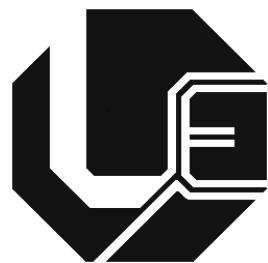


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**



**Uma proposta laboratorial para estudos  
de desempenho de unidades eólicas no  
contexto da qualidade de energia**

**Elias Barbosa de Alvarenga**

**Uberlândia  
2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
***FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA***  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

**Uma proposta laboratorial para estudos de desempenho de unidades eólicas no contexto da qualidade de energia**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a Banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

**BANCA EXAMINADORA:**

**José Carlos de Oliveira, PhD – UFU (Orientador)**

**José Rubens Macedo Jr, Dr - UFU**

**Ivan Nunes Santos, Dr - UFU**

**Fernando Luiz Marcelo Antunes, PhD - UFC**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

---

A473p Alvarenga, Elias Barbosa de, 1985-  
2012      Uma proposta laboratorial para estudos de desempenho de unidades eólicas no contexto da qualidade de energia / Elias Barbosa de Alvarenga. - 2012.  
                  174 p. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia eólica - Teses. 3. Energia elétrica - Controle de qualidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de, 1947- II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

---

CDU: 621.3

UMA PROPOSTA LABORATORIAL PARA ESTUDOS DE  
DESEMPENHO DE UNIDADES EÓLICAS NO CONTEXTO  
DA QUALIDADE DE ENERGIA

**Elias Barbosa de Alvarenga**

Dissertação apresentada por Elias Barbosa de Alvarenga à  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências.

---

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D.  
(Orientador) – UFU

---

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus estimados pais, Osmilton e Ivani, à minha irmã Virgínia e a todos meus amigos que me acompanham e torcem por mim.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** que sempre me acompanha e me ilumina em todos os momentos da minha vida.

À minha **família e amigos**, em especial ao meu pai **Osmilton Aleixo de Alvarenga**, à minha mãe **Ivani Rodrigues Barbosa**, a minha irmã **Virgínia Barbosa de Alvarenga** por sempre estarem do meu lado me ajudando e incentivando em todas as minhas decisões.

Em especial, expresso meus sinceros agradecimentos ao meu professor orientador **José Carlos de Oliveira** por todo incentivo, colaboração, amizade, confiança e constantes ensinamentos, essenciais à concretização desta meta.

Aos amigos da universidade **Arthur Fernando Bonelli, Guilherme Leal Xavier, Rafael Martins, Alex Reis, Fabricio Parra Santilio, Ivan Nunes Santos, Fernanda Hein da Costa, Loana Nunes Velasco, Isaque Nogueira Gondim, João Areis Ferreira Barbosa Júnior, Daniel Caixeta, Gislene Lima, Leandro Vitor Leffort, Geovane, Juliano Henrique Faria**, pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe.

Aos professores **Geraldo Caixeta Guimarães, Luciano Coutinho Gomes, José Rubens Macedo Júnior, Luiz Carlos Gomes de Freitas, José Wilson Resende, Marcelo Lynce Ribeiro Chaves, Antônio Carlos Delaiba, Kleiber David Rodrigues e Milton Itsuo Samesima** pela amizade e auxílio mediante aos conhecimentos transmitidos.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU**, através de seus **professores e funcionários**, pela oportunidade de crescimento profissional e aprendizado. À **Marli, Cinara, José Maria, Kátia, Rubens e Carlos** pela presteza nos encaminhamentos dos

assuntos vinculados com a secretaria da Pós-Graduação, bem como aqueles envolvidos com projetos de pesquisa.

A **Furnas** por ter financiado o projeto através do programa de P&D da empresa.

Ao **CNPq** por ter concedido suporte financeiro a esta pesquisa.

# RESUMO

Em uma época em que se discute amplamente a questão ambiental e, por outro lado, as necessidades impostas pelas demandas de energia, intensificam-se a importância e o papel das fontes renováveis de energia. Entre elas, destaca-se a produzida a partir dos ventos (eólica), estratégia esta que vem se mostrando, a cada dia, mais competitiva e atrativa. Devido às características dinâmicas inerentes aos ventos, somado ao fato que distintas concepções podem ser utilizadas para a transformação da energia mecânica em elétrica, neste sentido a interação entre os parques eólicos e respectivas redes de conexão se apresenta como uma área de grandes interesses investigativos. De fato, as questões atreladas com o atendimento aos indicadores de qualidade da energia e os desempenhos dinâmicos dos complexos, nos termos impostos pelos agentes reguladores, passaram a ser considerados como desafios para que as conexões sejam realizadas de modo satisfatórias entre as partes. Diante disto, o presente trabalho encontra-se direcionado para a definição de uma estrutura física para a representação laboratorial, em escala reduzida, de um complexo eólico típico, visando, sobretudo, a realização de ensaios focados em fenômenos afins com os indicadores de qualidade da energia. Com este objetivo em mente, a presente dissertação contempla resultados de esforços conduzidos para a concepção física de um laboratório em escala reduzida, o estabelecimento da estrutura de hardware, o desenvolvimento de softwares de operação e, por fim, a realização de testes de desempenho voltados para a validação do modelo experimental obtido, com destaque a modelagem de um arranjo eólico, tipo velocidade variável, equipado com gerador síncrono.

**Palavras-chave:** Energia eólica, estrutura laboratorial, fontes renováveis, qualidade da energia elétrica.

# ABSTRACT

In a time when environmental issues are widely discussed, and on the other hand, the growing needs for energy, the use of renewable energy sources plays important rule and interest. Among the solutions, the wind energy resource has shown to be competitive and has attracted the attention in many countries. Due to the dynamic characteristics inherent to the winds and the various topologic arrangements typically employed to the transformation of mechanical energy into electricity, the interaction between the wind farms and the AC connection grid has become a matter of major concern. In fact, the accomplishment of power quality indicators and dynamic performance as defined by the regulating agencies can be taken as major challenges to be considered to achieve a satisfactory connection. Centered on this subject, this work is directed toward the definition of a physical structure for laboratory representing, on a reduced scale, a typical wind complex, aimed mainly at the trials with a focus on issues linked with the phenomena defined as indicators of power quality. Having the above in mind, this dissertation focuses the results of affords towards the conception of a physical structure, the hardware components, the software to operate the overall complex and, finally, to describe test results towards the validation of the experimental model set up to represent a typical wind arrangement of variable speed type equipped with synchronous generator.

**Keywords:** Laboratory, power quality, renewable sources, wind power.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>20</b>
<b>1. Introdução Geral .....</b>	<b>20</b>
1.1. <i>Considerações Iniciais</i> .....	20
1.2. - <i>Cenário mundial e nacional da geração eólica</i> .....	21
1.3. - <i>Motivação para a presente dissertação</i> .....	24
1.4. - <i>Contribuições da dissertação</i> .....	27
1.5. - <i>Estrutura da dissertação</i> .....	28
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>30</b>
<b>2. Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona.....</b>	<b>30</b>
2.1. – <i>Considerações Iniciais</i> .....	30
2.2. – <i>Composição física de uma unidade eólica comercial</i> .....	31
2.2.1. – <i>Turbina eólica</i> .....	32
2.2.2. – <i>Geradores elétricos</i> .....	37
2.3. – <i>Concepção do modelo experimental em escala reduzida</i> .....	39
a) <i>Motor CC</i> .....	42
b) <i>Gerador</i> .....	43
c) <i>Retificador</i> .....	44
d) <i>Inversor</i> .....	46
e) <i>Transformador</i> .....	47
f) <i>Carga</i> .....	48
2.4. – <i>Considerações Finais</i> .....	50
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>51</b>
<b>3. Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software</b>	<b>51</b>
3.1. – <i>Considerações Iniciais</i> .....	51
3.2. – <i>Modelagem do conjunto vento-turbina-controles</i> .....	52
3.3. – <i>Modelagem do motor de corrente contínua</i> .....	57
3.4. – <i>Composição física da estrutura laboratorial</i> .....	58
a) <i>Placa de Aquisição e Controle</i> .....	60
b) <i>CLP Dexter</i> .....	61
c) <i>Fonte DC</i> .....	63
d) <i>Isolador Galvânico</i> .....	64
e) <i>Encoder Óptico</i> .....	64
f) <i>Condicionador de Sinal</i> .....	65

g) <i>Conversor CA / CC</i> .....	67
3.5. <i>Instrumentos de Aquisição</i> .....	68
a) <i>Qualímetro</i> .....	68
b) <i>Osciloscópio</i> .....	69
3.6. – <i>Software para modelagem do Vento – Turbina - Controle</i> .....	70
3.6.1. - <i>Linguagem de Programação</i> .....	70
3.6.2. - <i>Interfaces</i> .....	71
3.6.2.1. - <i>Tela inicial</i> .....	71
3.6.2.2. - <i>Tela de Aquisição e Análise</i> .....	73
3.6.3. - <i>Código de programação</i> .....	75
3.7. – <i>Avaliação de desempenho da representação da fonte primária de energia</i> .....	78
3.8. – <i>Considerações Finais</i> .....	81
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>83</b>
<b>4. Avaliação experimental do desempenho da estrutura laboratorial .....</b>	<b>83</b>
4.1. – <i>Considerações Iniciais</i> .....	83
4.2. – <i>Síntese dos indicadores de qualidade da energia</i> .....	84
4.2.1. - <i>Tensão de regime permanente</i> .....	84
4.2.2. – <i>Desequilíbrio de tensão</i> .....	85
4.2.3. – <i>Distorção harmônica</i> .....	85
4.2.4. – <i>Flutuação de tensão</i> .....	87
4.3. – <i>Caracterização dos casos utilizados nos estudos de avaliação de desempenho</i> .....	89
4.4. – <i>Resultados para o Caso 1</i> .....	92
4.4.1. – <i>Ponto 01</i> .....	93
4.4.2. – <i>Ponto 02</i> .....	97
4.4.3. – <i>Ponto 03</i> .....	102
4.4.4. – <i>Ponto 04</i> .....	103
4.4.5. – <i>Ponto 05</i> .....	105
4.5. – <i>Resultados para o Caso 2</i> .....	110
4.5.1. – <i>Ponto 01</i> .....	110
4.5.2. – <i>Ponto 02</i> .....	115
4.5.3. – <i>Ponto 03</i> .....	122
4.5.4. – <i>Ponto 04</i> .....	124
4.5.5. – <i>Ponto 05</i> .....	127
4.6. – <i>Resultados para o Caso 3</i> .....	132
4.6.1. – <i>Ponto 01</i> .....	133
4.6.2. – <i>Ponto 02</i> .....	138
4.6.3. – <i>Ponto 03</i> .....	145
4.6.4. – <i>Ponto 04</i> .....	146
4.6.5. – <i>Ponto 05</i> .....	148
4.7. – <i>Considerações Finais</i> .....	154
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>159</b>
<b>5. Conclusões .....</b>	<b>159</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>164</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>169</b>

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Capacidade mundial de energia eólica instalada até o final de 2011 [1].....	21
Figura 1.2 - Capacidade mundial de energia eólica prevista entre 2011 á 2016 [1] .....	22
Figura 2.1 – Estrutura típica de um sistema eólico comercial [15] .....	31
Figura 2.2 - Coeficiente de potência de uma turbina eólica ( $C_p$ ) em função da razão de velocidade na pá ( $\lambda$ ). .....	35
Figura 2.3 - Curva típica de potência elétrica em função do vento de uma turbina eólica de 660 kW com controle <i>Pitch</i> [15]. .....	36
Figura 2.4 - Gerador síncrono a rotor bobinado. ....	38
Figura 2.5 - Gerador síncrono a imã permanente. ....	39
Figura 2.6 – Concepção física da estrutura laboratorial, em escala reduzida, de uma unidade eólica à geração síncrona. ....	41
Figura 2.7 – Diagrama esquemático das unidades constituintes do laboratório montado nas instalações físicas da UFU.....	41
Figura 2.8 - Estrutura laboratorial montada. ....	42
Figura 2.9 - Motor de Corrente Continua. ....	43
Figura 2.10 - Gerador síncrono de rotor bobinado. ....	44
Figura 2.11 - Retificador trifásico não controlado. ....	45
Figura 2.12 - Indutâncias de entrada do retificador. ....	45
Figura 2.13 - Inversor trifásico. ....	46
Figura 2.14 - Transformador trifásico. ....	47
Figura 2.15 - Esquema de ligação da carga trifásica RL .....	48
Figura 2.16 - (a) Resistências variáveis; (b) Indutâncias variáveis. ....	48
Figura 2.17 - Varivolt para o controle da carga.....	49
Figura 3.1 - Coeficiente de potência em função da razão de velocidade da pá [14]. .....	54
Figura 3.2 - Sistema de controle do motor CC. ....	59
Figura 3.3 - Placa de Aquisição PCI-1602. ....	61
Figura 3.4 - CLP utilizado no processo. ....	62
Figura 3.5 - Código do CLP. ....	63
Figura 3.6 - Fonte chaveada <i>Trio Power da Phoenix Contact</i> . ....	63
Figura 3.7 - Isolador galvânico CC. ....	64
Figura 3.8 - <i>Encoder</i> Óptico. ....	64
Figura 3.9 – Esboço da estrutura do tacômetro (visão de topo). ....	65
Figura 3.10 - Circuito do Condicionador de sinal. ....	66
Figura 3.11 - Condicionador de Sinal.....	66
Figura 3.12 - Descritivo das conexões do condicionador.....	67
Figura 3.13 - Conversores CA/CC. ....	67
Figura 3.14 - Registrador de parâmetros de qualidade MARCH-21 993.....	69
Figura 3.15 - Osciloscópio da Tektronix TPS 2024. ....	70
Figura 3.16 - Interface Inicial do Software.....	72
Figura 3.17 - Tela de análises do software. ....	74
Figura 3.18 - Fluxograma do código do software. ....	76
Figura 3.19 - Velocidade do Vento [m/s].....	79
Figura 3.20 - Rotação do Eixo [rpm].....	79

Figura 3.21 - Potência mecânica da turbina [W] – perfil que se manifestaria num sistema real.	80
Figura 3.22 - Potência mecânica motor [W].	81
Figura 4.1 – Pontos de medição para os estudos de desempenho do sistema eólico.....	92
Figura 4.2 – Velocidade do vento – Caso 1.....	93
Figura 4.3 – Velocidade mecânica da turbina – Caso 1.....	93
Figura 4.4 – Coeficiente de potência – Caso 1.....	94
Figura 4.5 – Potência que seria disponibilizada no eixo de uma turbina eólica comercial para a situação imposta pelo Caso 1.....	95
Figura 4.6 – Potência disponibilizada pelo motor de CC em ambiente laboratorial – Caso 1.	96
Figura 4.7 – Torque mecânico verificado no eixo do gerador – Caso 1.....	97
Figura 4.8 – Tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1. ....	97
Figura 4.9 – Valores eficazes das tensões fornecidas pelo gerador – Caso 1.....	98
Figura 4.10 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1. ....	99
Figura 4.11 – Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) – Caso 1....	99
Figura 4.12 – Correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1.....	100
Figura 4.13 – Valores eficazes das correntes de linha fornecidas pelo gerador – Caso 1.....	100
Figura 4.14 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1.....	101
Figura 4.15 – Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) – Caso 1.....	102
Figura 4.16 – Tensão no elo CC – Caso 1.....	102
Figura 4.17 – Corrente no elo CC – Caso 1. ....	103
Figura 4.18 – Tensões trifásicas na saída do inversor – Caso 1.....	104
Figura 4.19 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor – Caso 1.....	104
Figura 4.20 – Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) – Caso 1.....	105
Figura 4.21 – Tensões trifásicas nos terminais da carga isolada – Caso 1.....	106
Figura 4.22 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga – Caso 1. ....	107
Figura 4.23 – Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) – Caso 1.....	108
Figura 4.24 – Correntes trifásicas fornecidas para a carga isolada – Caso 1. ....	108
Figura 4.25 – Valores eficazes das correntes de linha para a carga isolada – Caso 1.....	109
Figura 4.26 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada – Caso 1.....	109
Figura 4.27 – Espectro das correntes harmônicas na carga isolada (em pu) – Caso 1.....	110
Figura 4.28 – Velocidade do vento – Caso 2.....	111
Figura 4.29 – Velocidade mecânica da turbina – Caso 2. ....	111
Figura 4.30 – Coeficiente de potência – Caso 2. ....	113
Figura 4.31 – Potência que seria disponibilizada no eixo de uma turbina eólica comercial para a situação imposta pelo Caso 2.....	113
Figura 4.32 – Potência disponibilizada pelo motor de CC em ambiente laboratorial – Caso 2. ....	114
Figura 4.33 – Torque mecânico verificado no eixo do gerador – Caso 2.....	115
Figura 4.34 – Tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 2. ....	116
Figura 4.35 – Valores eficazes das tensões fornecidas pelo gerador – Caso 2.....	116
Figura 4.36 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rajada – Caso 2. ....	117
Figura 4.37 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rampa – Caso 2. ....	118
Figura 4.38 – Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no momento do pico da rajada – Caso 2.....	118
Figura 4.39 - Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no momento do pico da rampa - Caso 2. ....	119
Figura 4.40 – Correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 2. ....	120

Figura 4.41 – Valores eficazes das correntes de linha fornecidas pelo gerador – Caso 2.....	120
Figura 4.42 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rajada – Caso 2.....	121
Figura 4.43 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rampa – Caso 2. ....	121
Figura 4.44 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no momento do pico da rajada - Caso 2. ....	122
Figura 4.45 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no momento do pico da rampa - Caso 2.....	122
Figura 4.46 – Tensão no elo CC – Caso 2.....	123
Figura 4.47 – Corrente no elo CC – Caso 2. ....	123
Figura 4.48 – Tensões trifásicas na saída do inversor – Caso 2. ....	124
Figura 4.49 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no instante do pico da rajada – Caso 2. ....	125
Figura 4.50 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no instante do pico da rampa – Caso 2. ....	125
Figura 4.51 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) no instante do pico da rajada - Caso 2. ....	126
Figura 4.52 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) no instante do pico da rampa - Caso 2. ....	126
Figura 4.53 – Tensões trifásicas nos terminais da carga isolada – Caso 2. ....	127
Figura 4.54 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no momento do pico da rajada – Caso 2. ....	128
Figura 4.55 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no momento do pico da rampa – Caso 2. ....	128
Figura 4.56 – Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no pico da rajada – Caso 2. ....	129
Figura 4.57 – Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no pico da rampa – Caso 2. ....	129
Figura 4.58 – Correntes trifásicas fornecidas para a carga isolada – Caso 2. ....	130
Figura 4.59 – Valores eficazes das correntes de linha para a carga isolada – Caso 2.....	130
Figura 4.60 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada no momento do pico da rajada – Caso 2. ....	131
Figura 4.61 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada no momento do pico da rampa – Caso 2. ....	131
Figura 4.62 – Espectro das correntes harmônicas na carga isolada (em pu) durante o pico da rampa – Caso 2. ....	132
Figura 4.63 – Velocidade do vento – Caso 3.....	133
Figura 4.64 – Velocidade mecânica da turbina – Caso 3. ....	134
Figura 4.65 - Coeficiente de potência – Caso 3.....	135
Figura 4.66 – Potência que seria disponibilizada no eixo de uma turbina eólica comercial para a situação imposta pelo Caso 3.....	135
Figura 4.67 – Potência disponibilizada pelo motor CC em ambiente laboratorial – Caso 3. ....	136
Figura 4.68 – Torque mecânico verificado no eixo do gerador – Caso 3. ....	137
Figura 4.69 – Atuação do controle do ângulo <i>Pitch</i> – Caso 3. ....	138
Figura 4.70 – Tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 3. ....	138
Figura 4.71 – Valores eficazes das tensões fornecidas pelo gerador – Caso 3.....	139
Figura 4.72 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no patamar superior da rajada – Caso 3. ....	140

Figura 4.73 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no patamar superior da rampa – Caso 3.....	140
Figura 4.74 - Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no patamar superior da rajada - Caso 3.....	141
Figura 4.75 - Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no patamar superior da rampa - Caso 3.....	141
Figura 4.76 – Correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 3.....	142
Figura 4.77 – Valores eficazes das correntes de linha fornecidas pelo gerador – Caso 3.....	142
Figura 4.78 – Detalhes das correntes fornecidas pelo gerador no patamar superior da rajada – Caso 3.....	143
Figura 4.79 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador no patamar superior da rampa – Caso 3.....	143
Figura 4.80 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no patamar superior da rajada - Caso 3.....	144
Figura 4.81 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no patamar superior da rampa – Caso 3.....	144
Figura 4.82 – Tensão do elo CC – Caso 3.....	145
Figura 4.83 – Corrente injetada no elo CC – Caso 3.....	145
Figura 4.84 – Tensões trifásicas na saída do inversor – Caso 3.....	146
Figura 4.85 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no patamar superior da rajada – Caso 3.....	147
Figura 4.86 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no patamar superior da rampa – Caso 3.....	147
Figura 4.87 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) para o patamar superior da rajada - Caso 3.....	148
Figura 4.88 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) para o patamar superior da rampa - Caso 3.....	148
Figura 4.89 – Tensões trifásicas nos terminais da carga isolada – Caso 3.....	149
Figura 4.90 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no patamar superior da rajada – Caso 3.....	149
Figura 4.91 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no patamar superior da rampa – Caso 3.....	150
Figura 4.92 - Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no patamar superior da rajada - Caso 3.....	150
Figura 4.93 - Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no patamar superior da rampa - Caso 3.....	151
Figura 4.94 – Correntes trifásicas fornecidas para a carga isolada – Caso 3.....	151
Figura 4.95 – Valores eficazes das correntes de linha para a carga isolada – Caso 3.....	152
Figura 4.96 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada no patamar superior da rajada – Caso 3.....	152
Figura 4.97 – Detalhes das correntes trifásicas na carga no patamar superior da rampa – Caso 3.....	153
Figura 4.98 – Espectro das correntes harmônicas na carga isolada (em pu) para o patamar superior da rampa – Caso 3.....	153

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Países com maior potencial eólico instalado no fim de 2011 [1].....	22
Tabela 1.2 - Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil [2].....	24
Tabela 4.1 – Valores de referência das tensões entre 1 kV e 69kV. ....	84
Tabela 4.2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	86
Tabela 4.3 – Valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) .....	87
Tabela 4.4 – Valores de referência para os indicadores de cintilação luminosa. ....	88
Tabela 4.5 – Valores de referência para a função de transferência FT. ....	89
Tabela 4.6 – Características do sistema utilizado como referência. ....	90
Tabela 4.7 – Características do sistema laboratorial em escala reduzida. ....	90
Tabela 4.8 - Caracterização do vento nos casos estudados. ....	91
Tabela 4.9 – Grandezas analisadas nos estudos de desempenho.....	92

# LISTA DE ABREVIATURAS

- PCHs – Pequenas Centrais Hidroelétricas
- EUA – Estados Unidos da América
- PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social.
- PRODIST – Procedimentos da Distribuição
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- PROREDE – Procedimentos de Rede
- ONS – Operador Nacional do Sistema
- IEC – *International Electrotechnical Commission*
- MCC – Máquina de Corrente Contínua
- SEP – Sistema Elétrico de Potência
- CC – Corrente Contínua
- WECS – Sistemas de Conversão de Energia Eólica
- TSR – *Tip Speed Ratio*
- PAC – Ponto de Acoplamento Comum
- VSI – *Voltage Sourced Imposed*
- DC – *Direct Current*
- CA – Corrente Alternada
- IV – Instrumento Virtual
- CLP – Controlador Lógico Programável
- rpm – Rotações Por Minuto
- PG – Programador Gráfico
- PDE – Programação por Diagrama Esquemático
- ATP – *Alternative Transient Program*
- EMTP – *Electromagnetic Transients Program*
- CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

# LISTA DE SÍMBOLOS

$V_{sombtor}(x, y)$  – componente do vento devido ao sombreamento de torre

$K_B$  – velocidade base do vento

$a$  – raio da torre

$x$  – distância lateral das pás até o centro da torre

$y$  – distância longitudinal entre cada pá e o centro da torre

$A$  – área varrida pelas pás das turbinas

$v_{vento}$  – velocidade do vento

$E$  – energia cinética do vento

$m$  – massa do ar que atinge as pás da turbina

$\rho$  – densidade do ar

$P_{disp}$  – potência do vento

$P_{mec}$  – potência mecânica disponibilizada no eixo da turbina

$C_p$  – coeficiente de potência

$\lambda$  – coeficiente adimensional

$\beta$  – ângulo de passo das pás da turbina

$c_1$  a  $c_9$  – coeficientes dependentes das características aerodinâmicas da turbina

