{ns} & V_{ds\text{max}} &:= 120\text{V} \end{aligned}$$

##### Perdas de condução

$$P_{s1\text{cond}} := I_{s1\text{rms}}^2 \cdot r_{ds} = 3,214\text{W}$$

##### Perdas de comutação

$$P_{s1\text{com}} := \frac{f_{\text{rede}}}{2} \cdot I_{s1\text{rms}} \cdot V_{s\text{max}} \cdot (t_r + t_f) = 9,359 \times 10^{-4}\text{W}$$

##### Perdas Totais - Interruptor Push-Pull

$$P_{s\text{total}} := P_{s\text{cond}} + P_{s\text{com}} = 3,215\text{W}$$

## Diodos Push-Pull

### *Dados Diodo*

$$\begin{aligned} V_{r_{\max}} &:= 1200\text{V} & V_{d_{\max}} &:= 77\text{V} & t_{\text{rec}} &:= 50\text{ns} \\ V_{f_{\max}} &:= 0.68\text{V} & I_{f_{\max}} &:= 13\text{A} \\ Q_{\text{rr}} &:= 0 & Q_{\text{rrv}} &:= 50\text{nC} \end{aligned}$$

#### Perdas de condução

$$P_{d_{\text{cond}}} := V_{f_{\max}} I_{s1_{\text{med}}} + r_{d1} I_{s1_{\text{rms}}}^2 = 9.276\text{W}$$

#### Perdas de comutação

$$P_{d_{\text{com}}} := Q_{\text{rr}} V_{d_{\max}} f_{\text{rede}} = 2.31 \times 10^{-4}\text{W}$$

#### Perdas Totais - Diodo

$$P_{d_{\text{total}}} := P_{d_{\text{cond}}} + P_{d_{\text{com}}} = 9.276\text{W}$$

## Circuito Graptheador

### *Dados Projeto*

$$R_{\text{snb}} := 100\text{k}\Omega$$

$$V_{\text{snb}} := 100\text{V}$$

#### Perdas de condução - Snubber

$$P_{\text{cond}} := \frac{V_{\text{snb}}^2}{R_{\text{snb}}} = 0.1\text{W}$$

## Resistor Shunt

### *Dados Projeto*

$$R_{\text{S}} := 0.02\Omega$$

$$I_{\text{Lrms}} := 30.303\text{A}$$

#### Perdas de condução - Shunt

$$P_{\text{shunt}} := R_{\text{S}} I_{\text{Lrms}}^2 = 18.365\text{W}$$

## Indutor

$$R_{\text{L}} := 0.01033\Omega$$

$$I_{\text{Lrms}} := 30.303\text{A}$$

#### Perdas de condução - Indutor

$$P_{\text{L}} := R_{\text{L}} I_{\text{Lrms}}^2 = 9.486\text{W}$$

## APÊNDICE G

# Proposed power and control system for Small Scale Wind Turbines connected to the Grid

Rafael H. Eckstein, Telles B. Lazzarin, *IEEE, Member* and Ivo Barbi, *IEEE, Fellow Member*

Federal University of Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, BRAZIL

eckstein.rafael@gmail.com

telles@inep.ufsc.br

ivobarbi@inep.ufsc.br

**Keywords:** Grid connection, MPPT control, robust system, Small wind turbine.

### Abstract

Currently, low power wind system is an important research topic, it has a large socioeconomic appeal, because it is a renewable, clean, sustainable and alternative source of electric energy. The electricity production by low power wind systems can be implemented in several places, such as homes, telecommunications towers, oil rigs, schools and rural clinics with a good profitability over time. However, the popularization of renewable energy in low scale depends on new solutions to provide simple, robust and cost-effective systems. Aiming this scenario, this paper proposes a system that enables the connection between small wind turbines and the mains, based on a passive rectifier, DC-DC buck converter and push-pull inverter. The proposed system was analysed, designed and verified for a 1kW small wind turbine.

### Introduction

Wind energy can already be considered a consolidated renewable source to produce electrical energy, due to its advances in recent decades in researches, publications, products and, mainly, practical applications [1,4]. Truth be told, this consolidation has happened based on the deployment of large wind farms, in which hundreds of megabytes have been processed. However, currently, many studies are being conducted to develop technologies for the greater use of small wind turbines to generate electricity [2,3].

One of the great advantages of small wind turbines is the possibility of employing them in urban centers [10], where the wind has lower speed and greater turbulence.