$\omega_{turbina}$  – velocidade angular da turbina eólica

$R$  – raio da turbina eólica

$\omega_{óptimo}$  – velocidade angular da turbina eólica ótima

$\lambda_{óptimo}$  – coeficiente adimensional ótimo

$C_{p_{óptimo}}$  – coeficiente de potência ótimo

$P_{mec_{óptimo}}$  – potência mecânica disponibilizada no eixo da turbina ótima

$\alpha_{at}$  – ângulo de ataque das pás da turbina

$v_{base}$  – velocidade do vento média

$v_{rajada}$  – componente rajada do vento

$v_{rampa}$  – componente rampa do vento

$v_{ruído}$  – componente ruído do vento

$t_{s\_rajada}$  – tempo inicial da rajada

- $T_{rajada}$  – duração da componente rajada  
 $R_{MAX}$  – valor máximo da rajada  
 $t_{s\_rampa}$  – tempo inicial da componente rampa  
 $t_{f\_rampa}$  – tempo final da componente rampa  
 $RAM_{MAX}$  – valor máximo da rampa  
 $\emptyset_i$  – variável randômica com densidade de probabilidade uniforme no intervalo de 0 a  $2\pi$   
 $\Delta\omega$  – variação da velocidade  
 $N$  – números de termos considerados  
 $S_V$  – função de densidade espectral  
 $K_N$  – coeficiente de arrasto da superfície  
 $F$  – escala de turbulência  
 $\mu$  – velocidade principal do vento na altura de referência  
 $V_a$  – tensão de armadura aplicada  
 $R_a$  – resistência de armadura  
 $i_a$  – corrente de armadura  
 $L_a$  – indutância de armadura  
 $k_{af}$  – constante do motor  
 $i_f$  – corrente de campo  
 $\omega$  – velocidade mecânica angular  
 $V_f$  – tensão de campo aplicado  
 $R_f$  – resistência de campo  
 $L_f$  – indutância de campo  
 $J$  – momento de inércia do motor  
 $C_v$  – amortecimento viscoso;  
 $T_{mec}$  – torque mecânico  
 $T_{ele}$  – torque elétrico  
 $P_{ele}$  – potência elétrica  
 $\omega_{ref}$  – velocidade angular referida à velocidade da turbina de referência  
 $\omega_{motor}$  – velocidade angular do motor de corrente contínua  
 $\omega n_{gerador}$  – velocidade nominal do gerador de referência  
 $\omega n_{motor}$  – velocidade nominal do motor de corrente contínua  
 $P_{ref}$  – potência elétrica referência ao motor de corrente contínua  
 $P_{n_{motor}}$  – potência elétrica nominal do motor de corrente contínua

$P_{n_{gerador}}$  – potência elétrica nominal do gerador de referência

TA – tensão de atendimento

TL – tensão de leitura

TC – tensão contratada

$FD$  – fator de desequilíbrio

$V_-$  – magnitude da tensão de sequência negativa

$V_+$  – magnitude da tensão de sequência positiva

$DITH$  – distorção harmônica individual de tensão de ordem  $h$

$DTT$  – distorção harmônica total de tensão

$V_h$  – tensão harmônica de ordem  $h$

$h$  – ordem harmônica

$hmáx$  – ordem harmônica máxima

$V_1$  – tensão fundamental medida

$V_N$  – tensão nominal do barramento

$P_{st}$  – indicador de severidade de curta duração

$P_{0,1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$  e  $P_{50}$  – níveis da sensação instantânea de *flicker* que excedem em 0,1; 1; 3; 10 e 50 % o tempo de observação

FPCC - função probabilidade cumulativa complementar

$P_{lt}$  – indicador de severidade de longa duração

FT – fator de transferência MPPT (*Maximum Power Point Tracking* ou controle de extração máxima de potência)

MPP (*Maximum Power Point Tracking* ou Ponto Ideal de Carga)

# CAPÍTULO I

---

## 1. Introdução Geral

### 1.1. Considerações Iniciais

O crescente aumento das necessidades mundiais de energia e, por outro lado, as preocupações com os efeitos das explorações das fontes classicamente estabelecidas sobre o meio ambiente, resultou, nos últimos tempos, numa expressiva motivação para a implantação de unidades de geração elétrica que conciliem o atendimento das necessidades da sociedade respeitando-se o equilíbrio para com as questões associadas com conservação da natureza. Neste particular, uma das questões apontadas foi de incentivar o uso comercial de fontes de energia, limpas e renováveis, tais como: a geotérmica, PCH (Pequenas Centrais Hidroelétricas), biomassa, biodiesel, solar, eólica, dentre outras.

Destas possibilidades, em particular, a geração eólica vem se firmando, cada vez mais, como uma fonte de energia contemplando os termos aqui postos. Isto se deve, sobremaneira, a atrativos técnicos e econômicos a exemplo de: menor tempo de implementação, custo de construção competitivo se comparado com outras tecnologias, reduzidas taxas de manutenção, fonte de energia segura e renovável, baixo impacto ambiental, e ainda, instalação física relativamente simples diante da complexidade de outras fontes de energia.

Reconhecendo pois que os parques eólicos se apresentam, no contexto mundial, como uma das mais promissoras, e mesmo, para alguns países, uma realidade que já ocupa uma posição de destaque na matriz energética, o domínio destas tecnologias se faz premente e, neste particular, o papel dos mais distintos centros de pesquisa do Brasil é de motivar

---

## Capítulo I - Introdução Geral

---

desenvolvimentos atentando para as tendências, concepções, características, projetos, construções, modelos para estudos de desempenho, etc. É neste cenário que se encontra identificada a presente dissertação.

### 1.2. - Cenário mundial e nacional da geração eólica

A energia eólica se apresenta com grande destaque em relação a outras fontes de energia renováveis e, diante desta incontestável realidade e das perspectivas desta tecnologia como componente da matriz energética dos países, o tema tem atraído a atenção de investidores, empresas do setor elétrico, universidades, centros de desenvolvimentos, dentre outros segmentos da sociedade [1]. Visando evidenciar a importância da geração eólica-elétrica no contexto mundial, a Figura 1.1 mostra o crescimento desta e mostra que, apenas em 2011, foi acrescentado 40.564 MW à matriz energética mundial, chegando, portanto, ao final deste ano, com uma capacidade total instalada de 237.669 MW.

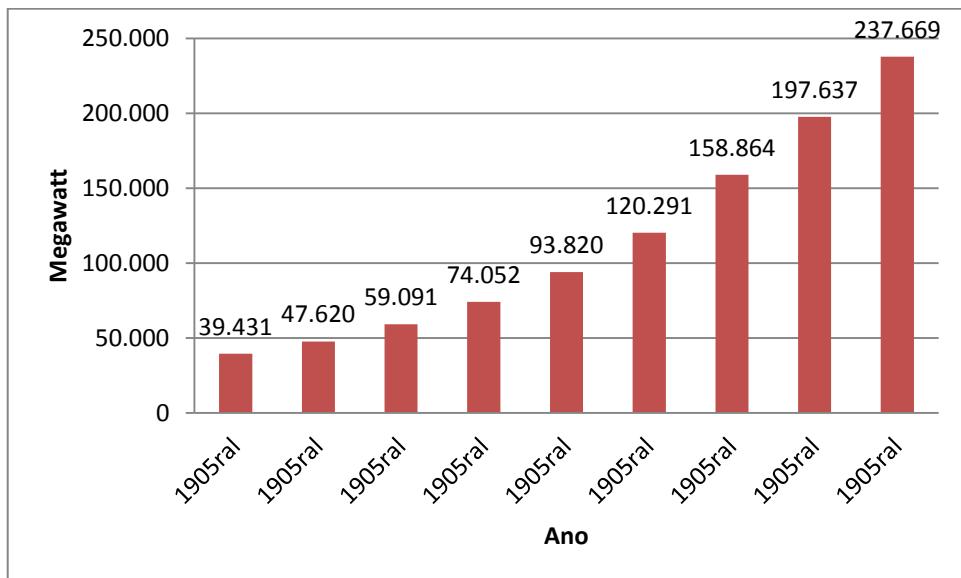


Figura 1.1 - Capacidade mundial de energia eólica instalada até o final de 2011 [1].

## Capítulo I - Introdução Geral

Complementarmente, a Figura 1.2 apresenta uma estimativa para o crescimento dos parques eólicos no mundo entre os anos de 2011 e 2016.

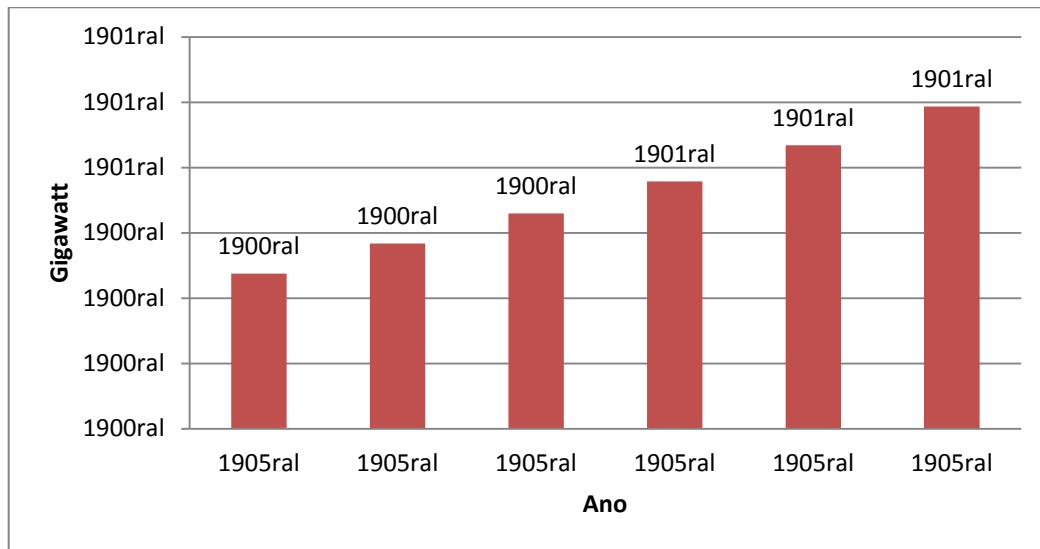


Figura 1.2 - Capacidade mundial de energia eólica prevista entre 2011 á 2016 [1].

Também, a título informativo, uma relação dos países com maior potencial eólico instalado até o fim de 2011 é apresentada na Tabela 1.1. A China se destaca em primeiro lugar, com 62.364 MW, além de um crescimento de 17.631 MW em 2011, evidenciando, deste modo, um forte comprometimento com este tipo de geração.

Tabela 1.1 – Países com maior potencial eólico instalado no fim de 2011 [1].

Posição em 2011	País/Região	Capacidade total no final de 2011 [MW]	Capacidade adicionada em 2011 [MW]	Taxa de crescimento em 2011 [%]	Posição em 2010	Capacidade total em 2010 [MW]
1	China	62.364	17.631	39%	1	44.733
2	EUA	46.919	6.810	16%	2	40.298
3	Alemanhã	29.060	2.086	7%	3	27.191
4	Espanha	21.674	1.050	5%	4	20.623
5	India	16.084	3.019	23%	5	13.065
6	França	6.800	830	14%	6	5.970
7	Italia	6.737	950	16%	7	5.797
8	Inglaterra	6.540	1.293	25%	8	5.248

## Capítulo I - Introdução Geral

9	Canada	5.265	1.267	31%	9	4.008
10	Portugal	4.083	377	10%	11	3.706
11	Dinamarca	3.871	178	3%	10	3.749
12	Suécia	2.970	763	37%	14	2.163
13	Japão	2.501	168	7%	12	2.334
14	Holanda	2.328	68	3%	13	2.269
15	Australia	2.224	234	12%	15	1.990
16	Turquia	1.799	470	35%	17	1.329
17	Irlanda	1.631	239	17%	16	1.392
18	Grecia	1.629	311	23%	18	1.323
19	Polonia	1.616	436	37%	19	1.180
20	Brasil	1.509	583	63%	21	927
21	Austria	1.084	73	7%	20	1.014
22	Belgica	1.078	192	22%	22	886
23	Nova Zelândia	623	109	21%	26	514
24	Mexico	569	50	10%	25	519
25	Taiwan	564	45	9%	24	519
26	Egito	550	-	0%	23	550
27	Corea do Sul	407	28	7%	27	379
28	Maroco	291	5	2%	28	286
29	Chile	205	33	19%	29	172
30	Costa Rica	132	13	11%	30	119
31	Argentina	130	79	160%	33	50
32	Honduras	102	102	-	37	-
33	Caribe	91	-	0%	31	91
34	Iran	91	3	1%	32	90
35	Rep. Dominicana	33	33	-	38	-
36	Vietnã	30	29	275%	35	8
37	Cabo Verde	24	23	1100%	36	2
38	Ilhas do Pacifico	12	-	0%	34	12

No que tange à realidade nacional, em 2011 ocorreu um aumento de 583 MW, fato este que conduziu a uma capacidade total de geração instalada de 1.509 MW, valor que representa 1,3% da matriz energética brasileira. A Tabela 1.2 apresenta a situação brasileira quanto às tendências de crescimento até o ano de 2020, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2020 [2]. Pode-se verificar nesta tabela que o crescimento nos anos de 2010 e 2011 foi superior ao previsto, deixando clara a grande tendência de crescimento desta fonte de energia.

---

## Capítulo I - Introdução Geral

---

Tabela 1.2 - Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil [2].

Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Energia Eólica [MW]	831	1.283	3.224	5.272	6.172	7.022	7.782	8.682	9.532	10.532	11.532

Quanto à política direcionada para o incentivo à exploração eólica, o primeiro grande passo ocorreu com a criação de um projeto de Estado, o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia [3], através do qual havia a garantia da compra da energia pela Eletrobrás a um preço muito acima dos praticados pela geração hidrelétrica, cerca de R\$ 260,0/ MWh e ainda, oferecia financiamentos de até 80% do investimento total das usinas, recursos estes advindos do BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social [4].

Na atualidade, a estratégia utilizada encontra-se polarizada no sentido da inclusão desta geração através da realização de leilões e o sucesso do processo produziu mais 71 projetos contratados, chegando a uma capacidade nacional de geração eólica de 1805 MW em 2012 [5]. Destes, 63 estão localizados na região nordeste e encontram-se assim distribuídos: 23 no estado do Rio Grande do Norte (657 MW), 21 no Ceará (542 MW), 18 na Bahia (390 MW) e 1 no Sergipe (30 MW) [6].

No que tange aos custos para comercialização da energia elétrica produzida através dos aproveitamentos dos ventos, o paradigma dos altos valores iniciais foi quebrado com o primeiro leilão de energia, no qual o preço médio foi de R\$ 148,39 por MWh, valor este, em média, abaixo daqueles verificados para usinas de biomassa e PCHs [7], [8] e [9].

### 1.3. – Motivação para a presente dissertação

Tendo em vista as taxas de crescimento do emprego das tecnologias de exploração de energia eólica, um expressivo número de trabalhos realizados por centros de

---

## Capítulo I - Introdução Geral

desenvolvimentos, universidades, fabricantes, órgãos de fomento, agências reguladoras, somado às políticas governamentais, etc. podem ser detectados.

No contexto da pesquisa propriamente dita destacam-se algumas pesquisas as quais buscam: a obtenção de topologias construtivas e operacionais mais atrativas; definição de estratégias operacionais com características otimizadas quanto ao aproveitamento da energia e respectiva conversão; meios computacionais e laboratoriais para a realização de estudos de desempenho sob condições transitórias, dinâmicas e de regime permanente; avaliação da correlação operativa entre as unidades eólicas e redes de conexão; entre outros. Tudo isto visando o domínio de uma técnica que, até pouco tempo, se fazia pouco conhecida no Brasil, a não ser pela visão de futuro de alguns pesquisadores e alguns pequenos aproveitamentos implementados no território nacional. Reconhecendo pois o fato que tecnologia em pauta, no país, não foi objetivo de maiores investimentos, isto resultou numa grande dependência do mercado exterior quanto a questões como: fornecedores, programas computacionais, laboratórios para estudos, etc..

Dentro do universo dos esforços necessários ao domínio do assunto, um deles se apresenta na forma dos requisitos impostos pelo ONS, quando da conexão de unidades eólicas à rede básica, com destaque aos impactos sobre os indicadores de qualidade da energia nos dois vieses, isto é, o parque afetando a rede elétrica e esta última influenciando no funcionamento da unidade de geração. De fato, os parques eólicos, para a grande maioria das instalações, não opera isoladamente, mas sim, interligados a um ponto do sistema elétrico pertencente à rede básica ou de distribuição. Para esta última situação há ainda de se destacar a possibilidade da conexão ocorrer junto a barramentos de baixo nível de curto-circuito, fato este agravante para a questão ora apontada.

Diante destas constatações, os problemas associados com os indicadores de qualidade da energia elétrica, nos termos definidos por documentos ou normas nacionais e

---

## Capítulo I - Introdução Geral

internacionais, tais como: PRODIST da ANEEL [10], Procedimentos de Rede do ONS [11] e a IEC 61400-21 [12] podem se tornar fatores altamente limitantes às autorizações de acesso à rede, visto a possibilidade de se violar os valores de referência ou limites estabelecidos para as distorções harmônicas, flutuações de tensão, suportabilidade às variações de tensão, etc. [13]. No caso do PRODIST este estabelece critérios de acesso no qual os valores de referência deverão ser considerados (e não necessariamente obedecidos) nas barras de distribuição como consequência da operação de todas as cargas conectadas.

Isto posto surge, por consequência, a necessidade da disponibilização de processos avaliativos que permitam investigar os impactos associados com os acessos das unidades eólicas junto aos sistemas CA comerciais. Neste cenário ressaltam-se algumas possibilidades, a exemplo de: modelos computacionais utilizando técnicas de modelagem distintas [14], [4] e [15]; estruturas laboratoriais em que as unidades constituintes dos parques sejam representadas por equipamentos em consonância com os arranjos reais e, alternativamente, montagens experimentais em escala reduzida que permitam, respeitadas suas limitações, reproduzir alguns fenômenos relevantes e identificados com a realidade constituinte da geração ora pautada.

Destacando o tema central aqui considerado, qual sejam, os problemas associados com a Qualidade da Energia, muito embora o reconhecimento de uma maior identidade de instalações laboratoriais que empregam túneis de vento, turbinas, geradores e conversores em consonância com as instalações reais, alternativamente, devido a atrativos e limitações que dispensam maiores considerações, surge a ideia de uma estrutura em escala reduzida.

Esta última, embora suas limitações, pode se mostrar extremamente útil para um conjunto de necessidades, a exemplo das investigações dos fenômenos vinculados com os indicadores de desempenho da Qualidade da Energia, dentre outros. Naturalmente, nesta concepção há uma série de medidas adotadas objetivando uma maior simplicidade construtiva

---

## Capítulo I - Introdução Geral

do arranjo físico. Uma delas está na substituição dos túneis de vento por motores de corrente contínua ou de indução devidamente controlados para a reprodução das características da fonte primária de energia, ou seja, o vento. A ideia do emprego dos mencionados motores para os fins almejados não é nova. O emprego de motores CC foi amplamente explorado em [16], [17], [18], [19], [20], [21] e [22]. Apesar do reconhecimento de um expressivo número de referências voltadas para a utilização de motores CC aos fins aqui delineados, identificou-se que, apenas [23] contempla as características próprias e físicas atreladas com a natureza dos ventos sob condições reais. No entanto, tal bibliografia possui somente resultados computacionais, carecendo de validação experimental, nos termos aqui propostos.

Portanto, a proposta deste trabalho focada na concepção da estrutura física; especificação dos componentes constituintes do arranjo experimental; montagem física; desenvolvimento de software para controle e operação do motor e conversor; realização de testes iniciais de desempenho, etc., constitui-se em esforços importantes para a obtenção de uma estrutura laboratorial, em escala reduzida, de uma unidade de conversão eólica à velocidade variável (geração síncrona).

### 1.4. - Contribuições da dissertação

Em consonância com as metas supra estabelecidas segue que o presente trabalho se apresenta com os seguintes pontos focais:

- Definição da estrutura física, especificação dos componentes e montagem de um modelo experimental, em escala reduzida, de um complexo eólico de geração à velocidade variável empregando máquinas síncronas;
- Modelagem das características dinâmicas da fonte primária de energia – turbina – controle via motores de corrente continua, em consonância com as condições reais da fonte primária de energia (vento);

---

## **Capítulo I - Introdução Geral**

- Realização de testes experimentais de desempenho do sistema eólico desenvolvido, com destaque ao desempenho dinâmico do arranjo e os indicadores da qualidade da energia elétrica no PAC;
- Disponibilização de uma base experimental para fins do processo de conhecimento das grandezas operativas representativas do funcionamento da unidade eólica em foco e validação de softwares de análise destinados à representação operacional de parques eólicos à velocidade variável.

### **1.5. - Estrutura da dissertação**

De forma a sintetizar os principais pontos relacionados com os trabalhos de pesquisa destinados a contemplar as metas supra referidas, o documento final elaborado para fins desta dissertação, além do presente capítulo de caráter introdutório, encontra-se assim organizado:

#### **CAPÍTULO II - Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona**

Este capítulo tem por objetivo dar embasamento teórico para a pesquisa no tange aos conhecimentos, princípios de funcionamento de sistemas eólicos, e ainda, uma descrição sumária da modelagem matemática dos componentes de um sistema eólico com geração síncrona, a saber: a fonte primária de energia, turbina eólica, gerador síncrono, conversor de frequência, transformador e carga.

#### **CAPÍTULO III – Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software**

O presente capítulo consiste em apresentar o modelo físico da unidade mecânica compreendida desde o vento até o eixo da turbina eólica, e respectivos controles. A partir

---

## **Capítulo I - Introdução Geral**

destes fundamentos é apresentado o software desenvolvido para o controle do motor de corrente contínua destinado à representação destas partes.

## **CAPÍTULO IV – Avaliação experimental do desempenho da estrutura laboratorial**

O referido capítulo encontra-se centrado na apresentação e discussão de diversas condições operativas impostas ao modelo experimental proposto, em que pese às grandezas que refletem o desempenho dinâmico e sob o ponto de vista da qualidade da energia. Neste momento são realizados trabalhos iniciais destinados ao processo de validação do software de análise de desempenho de parques eólicos à geração síncrona.

## **CAPÍTULO V - Conclusões**

Este último capítulo sintetiza as principais contribuições e conclusões finais da dissertação, aqui apresentada..

# CAPÍTULO II

---

## **2. Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona**

### **2.1. – Considerações Iniciais**

Em consonância com as unidades básicas constituintes de um complexo eólico típico, o presente capítulo destina-se a tecer considerações fundamentais sobre os princípios que regem a operação destes complexos, sintetizar as principais equações que regem a correlação entre os ventos e a potência mecânica disponibilizada, ressaltar as topologias utilizadas comercialmente para os fins da conversão de energia aqui referida e, por fim, apresentar as bases que nortearam a estrutura laboratorial concebida para fins da representação experimental de uma geração eólico-elétrica, em que pese o emprego da tecnologia da geração de energia elétrica através de máquinas síncronas.

Apesar do reconhecimento que as discussões e equações relacionadas com a transferência de energia disponibilizada pelos ventos até o eixo mecânico da turbina eólica ao gerador sejam clássicas, tal procedimento é feito visando oferecer uma síntese, objetivando o processo de implantação do modelo experimental em escala reduzida, o qual consiste no cerne desta dissertação.

Em consonância com os objetivos aplicativos do modelo experimental proposto, as considerações feitas ao longo do texto também esclarecem sobre as filosofias para as implementações laboratoriais e, tendo por meta os estudos relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica, apresenta-se a composição física adotada.

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

Por fim, através de figuras ilustrativas, evidenciam-se as unidades componentes do complexo experimental concebido, adquirido e utilizado para o estabelecimento dos recursos laboratoriais almejados.

### 2.2. – Composição física de uma unidade eólica comercial

Tendo em vista que os conceitos fundamentais atrelados com os aspectos construtivos e operacionais de uma unidade eólica, em que pese às filosofias para a captação do vento, controle da potência transmitida, turbinas eólicas, geradores, conversores de frequência, dentre outros componentes, são temas amplamente difundidos [14], para fins da presente pesquisa optou-se pelo direcionamento de sua redação de forma a sintetizar apenas os principais aspectos diretamente relacionados com as metas da dissertação.

A Figura 2.1 indica os principais componentes encontrados nas instalações eólicas e mostra uma estrutura típica desde o ponto de incidência do vento até o gerador.

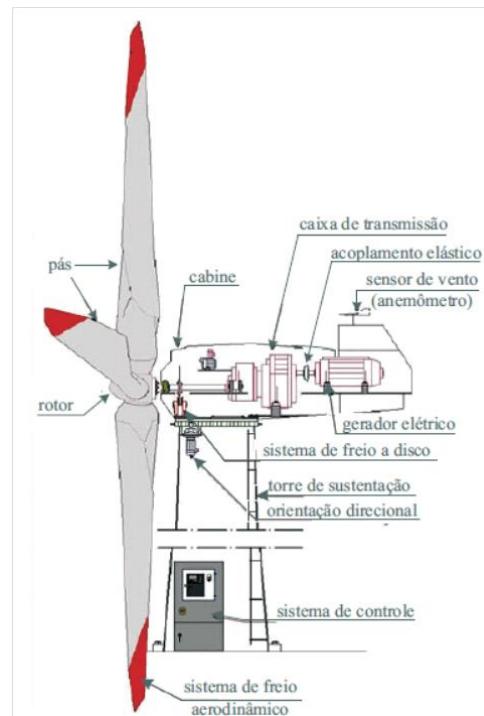


Figura 2.1 – Estrutura típica de um sistema eólico comercial [15].

### **2.2.1. – Turbina eólica**

Como é amplamente conhecida, a fonte primária de energia (vento) se fundamenta no movimento de massas de ar ao redor da superfície do globo, sendo provocada por diferenças de temperatura e pressão. A energia mecânica dessas massas de ar constitui uma imensa fonte de energia natural que pode ser aproveitada e transformada em energia elétrica através dos geradores eólicos [24]. Por razões bastante compreensíveis a sua velocidade e direção não são constantes, características estas que trazem complicadores quando da montagem e controle das instalações. Além destes aspectos há ainda outras variáveis capazes de influenciar o escoamento do vento e que não podem ser ignoradas. Dentre os principais pontos merecedores de destaque, pode-se citar: obstáculos; sombreamento da torre [14], [15] e [25] e efeito esteira [26].

No que tange a potência contida no vento incidente sobre as pás da turbina eólica, esta pode ser modelada iniciando o tratamento pelo reconhecimento que um escoamento de ar de massa  $m$ , movendo-se com velocidade  $v_{vento}$ , e, em consonância com tratamentos clássicos aplicáveis à área, a potência mecânica disponível  $P_{disp}$  é dada por:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} * \rho * A * v_{vento}^3 \quad (2.1)$$

Onde:

$\rho$  – densidade do ar;

$A$  – área de varredura das pás;

$v_{vento}$  – velocidade do vento (fonte primária de energia).

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

A expressão anterior evidencia a máxima potência disponível, todavia, este valor não condiz com os níveis de potência que podem ser absorvidas e, por conseguinte, disponibilizadas no eixo da turbina eólica. De fato, apenas parte do valor previsto na expressão (2.1) pode ser aproveitada, visto que, à medida que o fluxo de ar atravessa as pás este perde uma expressiva parcela de sua energia total. Portanto, reconhecendo tal limitação, define-se um fator que está intimamente ligado com a relação entre a potência disponibilizada pelo vento e o valor efetivamente aproveitado pelo aerogerador. Esta grandeza é conhecida por coeficiente de potência -  $C_p$  [26]. Na prática, os valores máximos para o coeficiente de potência para turbinas eólicas situam-se em torno de 45% de rendimento. Portanto, a expressão final para a potência mecânica útil disponibilizada no eixo da turbina eólica é:

$$P_{mec} = P_{mec} * C_p \quad (2.2)$$

$$P_{mec} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v_{vento}^3 \quad (2.3)$$

O coeficiente de potência também pode ser expresso pelas equações (2.4), (2.5) e (2.6) [15]. Como pode ser constatada, esta grandeza é dependente de duas variáveis, uma primeira representada por coeficiente adimensional denominado “razão de velocidade na pá” (*TSR* – *Tip Speed Ratio*), representada pelo símbolo  $\lambda$  e dada pela razão entre a velocidade da ponta da pá pela velocidade do vento - equação (2.6), e uma segunda, corresponde ao ângulo de passo das pás da turbina  $\beta$ , que está atrelado com a rotação das pás em torno do seu eixo longitudinal e com os coeficientes  $c_1$  a  $c_9$  dependentes das características aerodinâmicas da turbina.

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

---

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 * \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 * \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (2.4)$$

Sendo:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + c_8 * \beta} - \frac{c_9}{\beta^3 + 1}} \quad (2.5)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{turbina} * R}{v_{vento}} \quad (2.6)$$

Sendo:

$\omega_{turbina}$  – velocidade angular da turbina [rad/s];

$R$  – raio da turbina eólica.

Pode-se dizer que para cada aerogerador existe um ponto de trabalho específico no qual obtém-se uma máxima transferência de potência mecânica que é absorvida do vento. Para cada velocidade de vento se tem um coeficiente de potência ótimo  $C_p$ , mas dentre diversas curvas de velocidade de vento existe uma na qual o coeficiente é máximo, esta velocidade da turbina é conhecida como  $\omega_{ótimo}$ . A equação (2.7) descreve esta relação.

$$\lambda_{ótimo} = \frac{\omega_{ótimo} * R}{v_{vento}} \quad (2.7)$$

Por conseguinte, a equação da potência mecânica ótima pode ser calculada por:

$$P_{mec\ ótima} = \frac{1}{2} * \rho * \pi * R^5 * \frac{C_{p\ ótimo}}{\lambda_{ótimo}^3} * \omega_{ótimo}^3 \quad (2.8)$$

No caso de turbinas eólicas de velocidade variável é possível produzir potências mecânicas maiores para faixas de velocidade mais amplas [25]. Essa otimização é possível através do ajuste na velocidade do rotor, de acordo com o vento incidente, mantendo o valor de  $\lambda_{óptimo}$ .

A Figura 2.2 ressalta o comportamento do coeficiente de potência  $C_p$  em função da razão de velocidade na pá  $\lambda$ , para uma turbina eólica específica, respeitado um valor máximo de 45% para o  $C_p$ .

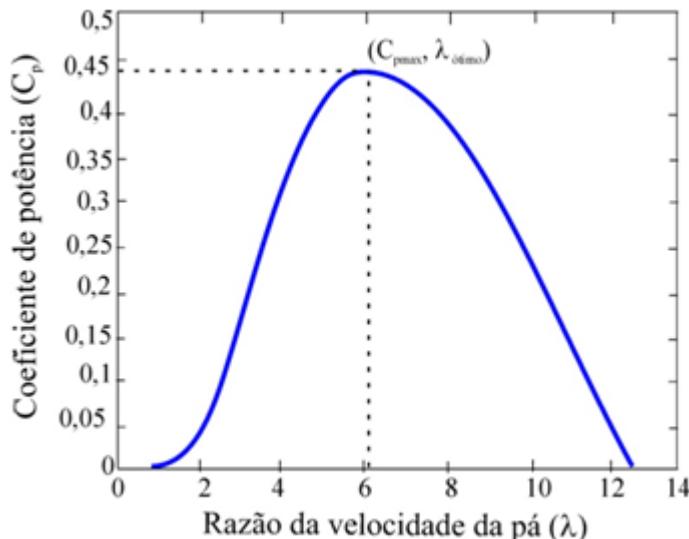


Figura 2.2 - Coeficiente de potência de uma turbina eólica ( $C_p$ ) em função da razão de velocidade na pá ( $\lambda$ ).

Quanto a uma visão operacional mais ampla correlacionando a velocidade do vento com a potência disponibilizada para a turbina eólica, a Figura 2.3 apresenta um exemplo de tal interdependência. Observa-se que, somente a partir de 3 m/s, esta começa a gerar a energia denominada por “*cut-in wind speed*” e, para valores superiores a 25 m/s, a potência transferida ao eixo da turbina é cortada, ponto denominado “*cut-out wind speed*”, visto que, tais velocidades poderiam causar danos a estrutura do sistema [15].

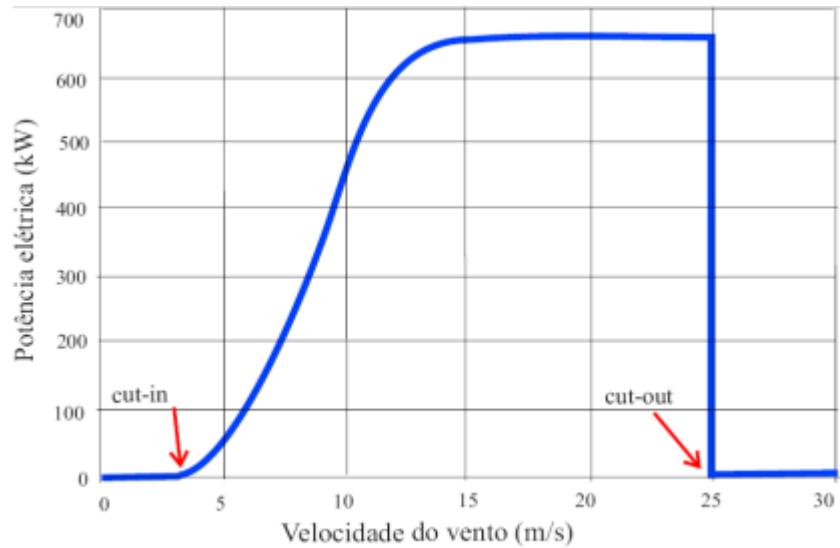


Figura 2.3 - Curva típica de potência elétrica em função do vento de uma turbina eólica de 660 kW com controle *Pitch* [15].

Ainda em relação a última figura constata-se que a partir do valor de 13 m/s a potência gerada pelo gerador se torna constante com o aumento da velocidade do vento, fato este que resulta uma relação custo-benefício mais vantajosa para as turbinas. Isto se deve ao fato que, para ventos acima desse valor, que raramente ocorrem, não se teria ganhos maiores no processo construtivo do gerador em função da factibilidade de funcionamento, sob tais condições, em apenas algumas horas no ano.

No que tange aos tipos de turbinas eólicas consideradas como possibilidades para exploração da fonte energética aqui referida, reconhece-se que os principais tipos existentes podem ser classificados quanto ao: posicionamento do seu eixo, disposição das pás em relação à incidência do vento e pelo número de pás. As de eixo horizontal são as mais utilizadas na atualidade uma vez que se apresentam com maiores rendimentos e por possuírem uma construção mais simples quando comparadas com as de eixo vertical [15].

Vale lembrar que as turbinas eólicas, devido às variações repentinas do vento, demandam um controle da potência disponibilizada no seu eixo. Isto é proporcionado através de dispositivos

---

## **Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona**

---

desenvolvidos para minimizar estes efeitos e, caso tais recursos não sejam empregados, há fortes possibilidades de danos para à estrutura mecânica [15]. Objetivando atender a tais requisitos conta-se, na atualidade, com tecnologias atuando de forma a introduzir uma perda aerodinâmica “*Stall*”, modificar o ângulo de passo “*Pitch*”, ou ainda, combinando estas estratégias [25].

Explicando melhor, o controle do ângulo de passo – *Pitch Control*: é uma técnica utilizada em turbinas a velocidade variável, onde as pás são projetadas para girarem individualmente, em torno de seu eixo, viabilizando, assim, meios para a redução da área efetiva sobre a qual incidem os ventos elevados (acima do nominal). Tal ação ocorre na forma de mudanças dos ângulos de ataque, que podem ser alterados entre 0° e, por exemplo, 30°.

### **2.2.2. – Geradores elétricos**

Sabe-se que a tecnologia da geração eólico-elétrica no que tange a filosofia da conversão da fonte primária de energia em energia elétrica, se apoia em dois grandes grupos: unidades que se destinam a operar com velocidade fixa, e outras, que empregam velocidade variável. Os sistemas de velocidade fixa empregam geradores assíncronos enquanto que os de velocidade variável podem utilizar geradores síncronos ou assíncronos.

Os sistemas de conversão eólica a velocidade fixa, para os quais os geradores se encontram diretamente ligados à rede CA, fato este que resulta num acoplamento direto e forte com a rede, a velocidade de rotação do eixo será sempre determinada pela frequência do sistema elétrico, independente das variações de velocidade do vento. Por isso todas as perturbações provenientes do sistema eólico possuem fortes interações numa e noutra via com a rede [25]. Esta proposta, muito embora sua simplicidade, robustez e menor preço, diante dos avanços oferecidos pela conciliação da unidade de geração com dispositivos conversores, à

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

---

base da eletrônica de potência, têm sido substituído pela tecnologia fundamentada na operação dos parques eólicos à velocidade variável, em que a conexão com a rede se faz através de conjuntos retificadores e inversores, viabilizando, assim, uma combinação que se mostra bastante atrativa.

Em se tratando dos arranjos baseados em geradores síncronos têm-se, ainda, duas possibilidades quanto à forma de excitação. Uma empregando um rotor bobinado que oferece possibilidade de controle da corrente de campo, e outra, que utiliza um rotor constituído por um imã permanente. Estes arranjos são indicados na Figura 2.4 e Figura 2.5.

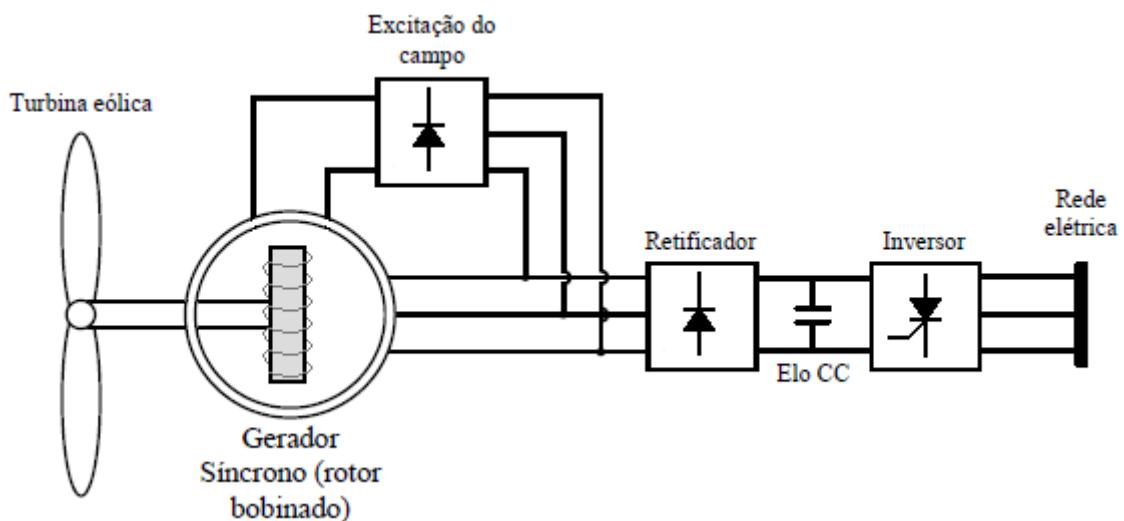


Figura 2.4 - Gerador síncrono a rotor bobinado.

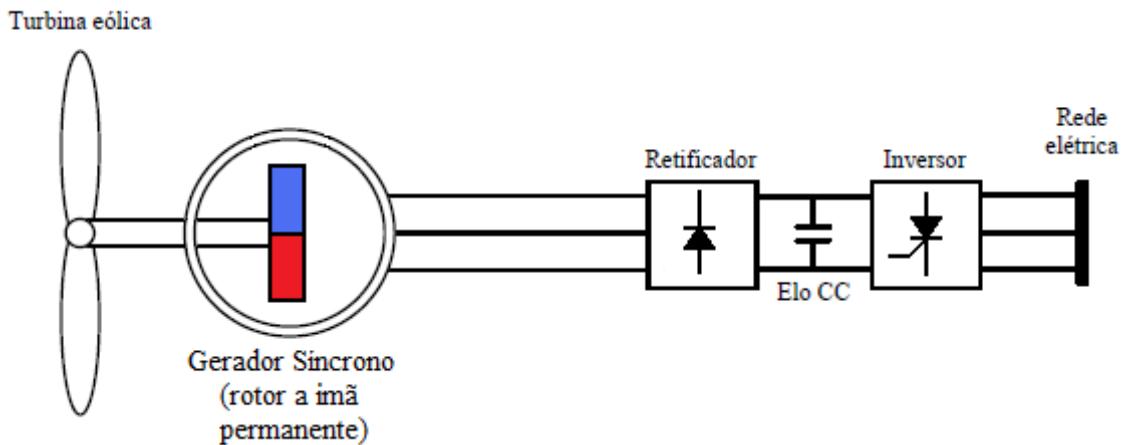


Figura 2.5 - Gerador síncrono a ímã permanente.

Geralmente os geradores utilizados são máquinas especiais, de multipolos, com baixa velocidade de rotação e com um diâmetro grande, quando comparado à outras máquinas de mesma faixa de potência. Tais características possibilitam a ausência da caixa de transmissão de velocidades, o que constitui uma grande vantagem do ponto de vista operativo. O modelo de velocidade variável permite uma variação ampla da velocidade, uma vez que possui os estágios de retificação e inversão.

Para fins deste trabalho, como já mencionado, será utilizada a topologia de velocidade variável com gerador síncrono a ímã permanente, pois esta permite uma maior faixa de operação comparado com as outras topologias e por estar sendo utilizada cada vez mais.

### **2.3. – Concepção do modelo experimental em escala reduzida**

É natural que as representações experimentais encontram-se identificadas com estruturas físicas, como já ditas, em escalas reais e reduzida, cada qual oferecendo propriedades, vantagens, desvantagens, etc., que motivam o uso de uma ou outra estratégia. Assim, arranjos laboratoriais em escala real, baseados em tuneis de vento, turbinas eólicas e

---

## **Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona**

controles, geradores de maior porte, etc., não obstante a atratividade operacional, tais concepções se apresentam com elevados custos e, para muitas aplicações, até mesmo desnecessárias.

O uso de uma composição de unidades equivalentes a um complexo real, em que pese à substituição dos componentes por dispositivos de pequena potência ou mesmo por recursos outros que não os equipamentos físicos propriamente ditos, se apresentam, como em vários outros campos da engenharia, como uma possibilidade que pode congregar o equilíbrio entre custos e adequação aos objetivos desejados.

Focando, de modo mais específico, metas atreladas com a área da Qualidade da Energia Elétrica, a qual se apresenta com vários indicadores de desempenho que poderiam ser estimados mesmo com modelos mais simples, considerou-se a filosofia aqui contemplada. Esta, fundamentalmente, encontra-se alicerçada em uma estrutura física em escala reduzida, com o vento e turbina eólica representados por um motor de corrente contínua controlado com vistas a reprodução das propriedades intrínsecas aos ventos e demais dispositivos complementares associados com as turbinas. Tal dispositivo, por sua vez, encontra-se mecanicamente acoplado a um gerador, este a um conversor de frequência, depois transformador e enfim ao sistema elétrico de potência. As figuras a seguir evidenciam a configuração de uma unidade eólica real e o arranjo equivalente aqui referido [27] e [33].

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

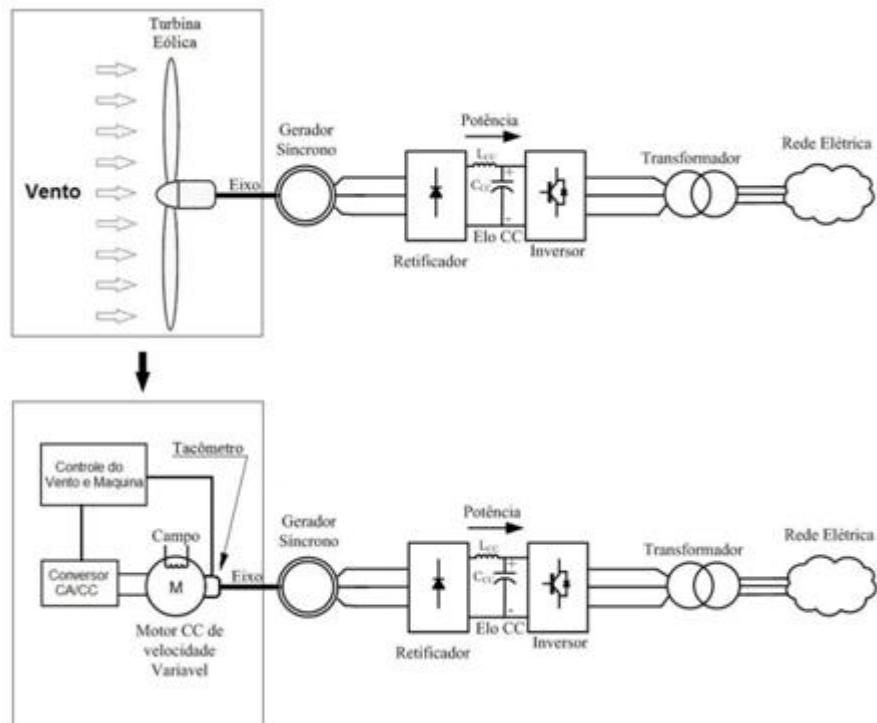


Figura 2.6 – Concepção física da estrutura laboratorial, em escala reduzida, de uma unidade eólica à geração síncrona.

A Figura 2.7 mostra, em consonância com os termos anteriormente apresentados, um diagrama esquemático das unidades principais que perfazem a estrutura física do laboratório concebido, especificado, adquirido e montado.

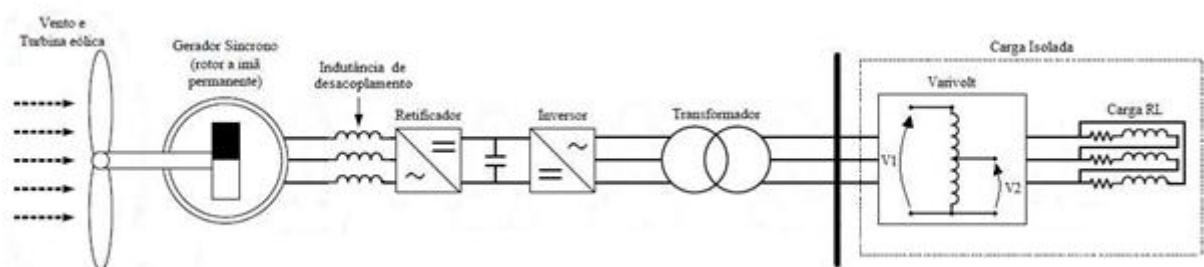


Figura 2.7 – Diagrama esquemático das unidades constituintes do laboratório montado nas instalações físicas da UFU.

O arranjo então idealizado, especificado e montado encontra-se, no momento, disponibilizado em laboratório próprio no Bloco E da Faculdade de Engenharia Elétrica da

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

UFU, como indicado na Figura 2.8. A estrutura foi financiada pelo projeto de P&D de FURNAS. Maiores detalhes sobre os componentes que perfazem o modelo experimental são fornecidos nos itens subsequentes.



Figura 2.8 - Estrutura laboratorial montada.

### a) Motor CC

A Figura 2.9 mostra o motor CC utilizado para fins da reprodução, em seu eixo, da potência disponibilizada pelo conjunto vento-turbina e respectivos controles.

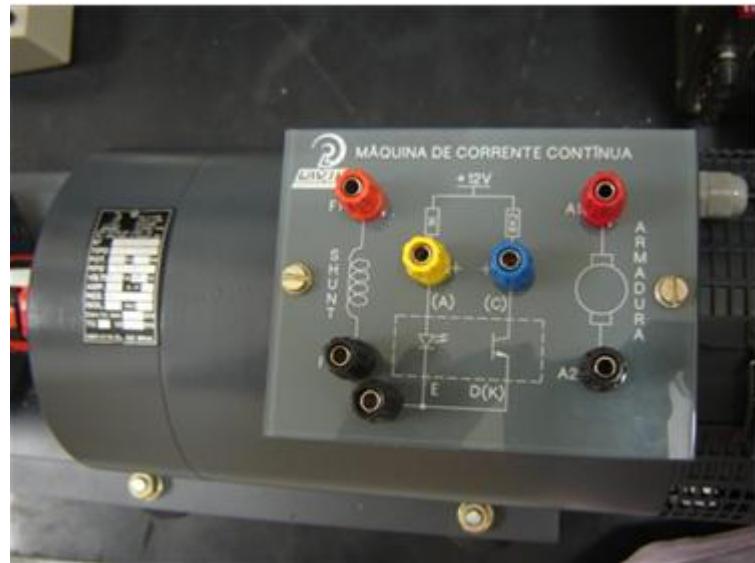


Figura 2.9 - Motor de Corrente Continua.

As principais características do motor são:

- Tensão de Armadura Nominal: 180 V;
- Tensão de Campo Nominal: 180 V;
- Potência Nominal: 1250 W;
- Velocidade Nominal: 1800 rpm.

## b) Gerador

Este corresponde a uma máquina síncrona, trifásica, com rotor bobinado, permitindo que as conexões das bobinas do estator possam ser feitas em delta ou estrela. A máquina utilizada encontram-se mostrada na Figura 2.10.



Figura 2.10 - Gerador síncrono de rotor bobinado.

Os principais parâmetros desta máquina são:

- Potência Nominal: 900 W;
- Velocidade Nominal: 1800 rpm;
- Tensão de Excitação Nominal: 180 V;
- Tensão nominal de Saída:
  - ✓ Ligação Delta: 220 V;
  - ✓ Ligação Estrela: 380 V.