Low-power wind turbines are usually connected to battery banks or directly to the electricity grid. One of the biggest drawbacks to connect the wind generator to battery banks is the total volume of the system, very often leaving this type of connection unfeasible. Therefore, connection of small wind turbines into the electric grid has become a subject of much academic interest [11].

According to the literature [5], there are three usual electronic systems used to connect small wind turbines into the mains. The first and most simple configuration can be seen in Figure 1. The system consists of a passive rectifier connected to an inverter. This topology presents the

advantage of being extremely simple, although a very low efficiency [13].

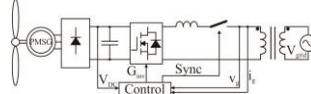


Figure 1: Passive Rectifier + Inverter.

The second most usual configuration [5] is composed of a rectifier diode, a DC-DC converter and an inverter. The greater advantage is the cost benefit between ease of implementation and the final system performance. Usually in such systems the MPPT control is done by the DC-DC converter switch and the inverter has the function of protection and synchronization with the grid [12]. The topology can be seen in Figure 2.

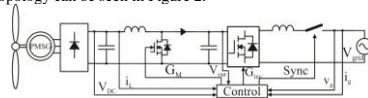


Figure 2: Passive Rectifier + DC-DC Converter + Inverter.

The third most common setting is shown in Figure 3. The system consists of a back-to-back converter. The biggest advantage of using this topology is the low distortion output current of the generator. However, this configuration is much more complex than the others presented. Generally this topology is used for higher powers.

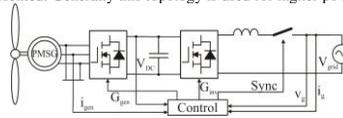


Figure 3: Back-to-back.

This paper proposes a power electronic system for grid connected small wind turbines, 1kW 220V@60Hz, which is simple, robust and cheap. It can be used in

telecommunication systems, houses, farms, energy storage system and others applications, where renewable energy generation in small scale is interesting.

### Proposed System

The paper proposed system can be seen in Figure 4. The topology consists of a passive rectifier, a converter DC-DC buck and a push pull inverter. A commercial low frequency transformer is present for galvanic isolation.

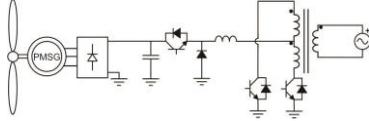


Figure 4: Proposed System.

The system is being designed to process 1 kW in rated power. The turbine studied has been constructed for use in urban settings, in which the wind has greater turbulence.

### Passive rectifier

A passive rectifier was placed at the output of the generator in order to convert the ac output voltage of the turbine in a dc voltage. Thus the generator can work at variable frequency and operate in a range close to the maximum efficiency. This strategy is suitable for small wind turbines.

The passive rectifier employed in the project is better known as the Graetz Bridge. The choice was given because it is an extremely simple and robust component [6], [7], [14]. It should also be noted that due to the high inductance of the generator, the current distortion is low even with the use of the diode rectifier.

### 2.2 Buck converter DC-DC

The buck converter has two functions: the first one is to control the dc (rectifier output) bus and extract the maximum power from the generator; the second is to control the current injected into the inverter, which must be a current in a sinusoidal wave rectified format.

The choice of a DC-DC buck converter, lies in the fact that for low power applications some advantages are presents as: (i) it works at lower voltage across the semiconductors; (ii) it can be used a simple control technique; (iii) the switch in a direct path between the generator and the grid enables the safer circuit disconnection; (iv) its voltage input characteristic facilitates the MPPT control; (v) its current output characteristics provides simplicity for the inverter and (vi) only one capacitor bank is necessary in the whole system.

### 2.3 Push-Pull inverter

The inverter functions are defined as: (i) to invert the current of the buck converter and; (ii) to isolate the system and inject a current into the grid. As the current already has the form of a rectified sine wave, the converter's function is to invert the current every half period of the mains. Thus, it operates in open loop, with switching synchronized with the grid and frequency of 60 Hz.

Regarding the push pull inverter, its advantages are: (i) low switching frequency, which reduces the switching loss in the semiconductors; (ii) one switch is turned ON in the positive period of electrical grid and another the negative period, thus the synchronism with electrical grid is easy [8]; (iii) the transformer also provides isolation to the system; (iv) the transformer is designed to operate at 60Hz guarantying

robustness to the system.