### **c) Retificador**

O retificador em questão consiste numa ponte trifásica formada por diodos, portanto, trata-se de uma unidade de retificação não controlada. Este dispositivo é apresentado na Figura 2.11. Naturalmente, esta unidade corresponde a uma das partes do denominado conversor de frequência, nos termos requeridos para o processo de conversão empregado em instalações eólicas do tipo aqui considerado.

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

---



Figura 2.11 - Retificador trifásico não controlado.

Tendo em vista que, em sistemas reais, o suprimento de um retificador se apresenta com uma indutância que compõe o circuito de comutação e atrelada com a impedância entre a fonte CA e a entrada dos diodos, a Figura 2.12 é indicativa dos recursos utilizados para tal fim. Tal indutância também é conhecida como impedância de desacoplamento do link CC.



Figura 2.12 - Indutâncias de entrada do retificador.

Os reatores empregados se apresentam com as seguintes características:

- Tensão Máxima: 220 V;

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

---

- Indutância Nominal por fase: 102 mH.

### d) Inversor

Para fins da conversão CC-CA foi utilizado um inversor comercial produzido pela empresa *Yaskawa* - modelo V1000, como mostrado na Figura 2.13.

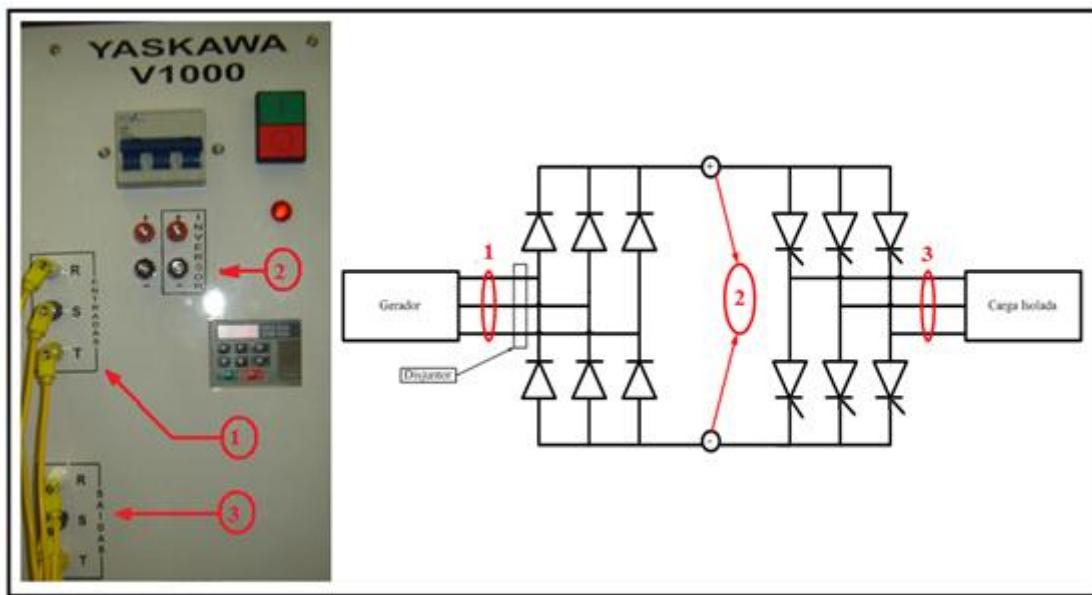


Figura 2.13 - Inversor trifásico.

O inversor utilizado possui:

- Potência Nominal: 5 kW;
- Tensão de Alimentação Máxima: 240 V CA;
- Corrente Máxima: 19,5 A.

Na sequencia são fornecidos alguns parâmetros operacionais utilizados para configurar o inversor de tal forma que seja fornecida uma tensão fixa de 100 volts com uma frequência de chaveamento de 15kHz.

- Tensão de Saída: 100 V E01=23;
- Rampa de Aceleração: 0,1 s E02=33;

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

---

- Rampa de Desaceleração: 0,1 s E02=33;
- Frequência de Chaveamento: 15 kHz E02=33;
- Controle: Vetorial E02=33;
- Tensão Mínima do Link DC: 160 V E02=33;
- Proteção de Sub-Corrente: Desativado E02=33;

O link DC utilizado foi o do inversor, o valor do capacitor não é informado no manual.

### e) Transformador

O transformador trifásico destinado a interconectar o inversor à carga suprida encontra-se indicado na Figura 2.14.



Figura 2.14 - Transformador trifásico.

Suas principais características são:

- Potência Nominal: 1500 kVA;
- Tensão Máxima: 220 V;

- Conexão:
  - ✓ Primário: Estrela;
  - ✓ Secundário: Estrela.
- Relação de Transformação: 1:1.

### f) Carga

Embora esta não seja uma característica limitante, para maior clareza da operacionalidade do complexo montado, a opção feita nesta dissertação foi direcionada para o suprimento de uma carga isolada. Esta foi concebida na forma de resistências e indutâncias conectadas em série, formando um arranjo trifásico em estrela, como ilustrado na Figura 2.15 e Figura 2.16.

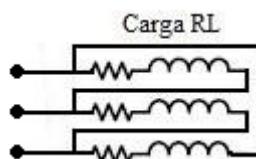


Figura 2.15 - Esquema de ligação da carga trifásica RL.

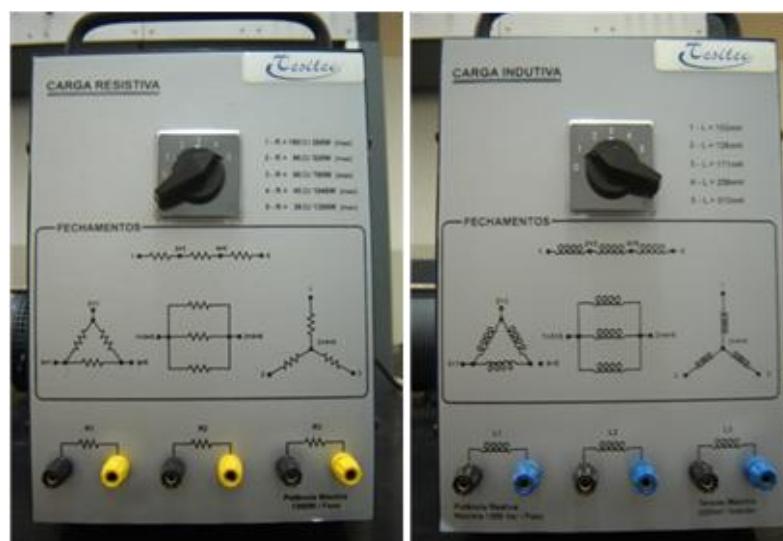


Figura 2.16 - (a) Resistências variáveis; (b) Indutâncias variáveis.

---

## Capítulo II – Fundamentos e concepção física para uma estrutura experimental em escala reduzida de uma unidade eólica à geração síncrona

---

As principais características destes componentes são:

- Resistências:
  - ✓ Valor Nominal por Fase:  $180\ \Omega$ ;
  - ✓ Potência Máxima: 1300 W;
  - ✓ Tensão Máxima: 220 V.
- Indutâncias:
  - ✓ Valor Nominal por Fase: 102 mH;
  - ✓ Potência Máxima: 1300 W;
  - ✓ Tensão Máxima: 220 V.

Tendo em vista que os parâmetros acima são constantes, para fins da variação da potência da carga, caso necessário, disponibilizou-se um *Varivolt* interconectando o arranjo equivalente ao consumo ao transformador anteriormente referido. Na Figura 2.17 é ilustrado este equipamento, o qual permite alterar a tensão aplicada entre zero e 220 V, de forma manual.



Figura 2.17 - Varivolt para o controle da carga.

## **2.4. – Considerações Finais**

Em atenção aos objetivos delineados na introdução do presente capítulo, o mesmo compreendeu ações direcionadas para o esclarecimento e modelagem matemática da fonte primaria de energia, da turbina eólica e dos controles tipicamente empregados na composição dos arranjos comercialmente encontrados no mercado.

No que tange a filosofia operacional selecionada para os trabalhos desta pesquisa, tendo em vista a difusão cada dia maior da tecnologia alicerçada no emprego de turbinas à velocidade variável suprindo geradores síncronos, esta foi a opção feita para fins da seleção do complexo de geração objeto das montagens laboratoriais.

Tendo, pois por foco a representação de uma unidade de geração de energia elétrica nos termos acima postos os trabalhos como visto foram centrados na definição física, especificação e aquisição dos componentes indicados.

Diante do exposto, as ações posteriores, como contemplados no capítulo subsequente, foram conduzidas de forma a estabelecer a montagem e operacionalidade do arranjo, conforme as leis que regem o funcionamento de uma unidade de geração à velocidade variável e empregando geradores síncronos a imã permanente.

# CAPÍTULO III

---

## 3. Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

### 3.1. – Considerações Iniciais

Em consonância com os propósitos definidos nos capítulos anteriores, resta que, dentro do contexto da estrutura laboratorial sob consideração, de um modo geral, as unidades físicas que a constituem encontram uma boa correspondência com as partes existentes num sistema real encontrado em campo. Exceção se faz presente quando da modelagem do conjunto vento-turbina-controles, conjunto este simplificadamente representado por um motor de corrente contínua destinado a reproduzir, com o rigor que se faz necessário, as propriedades intrínsecas aos torques disponibilizados para o eixo do gerador destinado à conversão da energia mecânica em elétrica.

Muito embora a apresentação dos componentes físicos descritos anteriormente, existem dois pontos desafiadores que são merecedores de considerações, investigações e proposição de soluções. Ambos relacionados com softwares de controle.

Um primeiro se refere à necessidade do motor de corrente contínua ser comandado de forma a produzir condições tipicamente encontradas em campo, nos termos definidos pelas características dos ventos, da turbina eólica propriamente dita e dos controles anteriormente ressaltados para os ajustes dos processos de transferência e delimitações da energia mecânica disponibilizada.

---

### **Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software**

Outro ponto merecedor de destaque, e que não será tratado em maiores detalhes nesta dissertação, diz respeito ao software de controle do conjunto retificador-inversor e respectivas condições operativas para o controle do fornecimento de potência ativa e reativa aos barramentos CA de conexão ou às cargas isoladas supridas.

Para o momento, apenas o motor de corrente contínua será focado e, à luz disto, os trabalhos contemplados no presente capítulo se prestam, sobretudo, ao estabelecimento das bases do software de gerenciamento do funcionamento do motor CC equivalente, o qual será alicerçado no programa *LabView*, acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*, empregando, portanto, uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*.

Dentro deste foco, o presente capítulo encontra-se direcionado à descrição das etapas e desenvolvimentos realizados para fins da definição da estrutura de hardware e software de controle do motor CC, nos termos supra caracterizados e, por fim, sua implementação computacional e respectivos testes preliminares de desempenho do produto gerado. Vale ressaltar que, para o presente estágio do trabalho, os estudos considerados ficam restritos à validação apenas da correlação entre as propriedades do vento incidente e as potências mecânicas disponibilizadas para o eixo do gerador. Os demais aspectos serão objeto de discussões nos capítulos posteriores.

#### **3.2. – Modelagem do conjunto vento-turbina-controles**

Muito embora o tema em questão tenha sido explorado com relativo grau de detalhes em capítulo anterior, visando o estabelecimento de uma lógica para a representação do conjunto primário de energia (vento-turbina-controle), apresentam-se, na sequência, os

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

principais conceitos que nortearam os fundamentos do software de gerenciamento da operação do motor CC equivalente.

#### a) Potência mecânica

As equações representativas da fonte primária de energia, o vento, e respectiva turbina e controles, são sintetizadas a seguir. Vale observar que o significado das grandezas que compõem a equação já foi devidamente detalhado no capítulo anterior, motivo pelo qual não são tecidos maiores comentários neste ponto.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v_{vento}^3 \quad (3.1)$$

O coeficiente  $C_p$ , expressando a relação entre a potência útil disponível e a extraída da turbina eólica, como já ressaltado, depende do ângulo de passo  $\beta$  das pás da turbina e do coeficiente adimensional  $\lambda$  (razão de velocidade das pás). Esta ultima grandeza que é dada por:

$$\lambda = \frac{\omega_{turbina} R}{v_{vento}} \quad (3.2)$$

Onde:

$R$  - raio da turbina [m];

$\omega_{turbina}$  - velocidade angular das pás [rad/s].

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

A Figura 3.1 mostra a dependência entre o coeficiente de potência  $C_p$ , e a taxa de velocidade  $\lambda$  tomando o ângulo  $\beta$  como parâmetro. Dentro deste conceito encontra-se inserida a ação dos controles

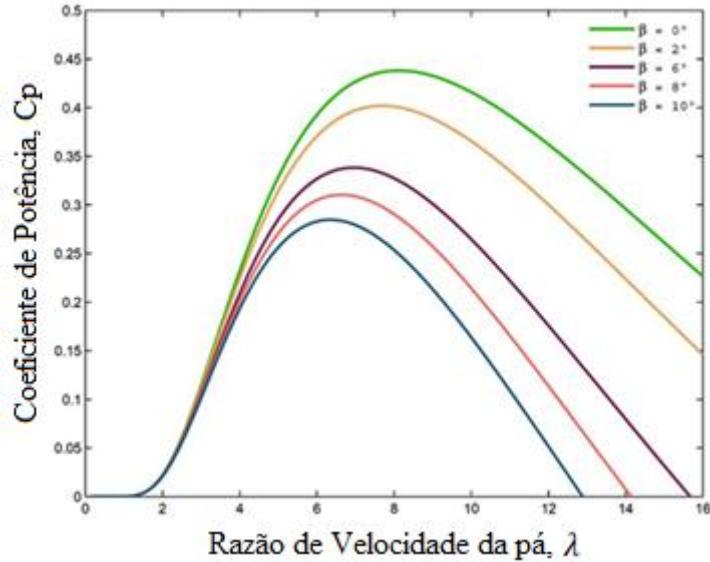


Figura 3.1 - Coeficiente de potência em função da razão de velocidade da pá [14].

#### b) Característica do vento

Quanto às características intrínsecas do vento este pode ser modelado, em sua forma mais genérica, através da equação (3.3), extraída de [15].

$$V_{vento} = v_{base} + v_{rajada} + v_{rampa} + v_{ruído} \quad (3.3)$$

Onde:

$v_{base}$  – velocidade base [m/s];

$v_{rajada}$  – velocidade da componente rajada [m/s];

$v_{rampa}$  – velocidade da componente rampa [m/s];

$v_{ruído}$  – velocidade do ruído presente no vento [m/s].

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

A componente base do vento é definida pela equação (3.4):

$$v_{base} = K_B \quad (3.4)$$

Onde:  $K_B$  – constante média da velocidade do vento [m/s];

A componente rajada é representada em (3.5) e (3.6):

$$v_{rajada} = \begin{cases} 0 & t < t_{s\_rajada} \\ v_{rajada} & t_{s\_rajada} < t < t_{s\_rajada} + T_{rajada} \\ 0 & t > t_{s\_rajada} + T_{rajada} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$v_{rajada} = \left(\frac{R_{MAX}}{2}\right) \left\{ 1 - \cos 2\pi \left[ \left(\frac{t}{t_{s\_rajada}}\right) - \left(\frac{t_{s\_rajada}}{T_{rajada}}\right) \right] \right\} \quad (3.6)$$

Onde:

$t$  – tempo [s];

$t_{s\_rajada}$  – tempo inicial da rajada [s];

$T_{rajada}$  – duração da componente rajada [s];

$R_{MAX}$  – valor máximo da rajada [m/s].

A componente rampa, por sua vez, compreende a formulação indicada a seguir:

$$v_{rampa} = \begin{cases} 0 & t < t_{s\_rampa} \\ v_{rampa} & t_{s\_rampa} < t < t_{f\_rampa} \\ 0 & t > t_{f\_rampa} \end{cases} \quad (3.7)$$

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

$$v_{rampa} = RAM_{MAX} \left( 1 - \frac{(t - t_{f\_rampa})}{t_{s\_rampa} - t_{f\_rampa}} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

$t_{s\_rampa}$  – tempo inicial da componente rampa [s];

$t_{f\_rampa}$  – tempo final da componente rampa [s];

$RAM_{MAX}$  – valor máximo da rampa [m/s].

O componente ruído constitui-se numa componente de baixa amplitude e sempre se faz presente, de forma aleatória, no sinal do vento. Este efeito é caracterizado pelas expressões (3.9), (3.10) e (3.11).

$$v_{ruido} = 2 \sum_{i=1}^N [S_V(\omega_i) \Delta\omega]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (3.9)$$

$$\omega_i = \left( i - \frac{1}{2} \right) \Delta\omega \quad (3.10)$$

$$S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \left[ 1 + \left( \frac{F \omega_i}{\mu \pi} \right)^2 \right]^{\frac{4}{3}}} \quad (3.11)$$

Onde:

$\Delta\omega$  – variação da velocidade [rad/s];

$\phi_i$  – variável randômica com densidade de probabilidade uniforme no intervalo 0 a  $2\pi$ ;

$K_N$  – coeficiente de arrasto da superfície;

$F$  – escala de turbulência;

$\mu$  – velocidade principal do vento na altura de referência [m/s].

### 3.3. – Modelagem do motor de corrente contínua

Motores CC, quanto a sua constituição física, tipicamente, consistem de um enrolamento de armadura e um circuito de excitação de campo. Este último, no que tange a sua forma de conexão com a armadura origina quatro possibilidades: independente, paralelo, série ou composto. Para os fins aqui almejados, vários trabalhos anteriores [23] apontam para o fato que o emprego da excitação de campo independente se apresenta como opção bastante atrativa [27].

Nos termos acima postos, o motor selecionado pode ser modelado, via técnicas no domínio do tempo, como determinado pelas equações (3.12), (3.13) e (3.14), que representam, respectivamente, o circuito de armadura, o de campo e o comportamento mecânico [29][30]:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_{af} i_f(t) \omega(t) \quad (3.12)$$

$$V_f(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (3.13)$$

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + C_v \omega(t) + T_{mec} = k_{af} i_f(t) i_a(t) \quad (3.14)$$

Onde:

$V_a$  – tensão aplicada na armadura [V];

$R_a$  – resistência do enrolamento da armadura [ $\Omega$ ];

$i_a$  – corrente da armadura [A];

$L_a$  – indutância do enrolamento da armadura [H];

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

$k_{af}$  – constante do motor [Wb/rad];

$i_f$  – corrente de campo [A];

$\omega$  – velocidade mecânica angular [rad/s];

$V_f$  – tensão aplicada ao campo [V];

$R_f$  – resistência do enrolamento de campo [ $\Omega$ ];

$L_f$  – indutância do enrolamento de campo [H];

$J$  – momento de inércia do motor [ $\text{kg}^*\text{m}^2$ ];

$C_v$  – amortecimento viscoso, normalmente desconsiderado para pequenas máquinas;

$T_{mec}$  – torque mecânico [ $\text{N}^*\text{m}$ ].

Em adição, (3.15) e (3.16) oferecem as expressões para o conjugado eletromagnético -  $T_{ele}$  desenvolvido no motor e a potência disponível em seu eixo,  $P_{mec}$ :

$$T_{ele} = k_{af} * i_f(t) * i_a(t) \quad (3.15)$$

$$P_{mec} = T_{mec} * \omega(t) \quad (3.16)$$

### 3.4. – Composição física da estrutura laboratorial

A Figura 3.2 apresenta as partes integrantes do complexo laboratorial concebido para fins da representação experimental. Na figura podem ser evidenciadas as seguintes partes:

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

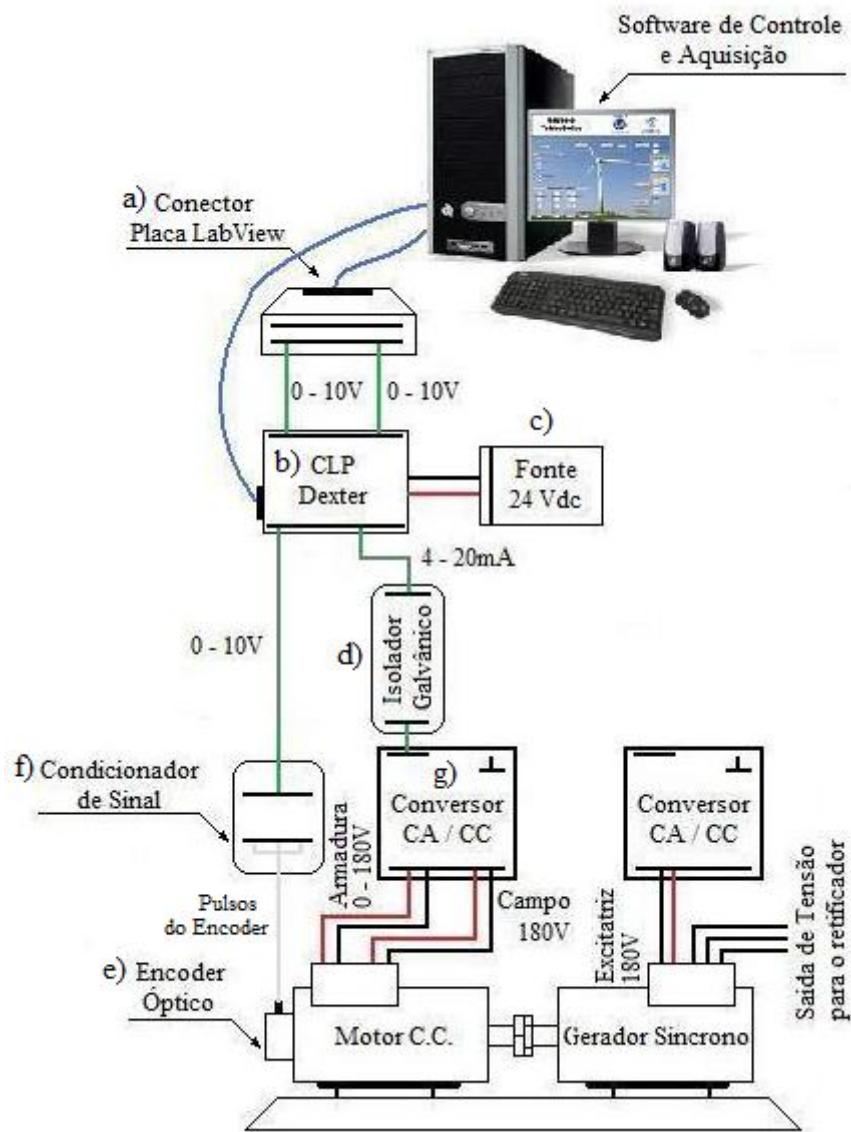


Figura 3.2 - Sistema de controle do motor CC.

- **Software de Supervisão:** o qual tem por função estabelecer a interface de controle;
- **Placa de Aquisição e Controle:** responsável pela comunicação com o software de controle e o sistema de potência;

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

- **CLP Dexter:** destinado à conversão de sinais de controle de frequência para tensão e tensão para corrente;
- **Fonte de Alimentação:** para o fornecimento da tensão contínua de 24 V aos equipamentos;
- **Isolador Galvânico:** destinado a desacoplar o sistema de aquisição da parte de potência;
- **Encoder óptico:** visando a captação dos movimentos do eixo do motor CC e respectiva conversão em pulsos de frequências equivalentes com a rotação do eixo;
- **Condicionador de Sinal:** destinado a isolar o encoder óptico do CLP e adequar o nível de tensão;
- **Conversor CA/CC:** responsável pelo controle da excitação da armadura do motor de corrente contínua.

As diversas unidades constituintes da estrutura física indicadas na figura encontram-se detalhadas na sequência.

#### a) Placa de Aquisição e Controle

Esta se destina ao processo de comunicação entre o software e os dispositivos de controle da bancada e corresponde ao PCI-1602 mostrado na Figura 3.3. A placa recebe todos os comandos efetuados pelo software de supervisão e os converte em sinais elétricos capazes de comandar o motor de corrente contínua. Ainda, a placa tem por função captar o sinal que representa a velocidade de rotação do MCC, que é usado como referência no software de supervisão.



Figura 3.3 - Placa de Aquisição PCI-1602.

As principais características desta placa são [31]: conexão PCI; taxa de amostragem contínua A/D de 100k amostras/segundo; conversor A/D de 16 bits; conversor D/A de 16 bits; 16 canais analógicos diferenciais ou 32 canais analógicos de ponto comum; 16 saídas digitais e 16 entradas digitais.

### b) CLP Dexter

Devido a impossibilidade da placa de aquisição fornecer na saída uma corrente variável e de realizar a contagem de pulsos do encoder óptico sem comprometer sua capacidade de processamento, foi utilizado o Controlador Lógico Programável (CLP)  $\mu$ DX200, apresentado na Figura 3.4. Este possui 10 entradas analógicas (E1 a E10) com faixa de entrada de tensão ou corrente de 0 - 10V e 0 – 20mA, respectivamente, sendo que as entradas E9 e E10 são de alta velocidade, e seis saídas analógicas (S1 a S6) com faixa de saída de tensão ou corrente de 0 - 10V e 0 – 20mA [32].

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

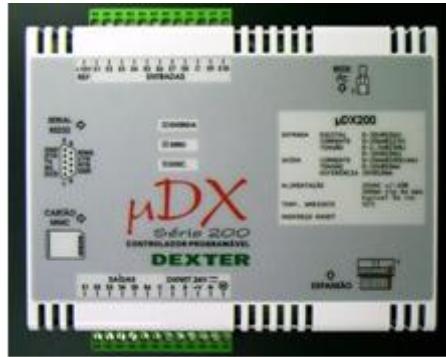


Figura 3.4 - CLP utilizado no processo.

O controlador  $\mu$ DX200 utiliza um software de programação PG (Programador Gráfico), composto de Editor e Compilador, o qual se pode elaborar ou modificar programas para o CLP na linguagem PDE (Programação por Diagrama Esquemático). Esta linguagem foi desenvolvida pela *DEXTER* como um meio de programação intuitiva, de fácil compreensão e que dispensa conhecimentos especializados. O resultado destes trabalhos, na forma de um programa, encontra-se sintetizado na Figura 3.5.

O principal papel do CLP neste projeto foi de minimizar o processamento da placa de aquisição, visto que o cálculo da velocidade de rotação real do motor demanda certa quantidade de memória.

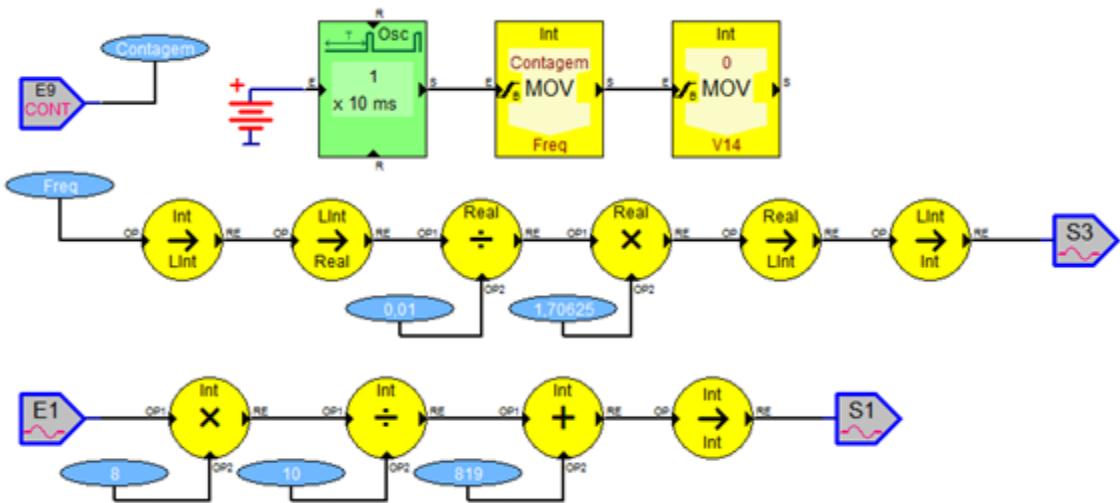


Figura 3.5 - Código do CLP.

### c) Fonte DC

Objetivando a obtenção da tensão contínua de 24 V utilizou-se uma fonte chaveada da *Phoenix Contact (Trio Power)* apresentada na Figura 3.6.



Figura 3.6 - Fonte chaveada *Trio Power* da *Phoenix Contact*.

**d) Isolador Galvânico**

Devido à necessidade de se isolar o sistema de controle do sistema de potência, foi utilizado um transdutor analógico (ABB ETI 30) para corrente contínua, como indicado na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Isolador galvânico CC.

**e) Encoder Óptico**

Para um controle eficiente do sistema eólico é necessário o conhecimento da velocidade de rotação do eixo do conjunto motor-gerador, informação esta usada na determinação do coeficiente de potência da turbina. Para tanto foi adquirido o encoder óptico apresentado na Figura 3.8.



Figura 3.8 - Encoder Óptico.

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

Como pode ser visto, o tacômetro é ligado diretamente ao eixo do motor CC, sendo acoplado um disco com 60 furos, o qual fornece sessenta pulsos por rotação. A cada momento que um feixe de luz proveniente de um emissor óptico atravessa um furo, este excita um transistor que fornece um pulso de tensão. No esboço apresentado na Figura 3.9 é possível ter uma noção deste equipamento.

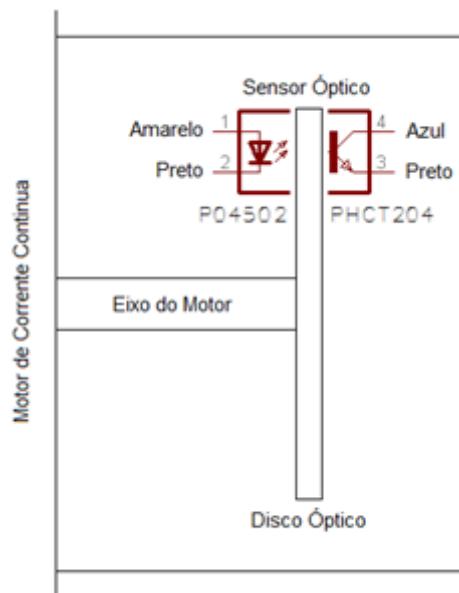


Figura 3.9 – Esboço da estrutura do tacômetro (visão de topo).

#### f) Condicionador de Sinal

Este componente foi desenvolvido para readequar o sinal obtido do encoder óptico aos padrões requeridos pelo CLP e é apresentado na Figura 3.10. Este componente, além de isolar o sinal do sistema de aquisição, promove a adequação dos valores de tensão para a faixa de leitura (0 – 10V) e, principalmente, reforça o sinal através de estágios de amplificação e buffers, remodelando a forma de onda para uma sequência de pulsos retangulares.

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

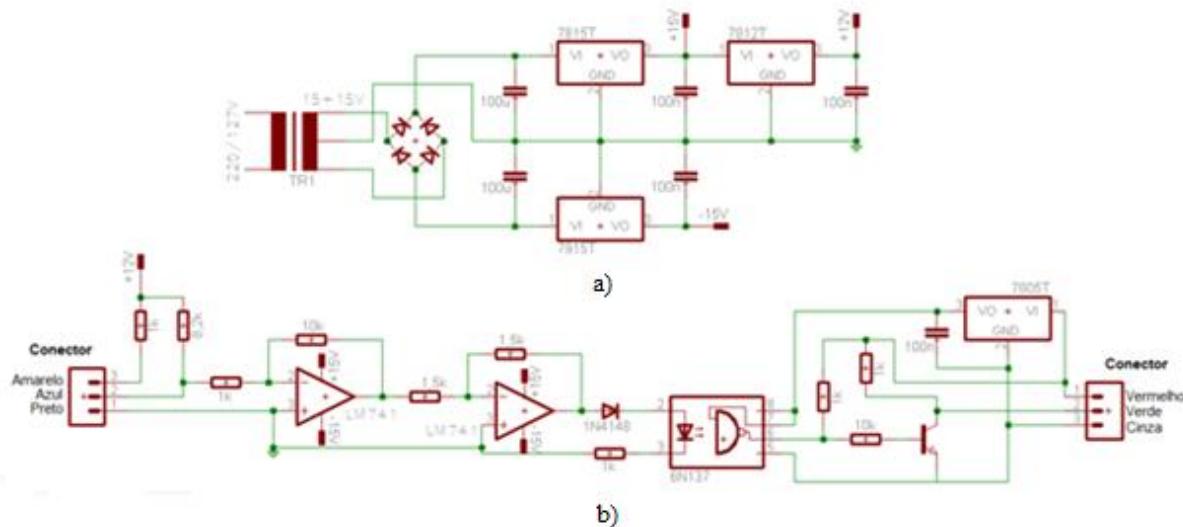


Figura 3.10 - Circuito do Condicionador de sinal.

A Figura 3.11 apresenta o módulo condicionador e a Figura 3.12 mostra um descriptivo das conexões de todas as entradas e saídas do circuito montado.

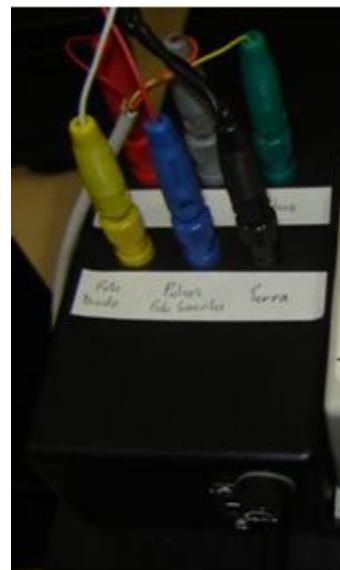


Figura 3.11 - Condicionador de Sinal.



Figura 3.12 - Descritivo das conexões do condicionador.

### **g) Conversor CA / CC**

O sistema de controle do motor no que tange às suas unidades de potência utiliza dois conversores CA/CC (RCA 18008 e 18014), indicados na Figura 3.13.



Figura 3.13 - Conversores CA/CC.

Cada conversor possui duas saídas, sendo uma fixa em 180 V e outra variável de 0 – 180 V. Esta última pode ser controlada manualmente através de um botão giratório com as referências de tensão impressas no painel, já o outro é controlado através de um sinal de corrente variável de 4 – 20mA. O primeiro conversor tem o papel de controlar o circuito de

---

### **Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software**

campo do gerador através da aplicação de tensão de 0 – 180 V, enquanto que o segundo é utilizado para controlar o motor de corrente contínua. No caso do motor este tem sua alimentação de campo fornecida diretamente pela saída fixa do conversor, já a armadura é alimentada pela saída variável que é responsável pelo controle de velocidade do motor.

### **3.5. Instrumentos de Aquisição**

Para a aquisição dos sinais de tensão e corrente provenientes dos vários pontos do gerador eólico-elétrico em escala, foram utilizados dois equipamentos eletrônicos, cada um servindo para certo ponto e tipo de medição. Na sequência é apresentado as especificações de cada equipamento.

#### **a) Qualímetro**

Este equipamento é um registrador de parâmetros de qualidade de energia elétrica, a Figura 3.14 o apresenta. Dentre suas várias aplicações tem-se: oscilografias (registro da forma de onda das tensões e correntes) das perturbações na tensão (Variações Momentâneas de Tensão “sag, swell”, % DHT, variações de frequência). Análise de harmônicos das correntes e Estudos da demanda e otimização do uso de energia, entre outros. Ele foi utilizado para fazer as aquisições de tensão e corrente alternada nos pontos 2 (perfil e detalhes), 4 (perfil) e 5 (perfil).



Figura 3.14 - Registrador de parâmetros de qualidade MARH-21 993.

Algumas de suas características são apresentadas na sequência:

- 3 canais de tensões (neutro comum): 0 a 540 Vrms;
- 3 canais para correntes: 0 a 11 A;
- Amostragem de 64, 124 ou 192 por ciclo dependendo do modo de operação escolhido;
- Período de integração de 100ms a 1 hora.

### **b) Osciloscópio**

O osciloscópio utilizado foi o TPS 2024 da TEKTRONIX este equipamento é apresentado na Figura 3.15. Sua principal função na aquisição dos dados do laboratório foi aquisicionar os valores de tensão e corrente contínua no ponto 4 e fazer as medições detalhadas de corrente e tensão nos pontos 4 e 5.



Figura 3.15 - Osciloscópio da Tektronix TPS 2024.

Suas principais características são:

- Largura de banda de 100MHz e 200MHz;
- Taxa de amostragem até 2GS/s em tempo real;
- 2 ou 4 canais isolados;

### **3.6. – Software para modelagem do Vento – Turbina - Controle**

Uma vez definidas as equações características e representativas do conjunto vento-turbina-controles e também as que regem a operação de um motor CC, resta, agora, combinar tais premissas com os recursos físicos supra mencionados para se atingir um desempenho mecânico para o motor nos termos definidos pela fonte primária de energia eólica. Para tanto, a combinação recaiu sobre o desenvolvimento de um software o qual produzirá os efeitos desejáveis de uma turbina eólica real no laboratório, como esclarecido a seguir.

#### **3.6.1. - Linguagem de Programação**

O software *LabView* apresenta uma linguagem de programação gráfica que usa ícones ao invés de linhas de texto para criar aplicações [28]. No *LabView* é possível construir uma

---

### **Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software**

---

interface de usuário com uma diversidade de objetos e ferramentas, a qual é conhecida como Painel Frontal e recursos correlatos.

#### **3.6.2. - Interfaces**

Com a intenção de propiciar uma visualização amigável do sistema a ser controlado foram desenvolvidas duas telas. A primeira contém os campos a serem preenchidos com os parâmetros da turbina eólica, do motor de corrente contínua e das características do perfil de vento aplicado na turbina. Já a segunda encontra-se associada com os dados obtidos com a simulação do sistema.

##### **3.6.2.1. - Tela inicial**

A Figura 3.16 mostra a tela inicial elaborada e os campos a serem preenchidos com os parâmetros necessários para o controle desejado. A mesma foi desenvolvida de modo a considerar todos os parâmetros atrelados com a modelagem de uma turbina eólica e os campos associados com dados do motor CC.

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

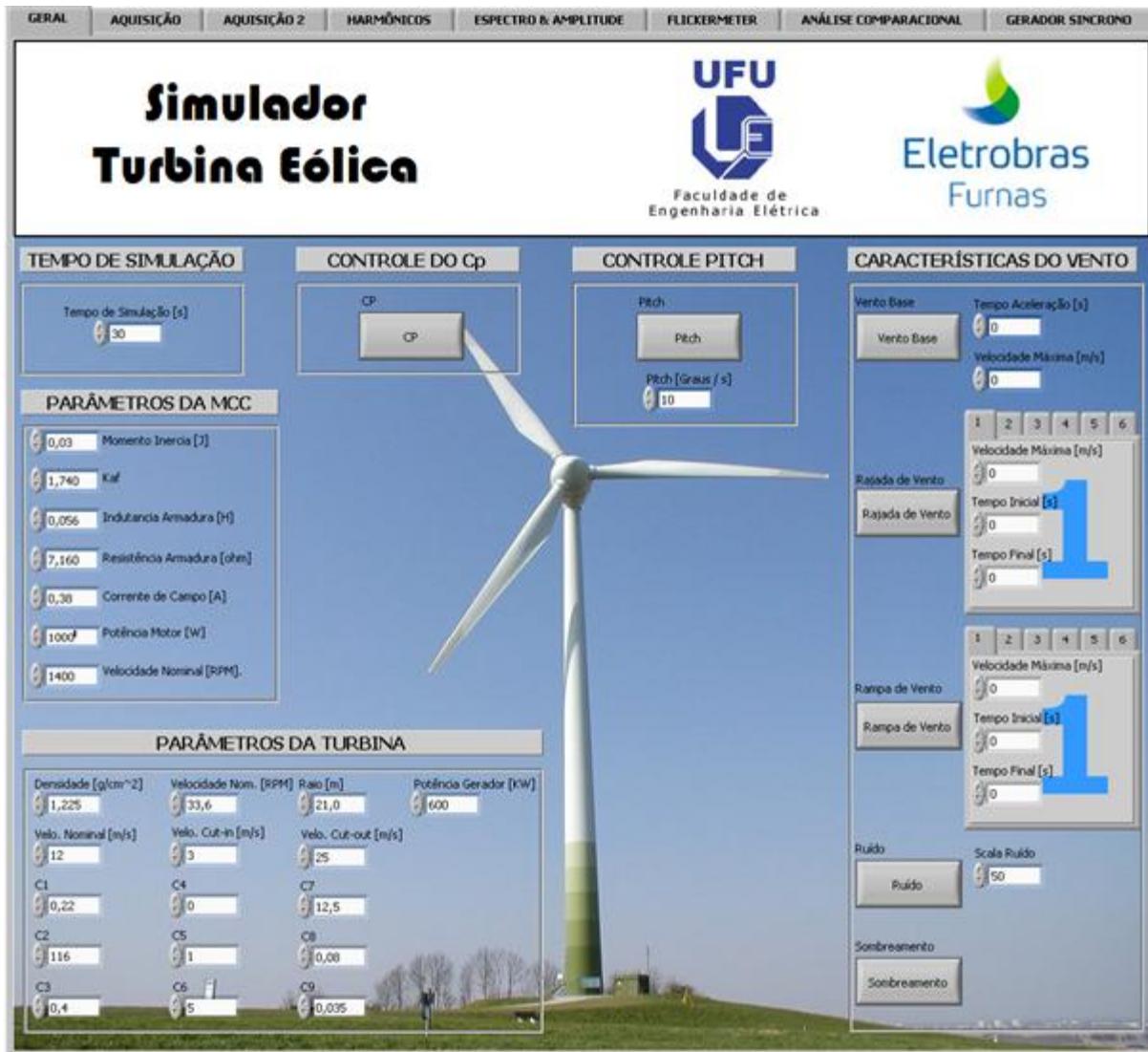


Figura 3.16 - Interface Inicial do Software.

Como se constata, a tela em pauta se apresenta com os seguintes campos:

- Tempo de Simulação;
- Características do Vento (Apesar de estar presente na tela inicial, o sombreamento de torre não foi considerado nas simulações);
- Parâmetros da Turbina;
- Parâmetros do motor CC;
- Controle do  $C_p$ ;

---

**Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida:  
hardware e software**

---

- Controle *Pitch*.

### **3.6.2.2. - Tela de Aquisição e Análise**

Nesta tela, ilustrada na Figura 3.17, estão todas as informações relativas aos parâmetros fornecidos, e ainda, oferece um visual do banco de dados representativos dos fenômenos modelados.

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software



Figura 3.17 - Tela de análises do software.

Pode-se notar que na aba *Aquisição* encontram-se três blocos de visualização e/ou controle, todos para facilitar a aquisição e controle dos testes simulados na bancada, sendo eles;

- Controle;
- Dados Aquisicionados;
- Armazenamento de Dados.

---

### **Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software**

O software implementado no ambiente Labview fornece os seguintes dados: velocidade do vento, coeficiente de potência, velocidade de rotação do eixo da turbina, potência mecânica disponibilizada ao gerador, torque mecânico encontrado no eixo do gerador, valor da corrente e tensão de armadura injetado no motor de corrente contínua para o seu controle de velocidade.

Todas as informações adquiridas durante a simulação podem ser armazenadas em um arquivo de texto. O documento é salvo com a extensão (.ste).

#### **3.6.3. - Código de programação**

O controle da operação do simulador experimental destina-se a acionar o motor CC através da variação da tensão de excitação da armadura, conforme determinado pelo software de gerenciamento da instalação, cujo fluxograma encontra-se mostrado na Figura 3.18.

**Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida:  
hardware e software**

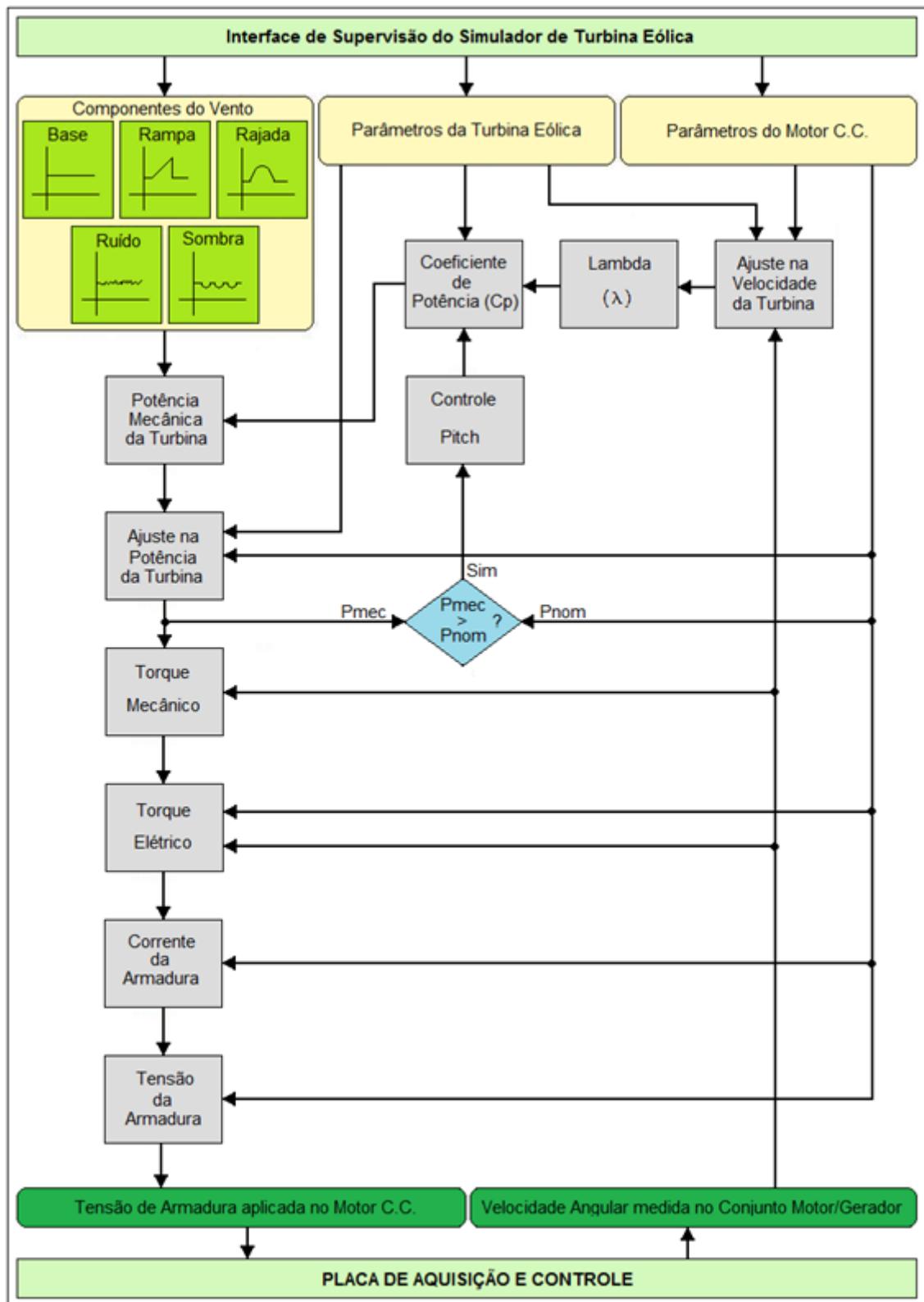


Figura 3.18 - Fluxograma do código do software.

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

Inicialmente são definidos todos os parâmetros pertinentes ao sistema eólico simulado, do perfil de vento aplicado na turbina e dos valores referentes ao motor CC. Estes são, na sequencia, utilizados para o cálculo do torque equivalente da turbina eólica simulado pela máquina CC.

A lógica utilizada pelo programa consiste em:

- Inserção dos dados de entrada:  $V_f$  – Tensão de Campo;  $R_f$  – Resistência de Campo;  $R_a$  – Resistência de Armadura;  $L_a$  – Indutância de Armadura;  $K_{af}$  – Constante da Força Eletromotriz;  $\rho$  – Densidade do Vento;  $C_p$  – Coeficiente de Potência (Seleção);  $R$  – Raio da Turbina;  $J$  – Momento de Inércia;  $v_{vento}$  – Velocidade vento.
- Processamentos para: determinação da velocidade do eixo do motor em rpm; conversão da velocidade de [rpm] para [rad/s]; ajustar a velocidade do motor referenciando-a a faixa de operação da turbina eólica; calcular a razão de velocidade; determinar o coeficiente de potência  $C_p$ ; calcular a potência mecânica fornecida pela turbina; definição do ângulo *Pitch* ( $\beta$ ); ajustar a potência da turbina referenciando-a ao valor nominal da máquina de corrente contínua; determinação do torque elétrico a ser gerado pela máquina de corrente contínua; definição da corrente de armadura do motor CC; cálculo da tensão de armadura do motor CC.

O ANEXO 1 apresenta o código principal de programação contemplando todas as tarefas acima estipuladas.

---

### **3.7. – Avaliação de desempenho da representação da fonte primária de energia**

Uma vez concretizadas todas as etapas anteriores chega-se, então, a estrutura de hardware e software do simulador experimental. Complementarmente a esta unidade da bancada laboratorial, os demais componentes do complexo correspondem a dispositivos físicos cujas respostas encontram-se diretamente atreladas com seus princípios operativos, a não ser pelo inversor de frequência, o qual, todavia, já foi adquirido com um software de controle estabelecido e inserido com algumas limitações, as quais serão expostas no próximo capítulo, portanto resta, para o momento, o início dos trabalhos relacionados com a realização de testes de desempenho do conjunto.