### Control

The MPPT technique is made through the buck converter switch, regulating the voltage on the DC bus. The MPPT technique ensures that the generator works at maximum power or close to it. At the same switch there is a current loop control, which controls the inductor current and thus the power factor could be delivered as close to the unit.

### 3 Principle of Operation

Initially, the analysis of the topological stages will be presented with the operating system when the grid is in the positive half cycle and, after, with the negative half cycle. During both cycles, the DC-DC buck converter operates in continuous conduction mode with a switching frequency in the order of kilohertz. The push-pull inverter also works in continuous conduction mode, but with a frequency equal to the mains, 60 Hz.

Therefore, two-topological states for each half cycle of the grid will be displayed.

#### 3.1 DC-DC Buck converter operation – positive half cycle.

##### Topological Stage with Switch s1 ON

In this mode the switch of DC-DC buck converter is conducting, current flows from the turbine to the inductor, characterizing the energy storage phase. Being the grid in positive half cycle the switch s2a is conducting, while s2b is not. This state has its end when the switch is switched off, interrupting the current that passed through this, turning the free wheel diode on.

##### Topological Stage with Switch s1 OFF

In the end of the previous stage, start this new stage, in which the input source (Wind Generator Rectifier + Capacitive Bank) is disconnected from the mains power. Meanwhile the energy stored in the inductor is delivered to the grid through the free wheel diode. The switch s2a is current on, because it is still the positive half cycle. This stage ends when the operation switch s1 is turned on again. The two operating stages are shown in Figure 5.

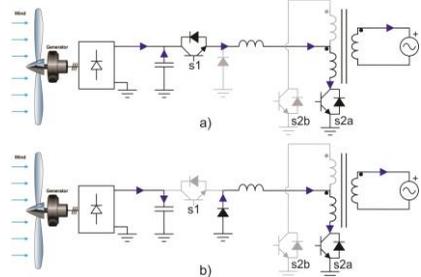


Figure 5: Topological stages in positive half cycle.

a) buck switch, s1, on; b) buck switch, s1, off.

### 3.2 DC-DC Buck converter operation – negative half cycle.

During the negative half cycle of the mains, again two topological stages are obtained. One in which the input source is sending power to the grid (switch s1 on) and another where the wind turbine will be disconnected from the grid (switch s1 off). The only difference between the negative and positive half cycle is the push-pull switch that is turned on. In this half switch s2b is on. Figure 6 shows the two stages.

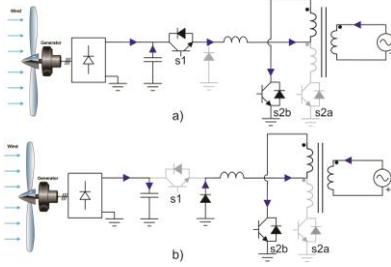


Figure 6: Topological stages in negative half cycle.

a) buck switch, s1, on; b) buck switch, s1, off.

## 4 Quantitative Analysis of Operating

### 4.1 Duty Cycle

The duty cycle of the buck converter can be calculated by varying the inductor current for a switching period. Figure 7 shows the equivalent circuit, which can be used to calculate the static gain.

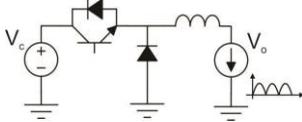


Figure 7: Equivalent Circuit.

In Figure 7, when the switch is conducting the voltage over the inductor multiplied by the conduction time is given by:

$$V_L = (V_c - V_o) \cdot D \cdot T_s, \quad (1)$$

and when the switch is locked it has:

$$V_L = V_o \cdot (1 - D) \cdot T_s. \quad (2)$$

For a period of switching the average voltage across the inductor is zero, then:

$$(V_c - V_o) \cdot D \cdot T_s = V_o \cdot (1 - D) \cdot T_s, \quad (3)$$

however, the output voltage is sinusoidal, ie:

$$V_o = V_p \cdot \text{sen}\theta, \quad (4)$$

substituting (4) into (3) and isolating  $D$ ,

$$D(\theta) = \frac{V_p \cdot \text{sen}\theta}{V_c} \quad (5)$$

### 4.2 Stress in semiconductors

The theoretical waveform of the current in the inductor is shown in Figure 8. Thus, the equation of the inductor current is given by:

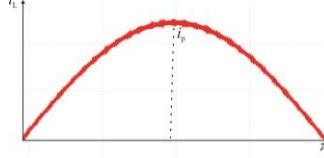


Figure 8: Inductor current waveform.

$$i_L(\theta) = I_p \cdot \text{sen}\theta \quad (6)$$

Since  $i_p$  is calculated as follows:

$$P_o = \frac{V_p \cdot I_p}{2} \rightarrow I_p = \frac{2P_o}{V_p}, \quad (7)$$

where,  $P_o$  is the output power and  $V_p$  is the peak voltage on the transformer primary.