Empregando, pois o conjunto obtido, num primeiro momento foram feitos ensaios objetivando verificar a funcionalidade do simulador no que se refere as suas propriedades quanto à reprodução, para o momento, apenas do vento e respectiva correlação em termos da energia disponibilizado no eixo da turbina. Para tanto, buscando expressar as condições reais para o vento foi simulada uma situação tal que o vento se apresenta contendo: sua velocidade base constante, ruídos, uma rajada e uma rampa. O resultado desta primeira avaliação indicado na Figura 3.19 evidencia o desempenho do conjunto formado pelo software apresentado (Figura 3.16) agindo sobre o motor de corrente contínua e seus acessórios.

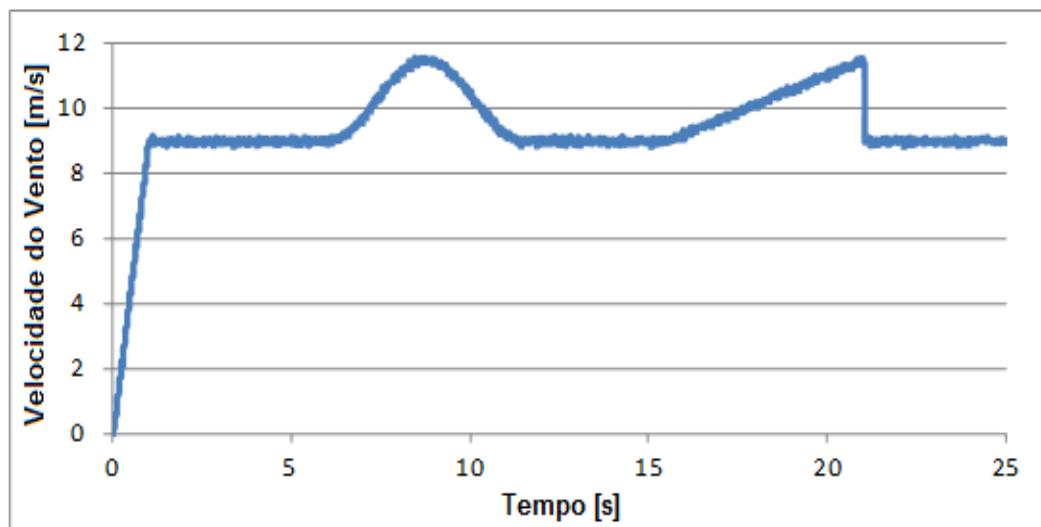


Figura 3.19 - Velocidade do Vento [m/s].

De forma correspondente, a Figura 3.20 mostra a velocidade encontrada no eixo do motor CC. Como pode ser constatado, o perfil da mesma se apresenta em consonância com as condições impostas pelo vento incidente, respeitando as características de inércia do rotor da turbina.

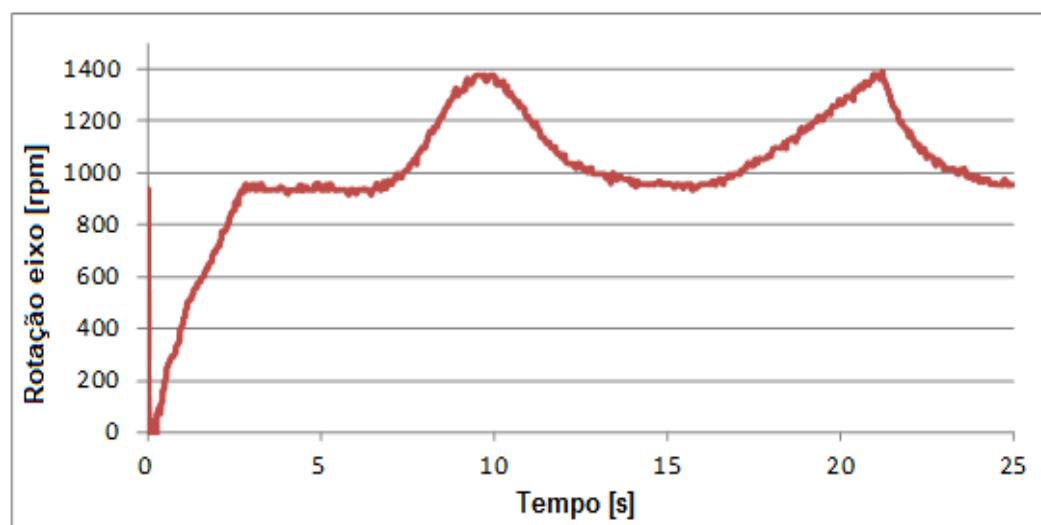


Figura 3.20 - Rotação do Eixo [rpm].

---

### Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software

---

Quanto a potência mecânica disponibilizada pelo vento e que contempla as ações dos controles existentes em complexos reais, para as condições aqui postas, esta grandeza, para uma situação em campo corresponderia ao perfil indicado na Figura 3.21. Todavia, vale lembrar que este desempenho, ao longo do período de tempo considerado, deve ser correlacionado e referido à escala reduzida do laboratório, ou seja, os valores são escalonados visando a adequação do comportamento em campo com aquele factível de simulação no ambiente laboratorial. Isto justifica os valores em kW para o perfil de potências da Figura 3.21 e em W para a Figura 3.22. Ademais, as características no que tange a reprodução das condições impostas para o vento se apresentam similares.

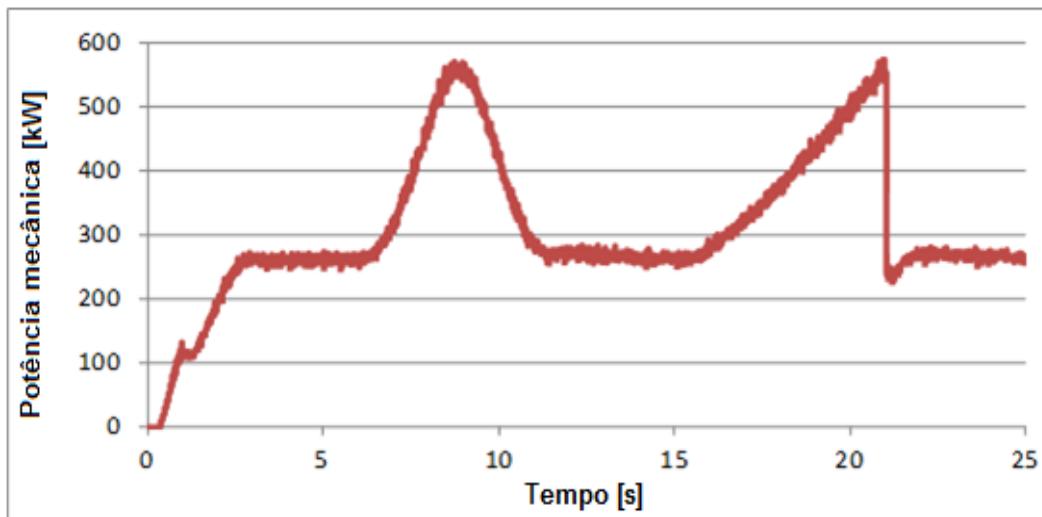


Figura 3.21 - Potência mecânica da turbina [W] – perfil que se manifestaria num sistema real.

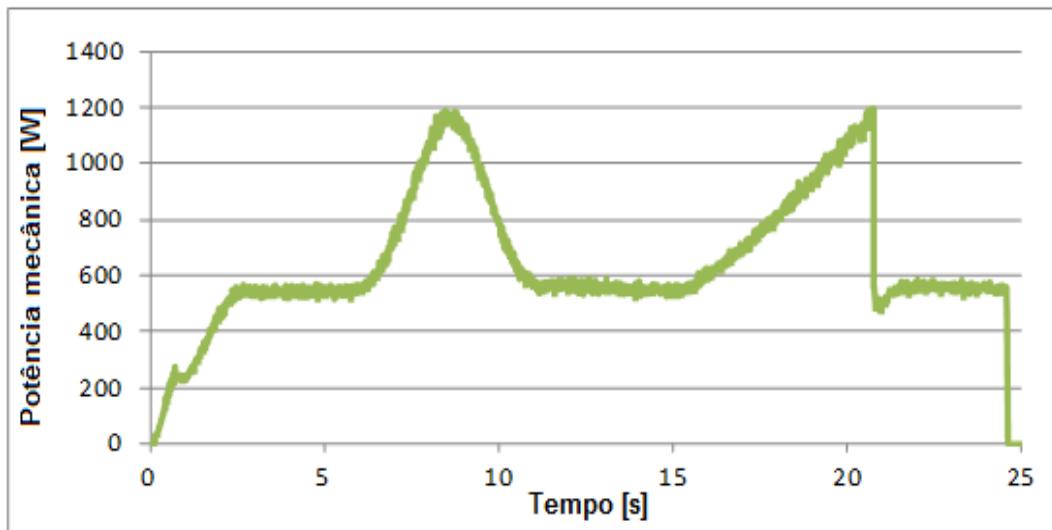


Figura 3.22 - Potência mecânica motor [W].

Por fim, os resultados mostrados na Figura 3.22 ratificam o sucesso para o processo de representação concebido e materializado através da montagem física dos componentes representativos do complexo eólico e respectivos softwares de análise e controle. Naturalmente, os estudos avaliativos feitos e os desempenhos obtidos, aqui sintetizados num único estudo, visam ilustrar a eficácia do processo estabelecido quanto à questão mecânica e a fonte primária da energia. Os demais aspectos serão considerados em detalhes nos desenvolvimentos dos capítulos subsequentes.

### **3.8. – Considerações Finais**

O presente capítulo, que se apresenta como um importante pilar das atividades de desenvolvimento da presente pesquisa, apresentou os fundamentos estruturais que nortearam o hardware e software do modelo laboratorial em escala reduzida.

Como visto, o foco dos trabalhos foi o estabelecimento de meios experimentais para se produzir a correlação da fonte primária de energia, a saber, o vento, com suas propriedades

---

### **Capítulo III - Simulador de unidades eólicas com geração síncrona em escala reduzida: hardware e software**

e peculiaridades inerentes aquelas manifestadas em campo, com as propriedades oferecidas através da potência mecânica disponibilizada no eixo de um motor de corrente contínua de pequeno porte.

Os procedimentos explorados se fundamentaram na apresentação de uma síntese do comportamento físico e modelagem matemática de um vento, com características próprias àquelas passíveis de manifestação em campo, seguida da representação da operação de um motor de corrente contínua através de técnicas de modelagem no domínio do tempo.

Uma vez estabelecidas as principais equações que regem o seu comportamento, e ainda, esclarecido que um motor de corrente contínua constituir-se-ia na base do processo de representação do conjunto vento-turbina-controle, somado às questões de hardware, foram tecidos importantes e esclarecedores pormenores sobre a lógica do processo de implementação do laboratório, inclusive em relação ao aplicativo computacional desenvolvido no ambiente do Labview para o comando e controle do funcionamento do motor, assim como os demais recursos necessários a nível de hardware e software.

Por fim, foram realizados trabalhos preliminares direcionados para a validação das respostas operacionais oferecidas pelo complexo montado quanto aos seus objetivos primordiais, os quais, para o presente estágio da dissertação, ficaram confinados à reprodução da ação do vento e respectiva potência disponibilizada no eixo e responsável pela entrada de energia ao gerador síncrono propriamente dito. Como visto, os resultados obtidos foram claros e suficientes para ratificar a representação e o seu sucesso aos objetivos pretendidos.

# CAPÍTULO IV

---

## 4. Avaliação experimental do desempenho da estrutura laboratorial

### 4.1. – Considerações Iniciais

Uma vez concebida, especificada e montada a estrutura laboratorial destinada a representação operacional de unidades de geração eólica a geração síncrona, resta, complementarmente aos trabalhos descritos anteriormente, assegurar que o complexo de hardware e software obtido ofereça propriedades operacionais com adesão aos propósitos estabelecidos como metas para a presente dissertação.

Como foi ressaltado, o arranjo laboratorial desenvolvido, em que pese ser o mesmo uma representação em escala reduzida, fato este que, conjuntamente com outras limitações restringe o campo de aplicabilidade do produto, destina-se a avaliação do desempenho de unidades eólicas quanto aos indicadores de qualidade da energia elétrica e outros fenômenos que não envolvam correspondências nas respostas rápidas e algumas situações dinâmicas.

Em consonância com tais propósitos, considerou-se imprescindível uma explanação sobre os principais documentos que estabelecem diretrizes para a operação no setor elétrico de complexos eólicos. No Brasil, no contexto ora em foco, destacam-se os seguintes documentos normativos: Procedimento de Distribuição – PRODIST da ANEEL[10]; e o Procedimento de Rede – PROREDE do Operador Nacional do Sistema (ONS) [11].

Diante do exposto segue que, o conteúdo do presente capítulo encontra-se centrado na avaliação laboratorial da estrutura montada, visando, sobretudo, o seu desempenho no que

tange ao processo de reprodução das grandezas mecânicas e elétricas que determinam o funcionamento das unidades de geração eólica constituídas pela topologia que emprega geradores síncronos.

### 4.2. – Síntese dos indicadores de qualidade da energia

A seguir são sintetizados os principais pontos contemplados no Módulo 8 do PRODIST, com destaque às definições, formulações e valores de referência dos indicadores de qualidade de energia elétrica a serem observados para os pontos de suprimento ou de conexão nas redes de distribuição. Tendo em vista que a maioria dos conceitos relacionados com os indicadores referenciados são clássicos, julgou-se desnecessário, para fins desta dissertação, maiores discussões sobre os mesmos. Apesar de serem citados alguns indicadores de qualidade apenas a distorção harmônica será mensurada neste trabalho.

#### 4.2.1. - Tensão de regime permanente

Na faixa de operação normal a tensão pode ser classificada conforme as seguintes categorias: adequada, precária e crítica. Estas variações são medidas conforme o afastamento do valor de tensão em relação a sua referência.

Os valores das três faixas que classificam a tensão em relação à referência, para níveis de tensão de 1kV a 69kV estão definidas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de referência das tensões entre 1 kV e 69kV.

Tensão de atendimento (TA)	Faixa de variação da Tensão de leitura (TL) em relação à tensão contratada (TC)
Adequada	$0,93TC \leq TL \leq 1,05TC$
Precária	$0,90TC \leq TL < 0,93TC$
Crítica	$TL < 0,90TC$ ou $TL > 1,05TC$

#### 4.2.2. – Desequilíbrio de tensão

A expressão utilizada para medir o desequilíbrio de tensão é:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (4.1)$$

Onde:

$FD$  – fator de desequilíbrio;

$V_-$  – magnitude da tensão de sequência negativa (rms);

$V_+$  – magnitude da tensão de sequência positiva (rms).

#### 4.2.3. – Distorção harmônica

A distorção harmônica é definida por dois indicadores, a saber:

- **Distorção harmônica individual:** expressando o nível individual de uma das componentes harmônicas do espectro de frequências de um sinal distorcido, em relação ao valor da componente fundamental;
- **Distorção harmônica total:** composição das distorções harmônicas individuais que expressa o grau de desvio da onda em relação ao padrão ideal, referenciada ao valor da componente fundamental.

As equações (4.2) e (4.3) são utilizadas para calcular as distorções harmônicas individuais de tensão de ordem  $h$  ( $DITH\%$ ) e da distorção harmônica total de tensão ( $DTT\%$ ), respectivamente. Para o cálculo das distorções harmônicas nas correntes utilizam-se expressões semelhantes.

$$DITH\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (4.2)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Sendo:

$V_h$  – tensão harmônica de ordem  $h$ ;

$h$  – ordem harmônica;

$hmáx$  – ordem harmônica máxima;

$V_1$  – tensão fundamental medida.

A Tabela 4.2 fornece os valores de referência máximos para as distorções harmônicas totais para diferentes níveis de tensão. Já na Tabela 4.3 são apresentados os valores de referência para as distorções harmônicas individuais de tensão [10].

**Tabela 4.2 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).**

Tensão nominal do barramento ( $V_N$ )	Distorção harmônica total de tensão (DTT%)
$V_N \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_N \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_N \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_N \leq 230 \text{ kV}$	3

Tabela 4.3 – Valores de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental)

Ordem harmônica	Distorção harmônica individual de tensão (% de $V_N$ )				
	$V_N \leq$	1 kV	13,8 kV	69 kV <	$V_N \leq 230$
	1 kV	$< V_N \leq$	$< V_N \leq$	kV	
<b>Ímpares</b> <b>não</b> <b>múltiplas</b> <b>de 3</b>	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	$> 25$	1,5	1	1	0,5
<b>Ímpares</b> <b>múltiplas</b> <b>de 3</b>	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	$> 21$	1	0,5	0,5	0,5
<b>Pares</b>	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	$> 12$	1	0,5	0,5	0,5

#### 4.2.4. – Flutuação de tensão

Variações aleatórias, repetitivas e/ou esporádicas na tensão são denominadas de flutuações de tensão e o indicador de qualidade atrelado com tais fenômenos corresponde ao nível de cintilação luminosa ou *flicker*.

Para se medir o *flicker* que é um efeito da flutuação de tensão utiliza-se o Indicador de Severidade de Curta Duração  $P_{st}$ , esta grandeza indica o grau de desconforto visual, seu valor é mensurado em um tempo de observação de 10 minutos. O limiar de irritação devido a cintilação luminosa (*flicker*) é definido pelo valor  $P_{st} = 1\text{pu}$ . A expressão a seguir é utilizada para calcular este indicador:

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (4.4)$$

Onde,  $P_{0,1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$  são níveis da sensação instantânea de *flicker* que excedem em 0,1; 1; 3; 10 e 50 % o tempo de observação, respectivamente, obtidos da análise estatística Função Probabilidade Cumulativa Complementar (FPCC).

Para se medir perturbações causadas pela combinação de cargas operando de forma aleatória ou para cargas que promovem cintilações com grandes ciclos de operação utiliza-se, de forma complementar, o Indicador de Severidade de Longa Duração  $P_{lt}$  que equivale a um valor representativo de doze amostras consecutivas de  $P_{st}$ , que são mensurados dentro de duas horas. A expressão a seguir determina esta última grandeza:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3} \quad (4.5)$$

Na sequência são apresentados os parâmetros padrões para a avaliação da cintilação:

- $P_{st}D95\%$  é o valor diário do indicador  $P_{st}$  que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 horas;
- $P_{lt}S95\%$  é o valor semanal do indicador  $P_{lt}$  que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 7 dias completos e consecutivos;
- FT é o Fator de Transferência.

A Tabela 4.4 apresenta os valores de referência para a avaliação do sistema de distribuição.

Tabela 4.4 – Valores de referência para os indicadores de cintilação luminosa.

Valor de referência	$P_{st}D95\%$	$P_{lt}S95\%$
<b>Adequado</b>	< 1 pu / FT	< 0,8 pu / FT
<b>Precário</b>	1 pu – 2 pu / FT	0,8 pu – 1,6 pu / FT
<b>Crítico</b>	> 2 pu / FT	> 1,6 pu / FT

Tendo em vista que o fenômeno em pauta certamente irá ser propagado a outros pontos da rede, surgiu o denominado Fator de Transferência (FT), calculado pela razão entre o valor do  $P_{lt}S95\%$  do barramento do sistema de distribuição e o valor do  $P_{lt}S95\%$  do barramento de tensão secundária de baixa tensão eletricamente mais próxima. Caso essa relação não seja possível de se determinar adotam-se valores de referência de FT para determinadas faixas de tensão, conforme apresentado na Tabela 4.5. No caso de barramentos de distribuição de baixa tensão, estes valores de referência perdem o sentido devido a características dinâmica destas redes.

Tabela 4.5 – Valores de referência para a função de transferência FT.

Tensão nominal do barramento	FT
Tensão do barramento $\geq 230$ kV	0,65
$69$ kV $\leq$ Tensão do barramento $\leq 230$ kV	0,8
Tensão do barramento $< 69$ kV	1

### 4.3. – Caracterização dos casos utilizados nos estudos de avaliação de desempenho

Para fins da realização dos trabalhos de investigação utilizando a estrutura física estabelecida houve, por bem, a necessidade da definição das características e dos parâmetros representativos de uma situação particular, a partir da qual seriam realizados os experimentos e obtidos os resultados para apresentação e análise. Os dados da turbina eólica de referência foram retirados da referência [14]. Neste sentido, a Tabela 4.6 e a Tabela 4.7 fornecem os principais dados e parâmetros utilizados, observando que, todos eles, encontram-se consonantes com as características nominais dos recursos laboratoriais empregados.

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

Tabela 4.6 – Características do sistema utilizado como referência.

Turbina Eólica (referência)	Número de pás		Raio [m]			Tipo de Eixo / Controle			
	3		21			Horizontal / Pitch			
	Velocidade nominal (m/s)		Velocidade Cut-in (m/s)			Velocidade Cut-out (m/s)			
	12		3			25			
	Coeficientes da Turbina								
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$
Gerador Elétrico (referência)	0,22	116	0,4	0	1	5	12,5	0,08	0,035
	Tecnologia						Potência nominal [kW]		
	Síncrono com rotor à imã permanente						600		
	Tensão nominal [V]			Número de polos			Velocidade nominal [rpm]		
	600			60			33,6		

Tabela 4.7 – Características do sistema laboratorial em escala reduzida.

Motor de Corrente Continua	Conexão		Velocidade Nominal [rpm]	
	Paralelo		1800	
	Tensão Armadura [V]		Tensão Campo [V]	
	180		180	
	Indutância Armadura [H]		Resistência Armadura [Ω]	
	0,054		7,16	
	Potência Motor [W]		Momento de Inércia [J]	
	1250		0,03	
	Corrente de Campo [A]		0,38	
Gerador Elétrico	Tecnologia		Potência nominal [W]	
	Síncrono com Rotor Bobinado		900	
	Tensão nominal rotor [V]	Tensão nominal armadura [V]	Número de polos	Velocidade nominal [rpm]
	180 CC	220 CA	4	1800
Indutâncias de Desacoplamento	Ligaçao			Indutância [H]
	Serie			0,102
Conversor de Frequência	Frequência de chaveamento [kHz]			Potência [kW]
	15			5,5
Transformador	Impedância [%]		Resistência [%]	Potência nominal [VA]
	6,1		1,0	1500
	Tensão do primário [V]			Tensão do secundário [V]
	110			110
Carga Isolada	Tensão Nominal [V]			Corrente Nominal [A]
	55			0,5
	Frequência Nominal [Hz]			Carga [Ω] + [j X]
	60			180 + 0,102

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

Com base nas informações acima foram selecionados, para fins dos desenvolvimentos desta pesquisa, três casos distintos quanto às características intrínsecas ao vento, as quais se encontram sintetizados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Caracterização do vento nos casos estudados.

	Base		Rajada		Rampa		Ruído	
	Vmáx [m/s]	Vmáx [m/s]	Ti [s]	Tf [s]	Vmáx [m/s]	Ti [s]	Tf [s]	Fator
<b>Caso 1</b>	9	0	0	0	0	0	0	50
<b>Caso 2</b>	9	2,5	6	11,5	2,5	15,5	21	50
<b>Caso 3</b>	9	4,5	6	11,5	4,5	15,5	21	50

- **Caso 1** – Este visa validar as respostas do arranjo laboratorial de forma tal a contemplar o seu desempenho diante de um vento incidente constante, formando, assim, uma base de referência para as demais condições operativas impostas.
- **Caso 2** – Nesta situação admite-se a manifestação de turbulências no vento em proporções tais que os limites de capacidade de transmissão de potência do vento ao gerador não são ultrapassados, portanto, não ocorre a ação do controlador *Pitch*.
- **Caso 3** – Este caso representa o funcionamento do sistema eólico através de uma incidência de ventos que conduz a atuação do limitador de potência transferida, isto é, do controle *Pitch*.

A Figura 4.1 evidencia o arranjo topológico empregado e discutido nos capítulos precedentes destaca os pontos para os quais foram realizadas as medições de interesse para as análises.

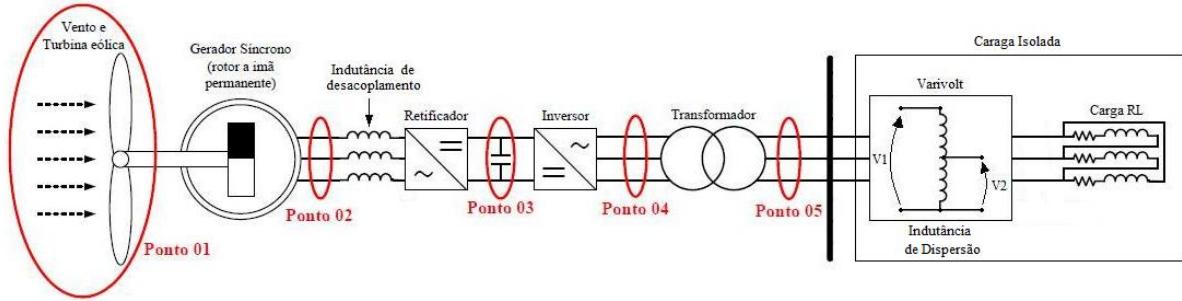


Figura 4.1 – Pontos de medição para os estudos de desempenho do sistema eólico.

Para cada ponto monitorado foram realizados os registros das grandezas indicadas na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Grandezas analisadas nos estudos de desempenho.

Ponto	Grandezas analisadas
01	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vento</li> <li>• Velocidade rotacional</li> <li>• Coeficiente de potência</li> <li>• Potência extraída pela turbina eólica</li> <li>• Torque mecânico na turbina</li> <li>• Ângulo <i>Pitch</i></li> </ul>
02	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensões CA</li> <li>• Correntes CA</li> </ul>
03	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensão CC</li> <li>• Corrente CC</li> </ul>
04	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensões CA</li> </ul>
05	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensões CA</li> <li>• Correntes CA</li> </ul>

#### 4.4. – Resultados para o Caso 1

O primeiro caso estudado, como previamente identificado, se apresenta na forma de um vento que possui um valor base constante de 9 m/s ao qual são adicionados ruídos.

#### 4.4.1. – Ponto 01

A Figura 4.2 evidencia o vento base de 9 m/s e o ruído imposto na turbina eólica.

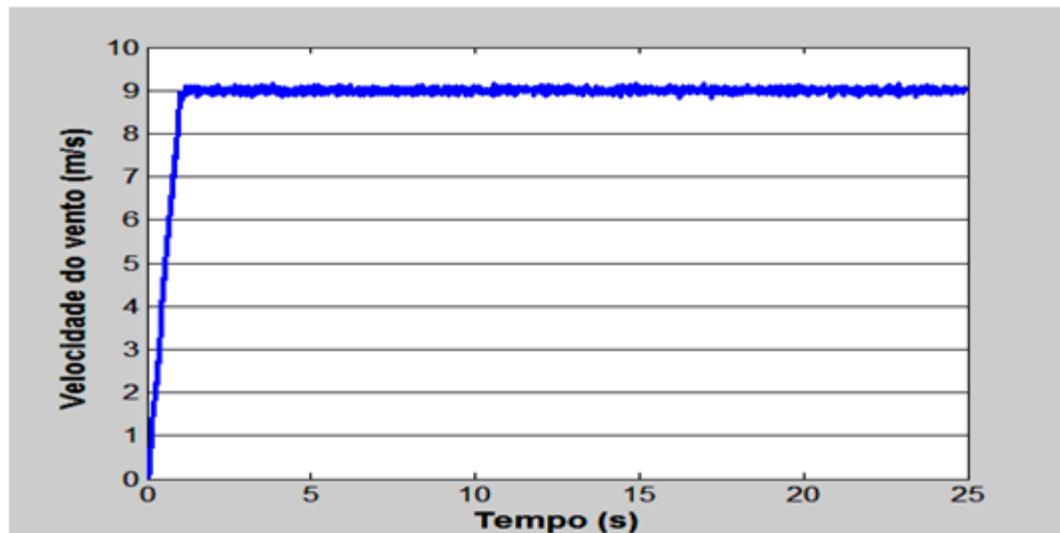


Figura 4.2 – Velocidade do vento – Caso 1.

Na Figura 4.3 é exibida a velocidade mecânica do eixo da turbina eólica, a qual é a mesma do gerador elétrico. Como pode ser constatada, a velocidade se mantém constante e igual a 940 rpm.

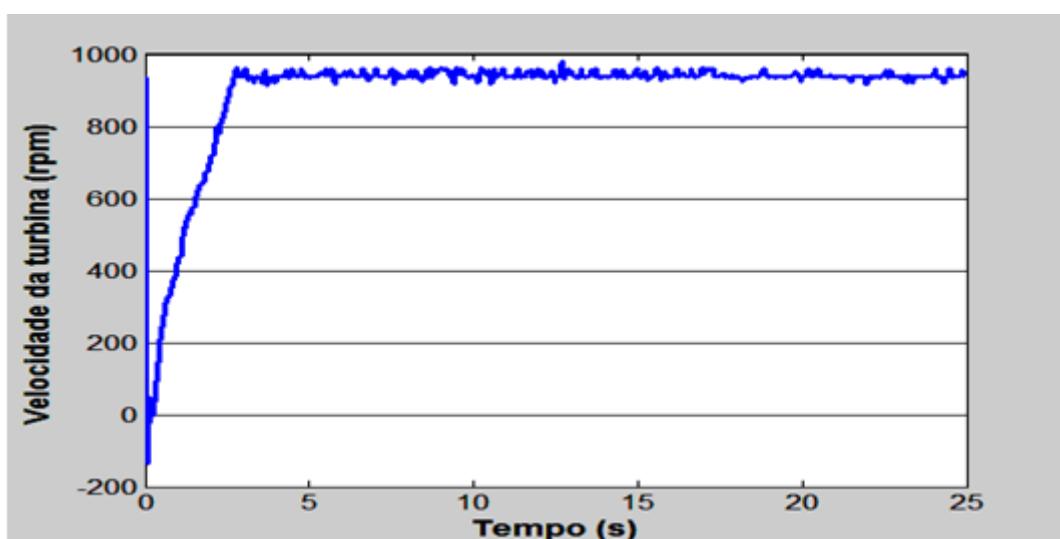


Figura 4.3 – Velocidade mecânica da turbina – Caso 1.

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

Na Figura 4.4 tem-se o coeficiente de potência  $C_p$  que se mantém constante em 0,42, com exceção da parte inicial, região esta associada com o processo de partida do conjunto, quando então a velocidade encontra-se ainda variando. Conforme discutido no Capítulo II, o referido coeficiente se encontra dentro das expectativas para máquinas reais, que giram em torno de 0,45, no caso apresentado conforme previsto seu valor não atingiu o valor máximo, pois a velocidade do vento encontra-se abaixo da nominal estabelecida para a turbina de referência.

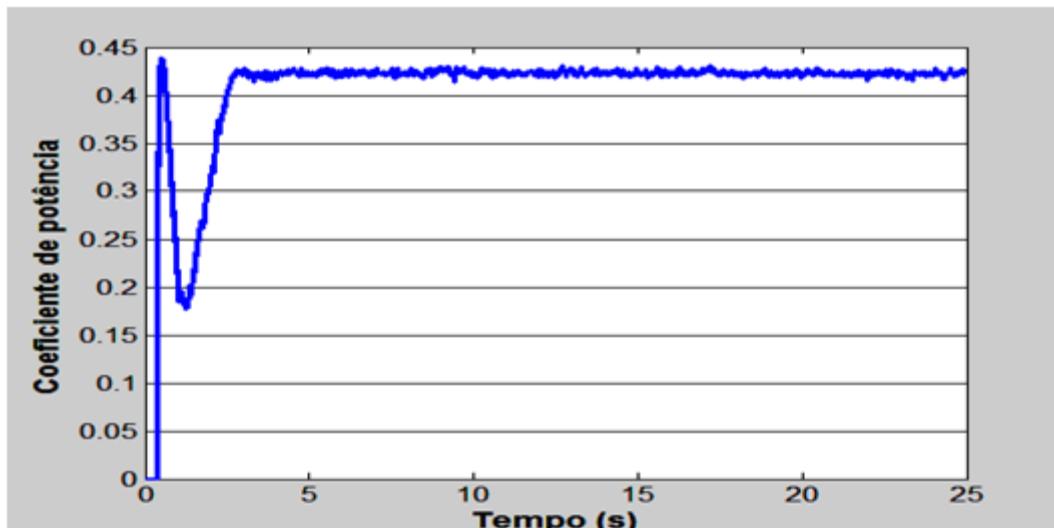


Figura 4.4 – Coeficiente de potência – Caso 1.

Na Figura 4.5 é apresentada a potência aerodinâmica extraída do vento. O gráfico encontra-se correlacionado com os níveis de potências que seriam disponibilizados em um sistema real, e não no arranjo em escala reduzida aqui focado. Por tal motivo pode-se constatar que as potências indicadas se apresentam na ordem de kW.

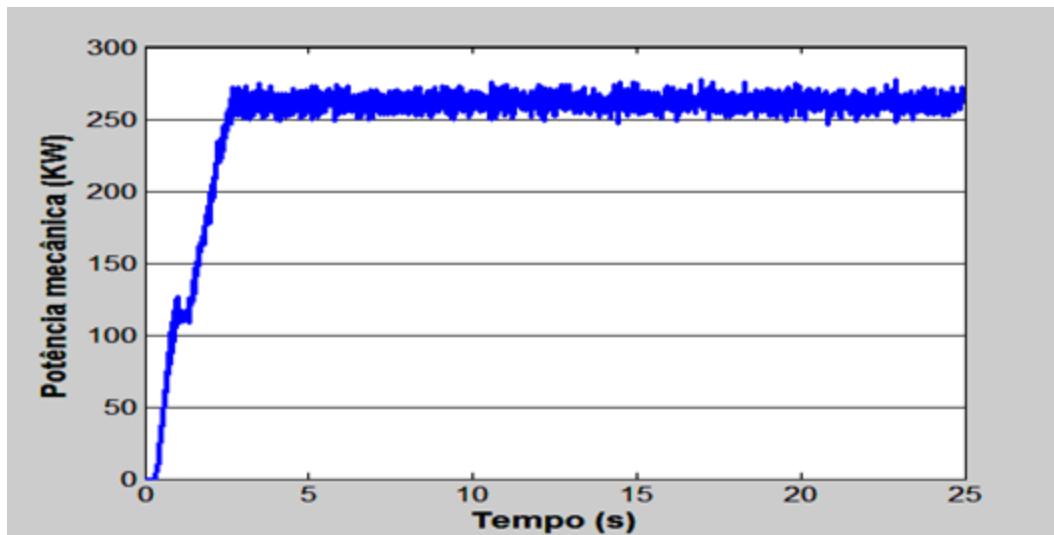


Figura 4.5 – Potência que seria disponibilizada no eixo de uma turbina eólica comercial para a situação imposta pelo Caso 1.

A Figura 4.6, por sua vez, apresenta resultados correspondentes ao acima, respeitadas as escalas reduzidas factíveis de representação no ambiente laboratorial. Considera-se que para a turbina de referência de potência de 600 kW qualquer valor produzido por esta emana potência proporcional em relação ao motor de corrente contínua de 1250 W. Considerando que devido a necessidade de testar o conjunto além da potência nominal do gerador real foi utilizado como valor nominal para o motor de corrente contínua 1000 W, sendo assim caso seja injetado uma maior velocidade de vento à turbina o motor CC poderia fornecer até 1250 W o que não distorceria o resultado para a atuação do controle *Pitch* devido a saturação do motor.

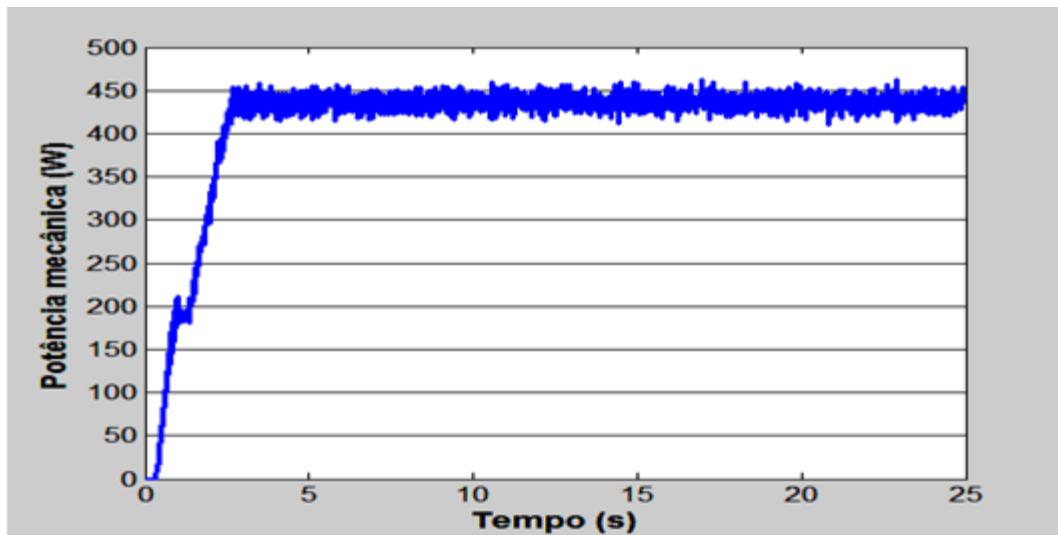


Figura 4.6 – Potência disponibilizada pelo motor de CC em ambiente laboratorial – Caso 1.

Comparando-se, pois os dois perfis traçados para as potências, em consonância com seus aspectos qualitativos, constata-se que as grandezas em pauta, antes escalonadas em kW passam a serem apresentados em W, conservando-se, entretanto, seus comportamentos ao longo do período de estudos. A título de exemplificação, valores de potências reais da ordem de 260 kW em campo, se apresentam, na estrutura laboratorial, em torno de 433 W. Esta correlação entre as grandezas de campo e laboratoriais se repete para os demais casos apresentados e discutidos na sequência dos trabalhos. Portanto, a partir deste momento, apenas os desempenhos laboratoriais serão explorados.

A Figura 4.7 é indicativa do torque mecânico oferecido pelo motor CC ao eixo do gerador síncrono, este valor foi calculado através do software de controle conforme passos indicados no fluxograma da Figura 3.18. Tendo em vista que a situação analisada não implica em grandezas que alcancem o nível de atuação do controle *Pitch*, este não foi acionado em qualquer momento.

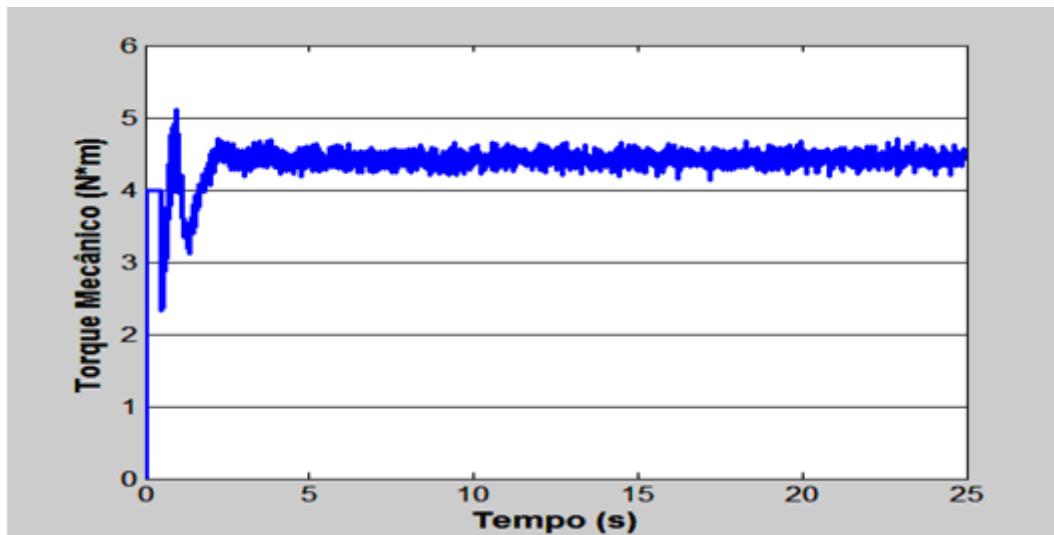


Figura 4.7 – Torque mecânico verificado no eixo do gerador – Caso 1.

#### 4.4.2. – Ponto 02

Este ponto, de acordo com a Figura 4.1, corresponde aos terminais de saída do gerador síncrono. Assim sendo, na Figura 4.8 têm-se as tensões trifásicas ao longo do período de estudos. Muito embora o gráfico não evidencie, com clareza, as três fases, estas se encontram individualmente ilustradas, como será posteriormente indicada através de detalhes.

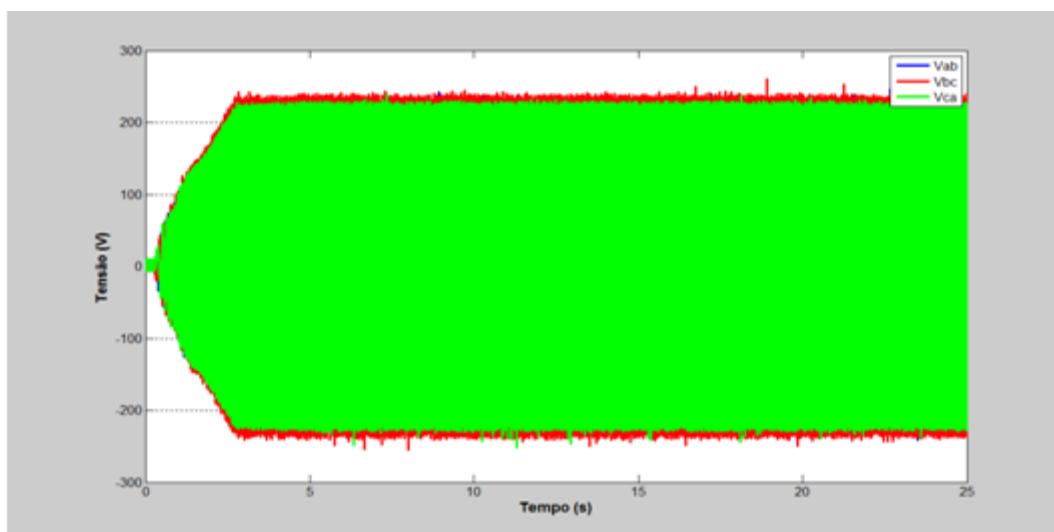


Figura 4.8 – Tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1.

Complementarmente, na Figura 4.9 tem-se o desempenho do valor eficaz das tensões no decorrer do intervalo de tempo analisado, onde se percebe que a tensão se situa em torno de 143 V. As oscilações dos valores se justificam pelos ruídos inseridos no vento base, pelo protocolo utilizado para o cálculo do valor eficaz e principalmente devido a taxa de aquisição da tensão.

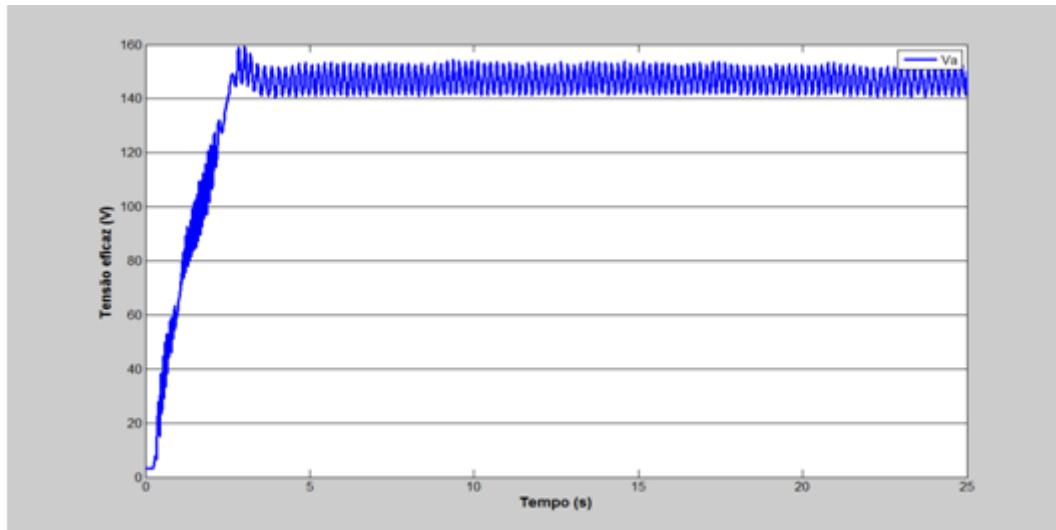


Figura 4.9 – Valores eficazes das tensões fornecidas pelo gerador – Caso 1.

Como mencionado, objetivando maiores detalhes sobre as formas de onda produzidas pelo gerador, a Figura 4.10 mostra um detalhe para as três tensões numa região típica de operação. Como se constata, as mesmas formam um conjunto trifásico de tensões, com expressiva distorção e com uma frequência fundamental da ordem de 33 Hz. Este valor de frequência se apresenta em sintonia com a velocidade do vento imposta e com o número de polos do circuito de campo da máquina geradora.

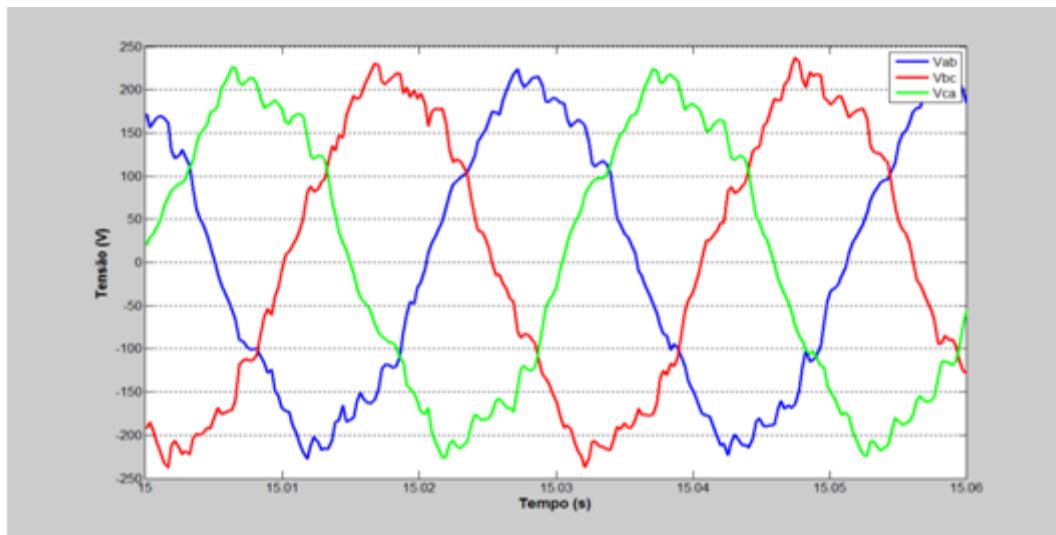


Figura 4.10 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1.

A Figura 4.11 apresenta o correspondente histograma para as componentes harmônicas da tensão.

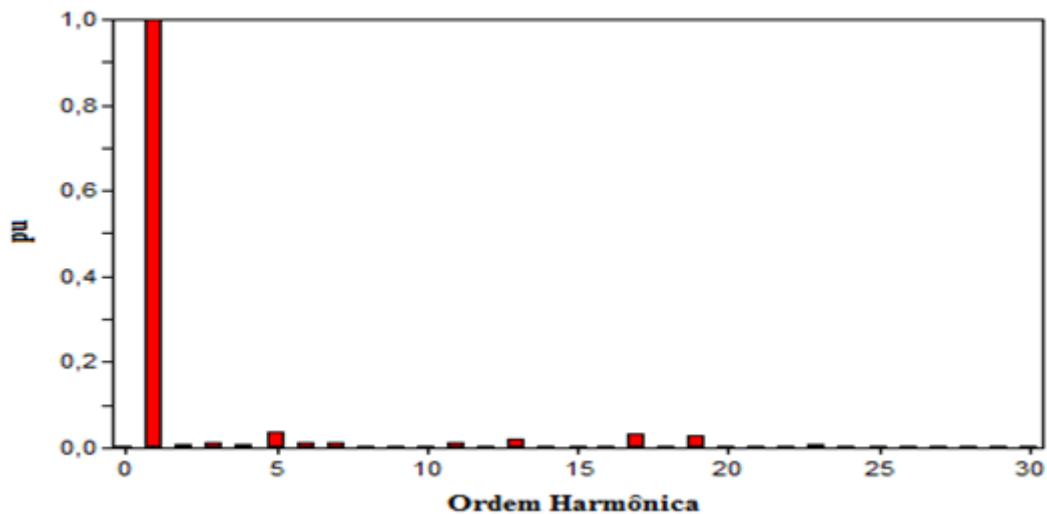


Figura 4.11 – Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) – Caso 1.

De forma semelhante às tensões, uma vez que o arranjo se encontra numa situação típica de suprimento de carga, na Figura 4.12 podem-se observar as correntes de linha na saída do gerador. De modo similar ao procedimento para as tensões, na Figura 4.13 tem-se o perfil das correntes eficazes. O valor eficaz se apresenta em torno de 0,38 A para o regime

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

permanente. Mais uma vez, as oscilações indicadas se devem à introdução de ruídos sobre o vento constante de 9 m/s e devido a resolução da aquisição de tensão.