Knowing the inductor current, the rms current in the buck switch and the average current in the freewheeling diode are expressed by:

$$I_{s_{rms}} = \frac{I_p \cdot \sqrt{V_p}}{\sqrt{V_c} \cdot \sqrt{\pi}} \sqrt{\int_0^\pi \sin^3(\theta) d\theta} \quad (8)$$

$$I_{d_{avg}} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left[ I_p \cdot \sin(\theta) - \frac{I_p \cdot V_p}{V_c} \cdot \sin^2(\theta) \right] d\theta$$

### 4.3 DC-Link

The choice of the dc-link capacitance is fundamental for the system to operate at a great level. The 120 Hz component coming from the rectifier power grid has great influence on the whole system and the DC-link must absorb as much as possible from the component. So the total capacitance required is defined by (10).

$$C_o = \frac{P_o}{4\pi \cdot f_{grid} \cdot \Delta V_c \cdot V_c}, \quad (10)$$

where,  $\Delta V_c$  is the voltage ripple and  $f_{grid}$  is the grid frequency.

### 4.4 Control

The control system designed as previously stated, has two control loops. Figure 9 shows the block diagram.

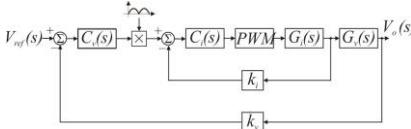


Figure 9: Block diagram.

The transfer function of the inductor current is defined by,

$$\frac{\Delta_{iL}}{\Delta_d} = \frac{V_c}{s \cdot L} \tag{11}$$

and transfer function of the capacitor voltage is given by,

$$\frac{\Delta_{Vc}}{\Delta_{iL}} = \frac{-D}{s \cdot C} \tag{12}$$

5 Design example

5.1 Design specification

Design specification for the verification of proposed system can be seen in Table 1.

| Parameter                                | Value  |
|--|--------|
| Nominal Power                            | 1000 W |
| Output Voltage (rms)                     | 220 V  |
| Voltage on the Transformer Primary (rms) | 33 V   |
| DC-Link Voltage                          | 70 V   |
| Grid Frequency                           | 60 Hz  |
| Current Ripple                           | 5%     |

Table 1: Design specification

5.2 Turbine

The turbine used in this work is the GERAR 246, manufactured by Enersud (a Brazilian company). The wind turbine has a nominal power of 1000 W, with the wind speed at 12 m/s. The turbine has a horizontal axis and three blades. The cut-in speed is 2.2 m/s. Further information can be found in [9].

5.3 Duty Cycle

The duty cycle for the system was calculated with (5) and is shown in Figure 10.

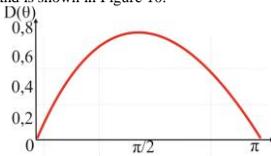


Figure 10: Duty Cycle.

The transformer conversion ratio was chosen in order that the buck converter could operate safely with a 70 V input. To choose a suitable value of the transformation ratio, first was defined a maximum ripple in the input voltage and then was chosen the primary voltage of the transformer.

By setting the maximum ripple on the input voltage, and through (10) the capacitance required for the DC link was calculated.

5.4 MPPT Control

The studied turbine has a particular behavior that makes the system very robust. For different wind speeds, one bus voltage from 60 V to 80 V ensures that the system is operating at maximum power or close to it. Then it was decided to use a control with fixed reference, 70 V. The Figure 11 shows the behavior of the turbine for different wind speeds.

The MPPT technique is made through the buck converter switch, regulating the voltage on the DC bus.

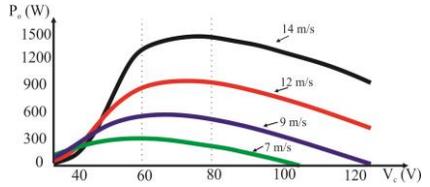


Figure 11: Output power x DC-Link voltage.

Table 2 and Table 3 show the components used to implement prototype and a comparison between the values of Calculated and simulated parameters respectively.

| Component          | Part-Number    |
|--------------------|----------------|
| Passive Rectifier  | 36MT20         |
| Diodes – Buck      | V80170PW-M3/4W |
| Diodes – Push Pull | DSA90C200 HB   |
| Switches           | FQA62N25C      |
| Transformer        | 220V/33V/60 Hz |
| Inductor           | 0.5 mH         |
| DC-Link            | 2068 uF        |
| Controller         | UC3854         |
| Driver Bootstrap   | IR2127SPBF     |

Table 2: Components used in the prototype.

6 Simulation results

6.1 Complete system

The system has been fully implemented and simulated in PSIM software. Those simulations were made with constant and variable wind speed. **Erro! Fonte de referência não encontrada.** shows the simulated topology.

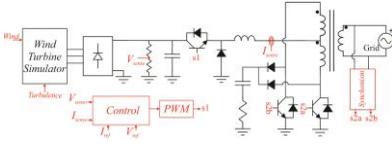


Figure 12: Simulated System.

|            | tical | Theore | ated | Simul |
|------------|-------|--------|------|-------|
| $V_c$      |       | 70 V   |      | 72 V  |
| $\Delta V$ |       | 10 V   |      | 10.5  |
| $c$        |       |        |      | V     |
| $I_{pk}$   |       | 42 A   |      | 43 A  |
| $D_m$      |       | 0.667  |      | 0.65  |
| $ax$       |       |        |      |       |
| $I_{grid}$ |       | 6.4 A  |      | 6.5 A |
| $P_{O_n}$  |       | 1000   |      | 1010  |
| $om$       |       | W      |      | W     |

Table 3: Theoretical and simulated parameters.

**6.2 Steady-state**

Figure 13 shows the dc-link voltage for a fixed wind speed. It shows the existence of a component of 120 Hz in the waveform. This component was only limited to the converter always runs smoothly for the most critical levels of the grid. In Figure 14 the waveform of the current and voltage at the output of the system are plotted. The power factor is close to unity, validating the control used. The simulated wind speed was 10,5 m/s.

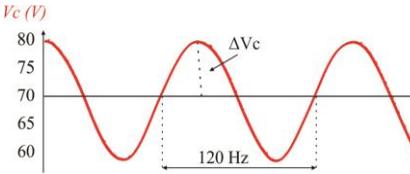


Figure 13: Simulation results: DC-Link voltage.

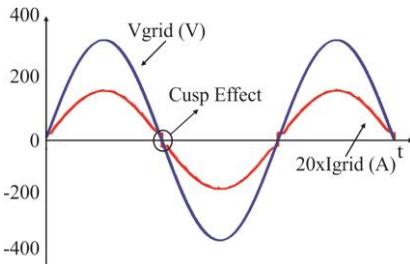


Figure 14: Simulation results: output current and voltage.

The control signals of both the current loop and the voltage loop can be seen in Figure 15 and Figure 16, respectively.

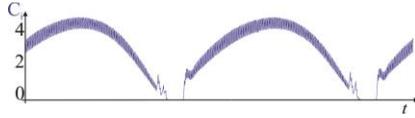


Figure 15: Simulation results:current control.

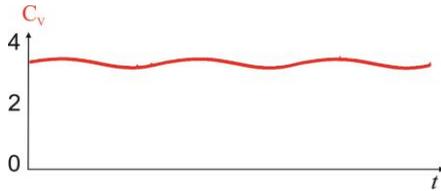


Figure 16: Simulation results: voltage control.

**6.3 Dynamic simulation**

A simulation with changing wind speed was also made. In the simulation the wind speed increases according to a ramp, as can be seen in Figure 17. The Figure 18 shows the dc-link voltage is regulated in 70 V, with a component of alternating current with 120 Hz around 7% when the output power is 700 W and 10% when the system power is nominal, as designed. Figure 19 presents the current injected into the grid, which increase when wind turbine supplies more active power. Its THD is low (less than 5%), throughout operation range.

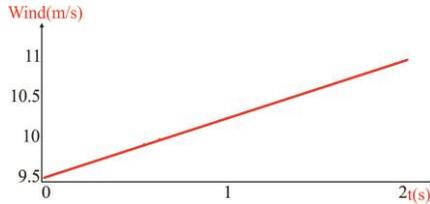


Figure 17: Wind speed.

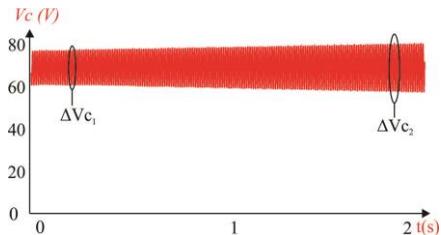


Figure 18: DC-Link voltage.

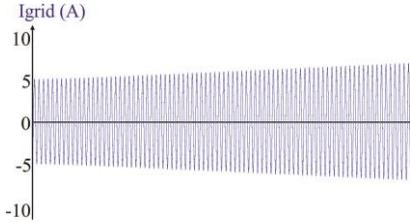


Figure 19: Output current.

7

### Conclusions

A new system for connecting small wind turbines was proposed in this paper. The system consists of a passive rectifier, a DC-DC buck converter, a push-pull inverter with current input and two control loops: one that ensures the MPPT voltage and another that ensures the injection of a sinusoidal current into the power grid.

The proposed system has the following advantages: the buck DC-DC converter that facilitates both the control input voltage and control of the current in the inductor; the push-pull inverter fed in current, switching at 60 Hz and isolating the system; it is only used one capacitor bank; and the control system can be done with a commercial IC 3854.

With all these features the system is simple and suitable for the connection of small wind turbines to the electricity grid, which is a booming area in Brazil and worldwide.

Protection issues, especially on islanding, are fundamentally important for systems of this magnitude. However, this work will not be covered.

### Acknowledgements

The Authors would like to thank the MCTI and the CNPq by financial support through the process.

### References

- [1] W. Yang , P. J. Tavner , C. J. Crabtree and M. Wilkinson "Cost-effective condition monitoring for wind turbines", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp.263 -271 2010.
- [2] Sunderland, K, Feely, R, Mills, G & Conlon, M 2011, 'Observation of the wind resource across the Dublin area', *Universities Power Eng. Conf. (UPEC). Proceedings of 2011 46th Int., Dublin.*
- [3] A. Stabile , A. J. Marques Cardoso and C. Boccaletti "Efficiency analysis of power converters for urban wind turbine applications", *Conf. Rec. 2nd Sustain. Energy Technol.*, pp.1 -6 2010.
- [4] F. Blaabjerg, K. Man, "Future on power electronics for wind turbine systems" *IEEE of Emerging and Selected Topics in Power Electron.*, 1(3),pp.139-152.
- [5] I. Kortabarria, E. Ibarra, and I.D. Alegria, "Power converters used in grid connected small wind turbines: Analysis of Alternatives," *5th IET Int. Conf. on Power Electron., Machines and Drives (PEMD 2010)*, 2010.
- [6] Y. Wang and S. Hu, "Design and research of an inverter for a small wind power generation system," in *Proc. ICACI, 2012*, pp. 937-940.
- [7] J.L.Li and H.H. Xu, *Power electronics converters in wind power technology*, Beijing, Mechanical Ind. Press, 2008, pp. 61-64.
- [8] N. A. Orlando , M. Liserre , V. G. Monopoli , R. A. Mastromauro and A. Dell'Aquila, "Comparison of power converter topologies for permanent magnet small wind turbine system", *Proc. Int. Symp. Ind. Electron.*, pp.2359 -2364 2008.
- [9] Enersud, "GERAR 246 wind turbine." [Online]. Available: [www.enersud.com.br](http://www.enersud.com.br)
- [10] De Broe, A.M. and all; "A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications" *Energy Convers., IEEE Trans. on*, volume: 14, Issue: 4, Dec. 1999, pages: 1630-1635.
- [11] N. A. Orlando , M. Liserre, R. A. Mastromauro and A. Dell'Aquila, "A survey of control issues in pmsg-based small wind-turbine systems", *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, no. 3, pp.1211 -1221 2013.
- [12] Y. Wang, C. Nayar, J. Su and M. Ding, "Control and interfacing of a grid-connected small-scale wind turbine generator", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 26, no. 2, pp.428 - 434 2011.
- [13] R. Teodorescu and F. Blaabjerg, "Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp.660 -670 2007.
- [14] Z. M. Dalala , Z. Zahid , W. Yu , Y. Cho and J. S. Lai "Design and analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp.756 -767 2013.