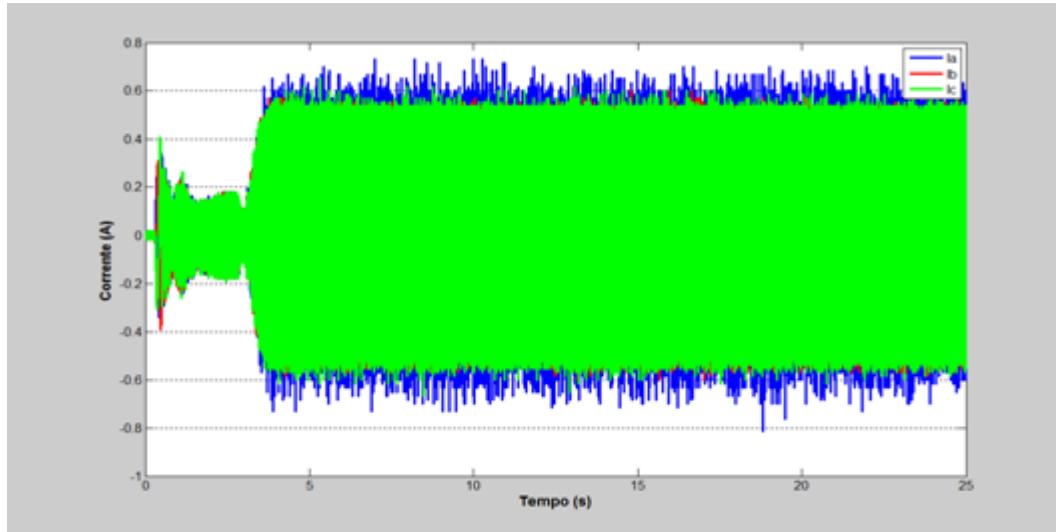


Figura 4.12 – Correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1.

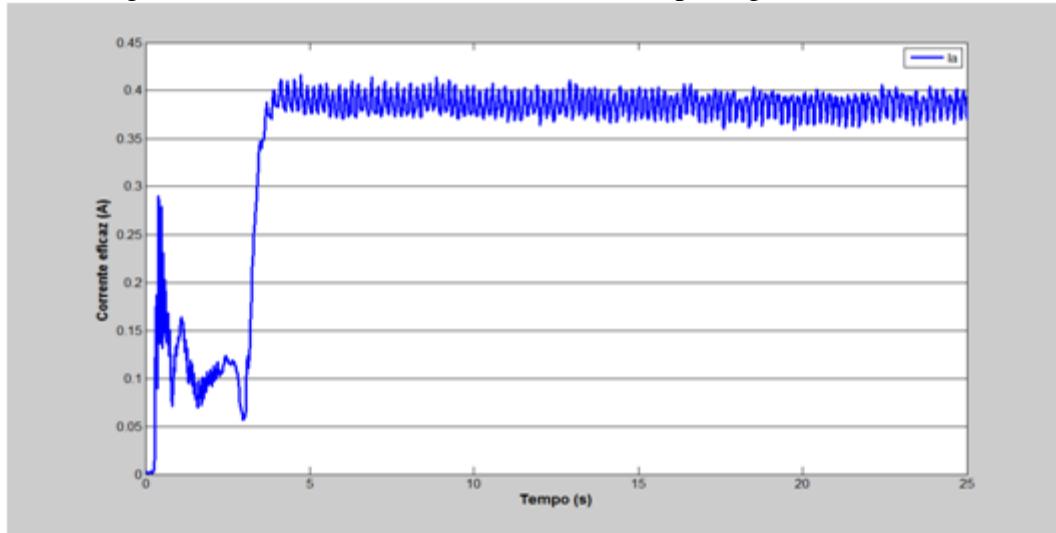


Figura 4.13 – Valores eficazes das correntes de linha fornecidas pelo gerador – Caso 1.

Quanto as formas de onda para as correntes, o detalhe da Figura 4.14 evidencia um expressivo conteúdo harmônico, fato este esperado em decorrência do motivo que o gerador supre diretamente uma unidade retificadora de 6 pulsos.

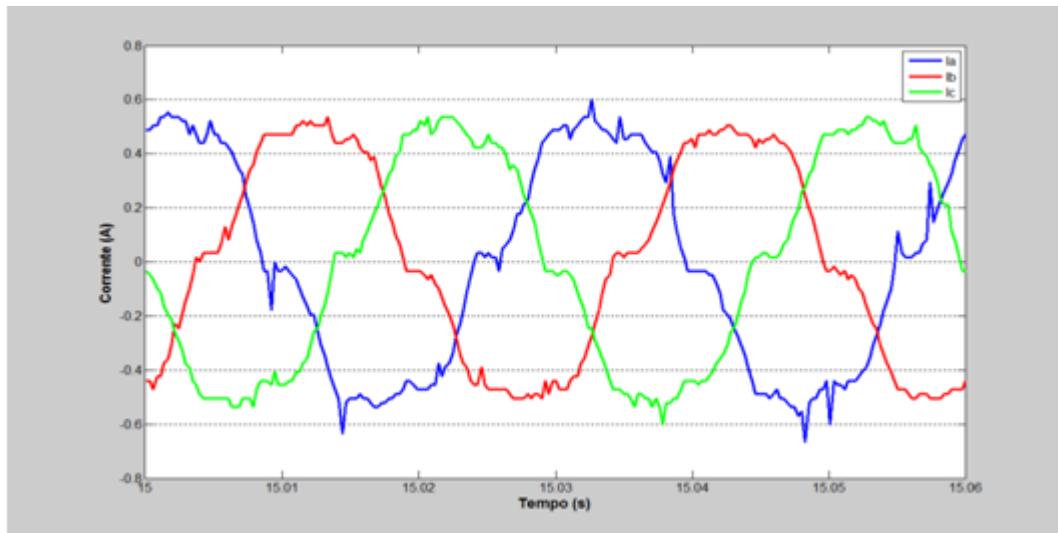


Figura 4.14 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 1.

A Figura 4.15 fornece o espectro das correntes harmônicas e permite constatar que as suas ordens mais significativas são aquelas previstas por um retificador de 6 pulsos. Os histogramas apresentados daqui por diante foram calculados a partir da transformada de Fourier das amostras de um ciclo de onda, os quais foram coletados a partir de um osciloscópio de alta resolução, conforme apresentado no capítulo III. A distorção harmônica total se apresenta em torno de 13%.

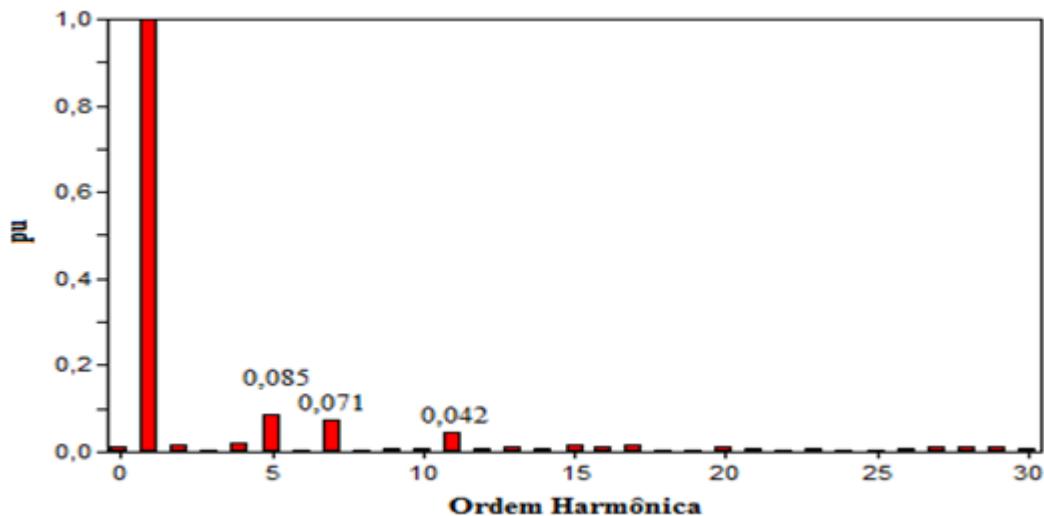


Figura 4.15 – Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) – Caso 1.

#### 4.4.3. – Ponto 03

Os resultados considerados nesta seção correspondem às informações obtidas para o elo CC que interliga o retificador ao inversor. Naturalmente, as duas grandezas mais relevantes referem-se à tensão presente no barramento e à corrente. Estas se encontram mostradas na Figura 4.16 e Figura 4.17, respectivamente.

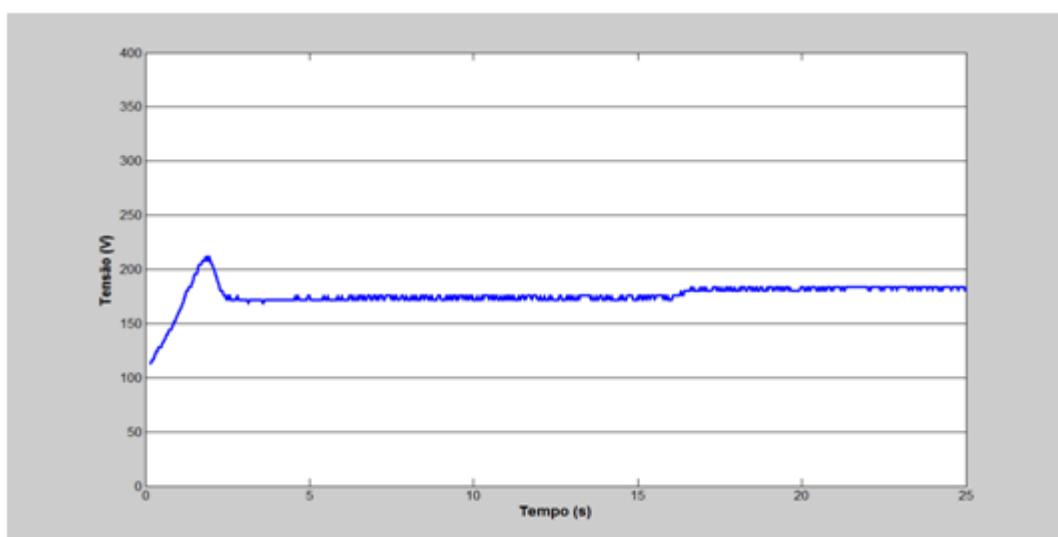


Figura 4.16 – Tensão no elo CC – Caso 1.

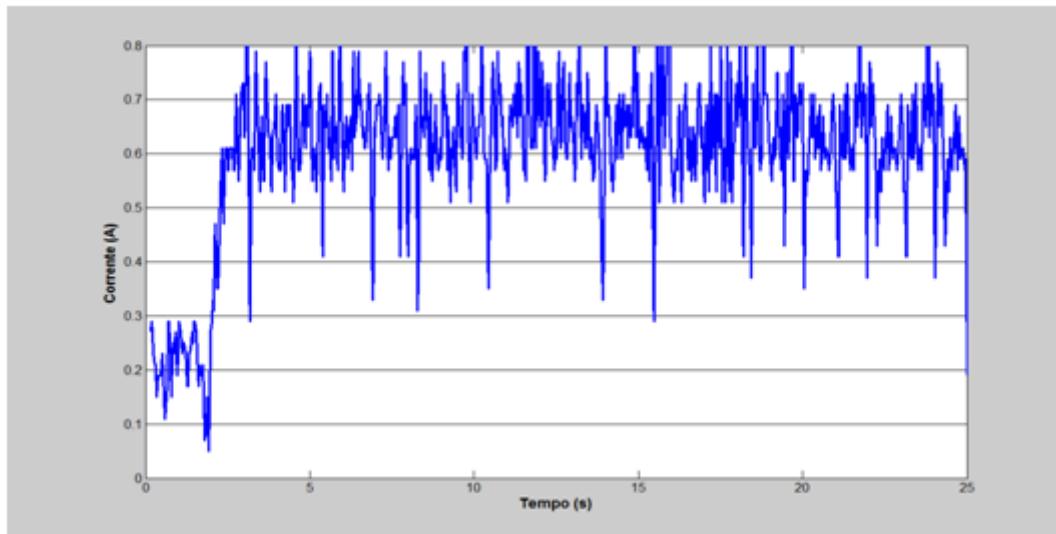


Figura 4.17 – Corrente no elo CC – Caso 1.

#### 4.4.4. – Ponto 04

Uma vez recebido o suprimento CC e realizados os chaveamentos próprios à operação da unidade inversora nos termos classicamente conhecidos, as tensões trifásicas obtidas nos terminais de saída deste conversor apresentam-se como indicado na Figura 4.18. Para este resultado em particular é conveniente destacar que durante um intervalo inicial de tempo, enquanto a tensão CC não atinge um patamar compatível com os requisitos do inversor, os chaveamentos não são realizados. Isto implica no intervalo que evidencia tensão de saída nula.

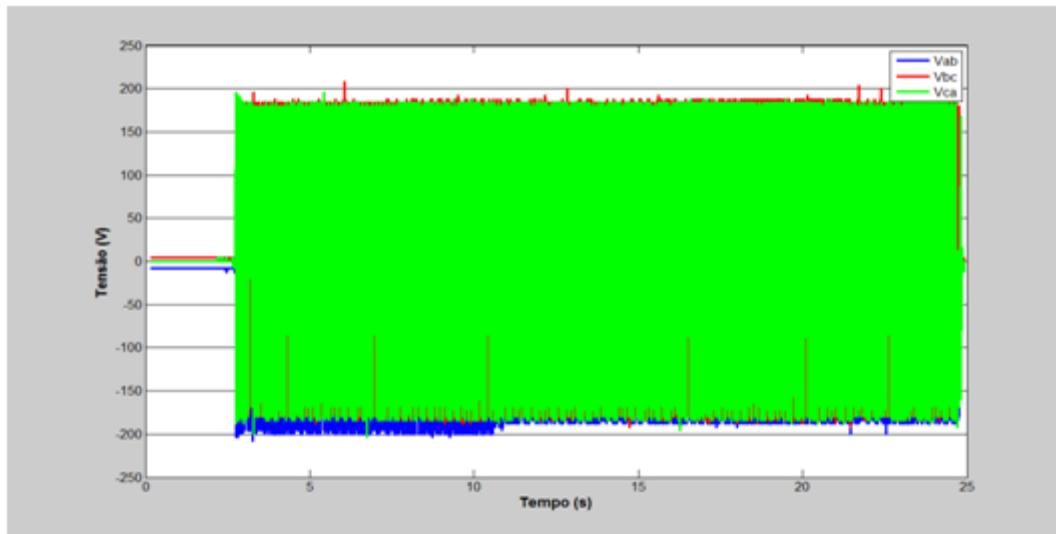


Figura 4.18 – Tensões trifásicas na saída do inversor – Caso 1.

Visando detalhar as formas de onda das tensões acima referidas, a Figura 4.19 mostra um detalhe das mesmas e mostra que a tensão produzida é composta por uma sucessão de pulsos diretamente associados com a frequência de chaveamento imposta.

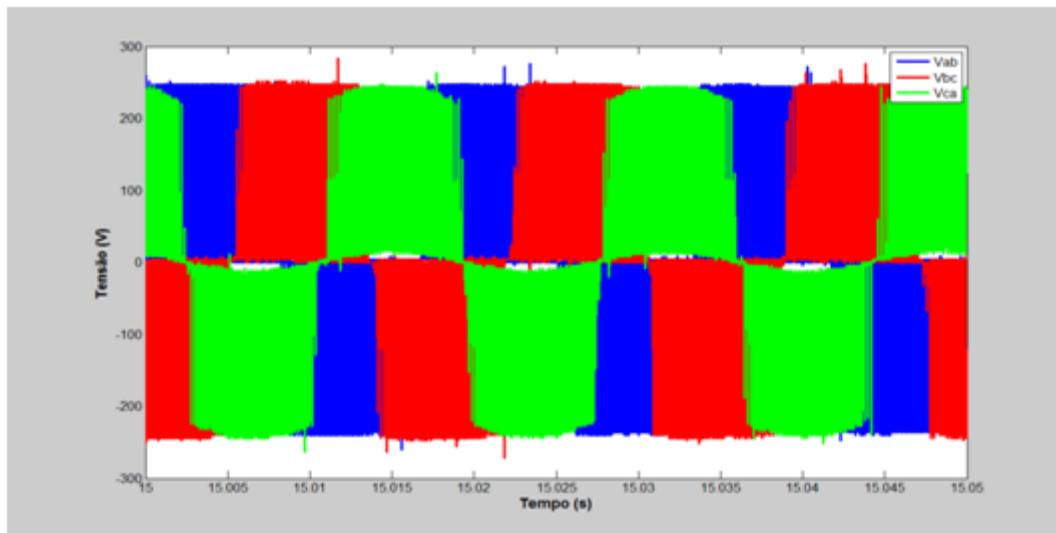


Figura 4.19 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor – Caso 1.

A Figura 4.20 encontra-se correlacionada com o conteúdo harmônico presente na tensão de saída do inversor. Como seria esperado, nesta se constata ordens harmônicas mais

pronunciadas e que se apresentam em blocos múltiplos inteiros da frequência de chaveamento de 15 kHz. As demais ordens que não estas se constituem em frequências espúrias. O nível para a distorção total encontra-se em torno de 76%.

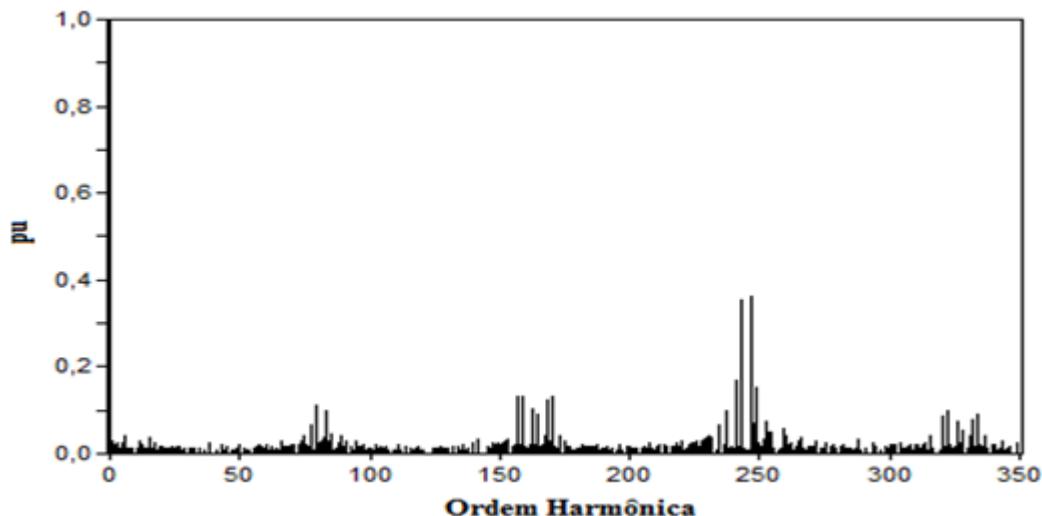


Figura 4.20 – Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) – Caso 1.

#### **4.4.5. – Ponto 05**

Por fim, procedem-se, nesta fase dos trabalhos, a apresentação e discussão das grandezas que mais interessam aos objetivos da análise da qualidade da energia elétrica, em consonância com as orientações normativas e de recomendação estabelecidas pelos agentes reguladores. De fato, sob a designação “Ponto 5” entende-se ao barramento que estabelece a conexão da unidade eólica ao sistema CA de conexão propriamente dito, o qual se encontra do lado secundário do transformador de acoplamento.

Não obstante tais interesses, a estrutura montada, em atenção aos componentes utilizados se apresentou com uma limitação relacionada com a viabilização da interligação da montagem laboratorial à rede trifásica comercial. Tal restrição se deu, fundamentalmente, por conta das características operacionais do inversor empregado. De fato, esta unidade se

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

apresenta com propriedades tais que o paralelismo das duas partes, nos termos usualmente requeridos, foi impossível de se realizar. O conversor do lado da rede (inversor) deve ter características de uma fonte de corrente, já que a rede é uma fonte de tensão (barramento infinito). Por tal motivo, a única possibilidade para a realização dos experimentos foi a do suprimento de uma carga isolada, adotada, para a presente situação, na forma de um conjunto de componentes dentro do conceito da impedância constantes. Embora esta simplificação considera-se que, os trabalhos realizados e resultados obtidos se apresentam adequados aos propósitos firmados, os quais são o desenvolvimento da ideia basica de uma estrutura laboratorial em escala reduzida.

Iniciando pelo sistema trifásico de tensões aplicadas à carga, estas se encontram mostradas na Figura 4.21. Quanto às oscilações em amplitude, os motivos são os ruídos presentes no vento incidente.

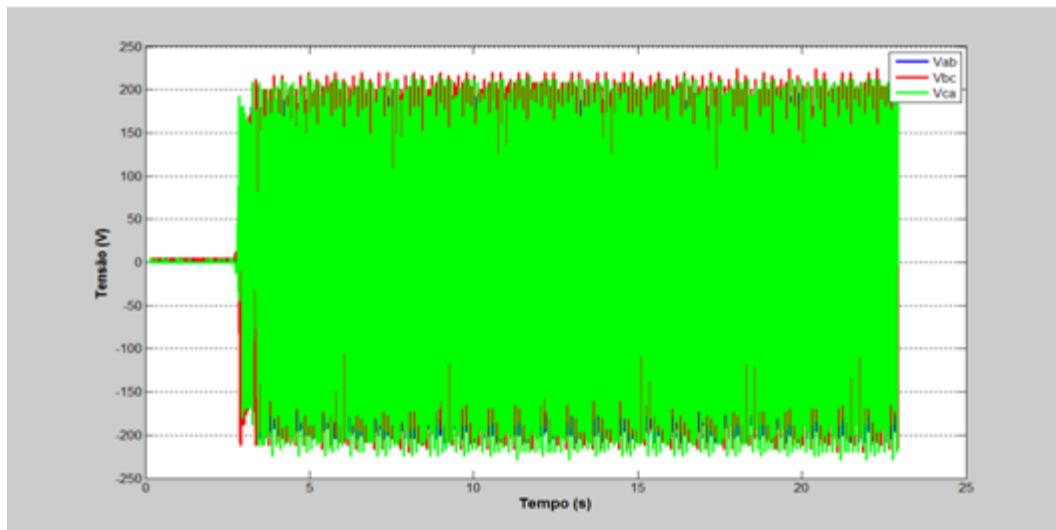


Figura 4.21 – Tensões trifásicas nos terminais da carga isolada – Caso 1.

Na Figura 4.22 tem-se um detalhe das tensões trifásicas na saída do transformador. Pode-se constatar que as tensões do lado secundário do transformador de acoplamento, comparativamente aos resultados da Figura 4.19, se mostram com formas de onda melhoradas

quanto à questão das distorções harmônicas. Esta distorção poderia ser mitigada com a utilização de filtros na saída do inversor de forma que as altas frequências fossem filtradas, um filtro L em série na saída do conversor reduz de forma substancial as harmônicas.

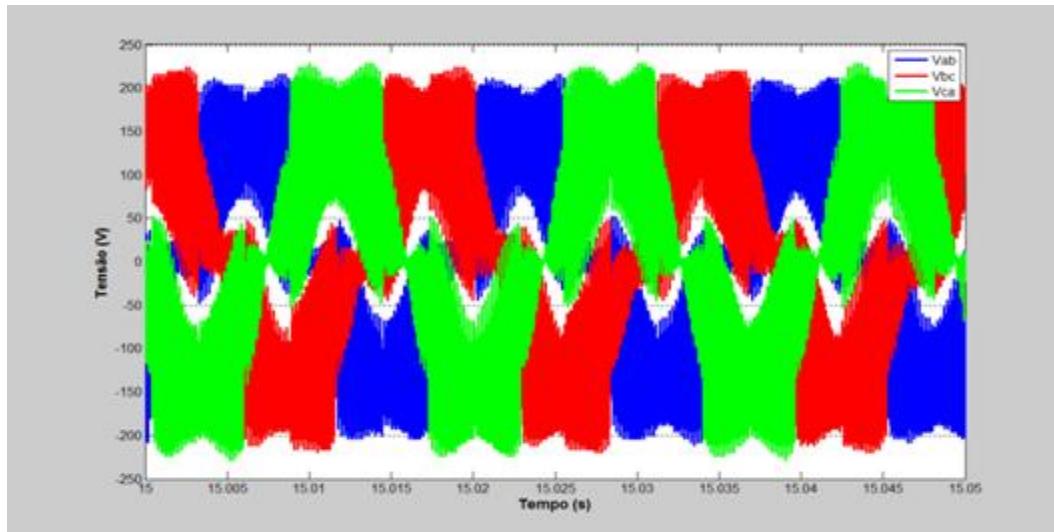


Figura 4.22 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga – Caso 1.

O espectro harmônico da tensão anteriormente referida encontra-se na Figura 4.23. Sua distorção harmônica total encontra-se nas imediações de 44%. A ausência de filtros na saída do inversor implica em que a tensão apresenta ainda uma distorção próxima à frequência de chaveamento. No gráfico é visto a ordem harmonia fundamental com 1pu e um espalhamento do espectro por volta da ordem 250 que é múltipla da frequência de chaveamento de 15 kHz do conversor.

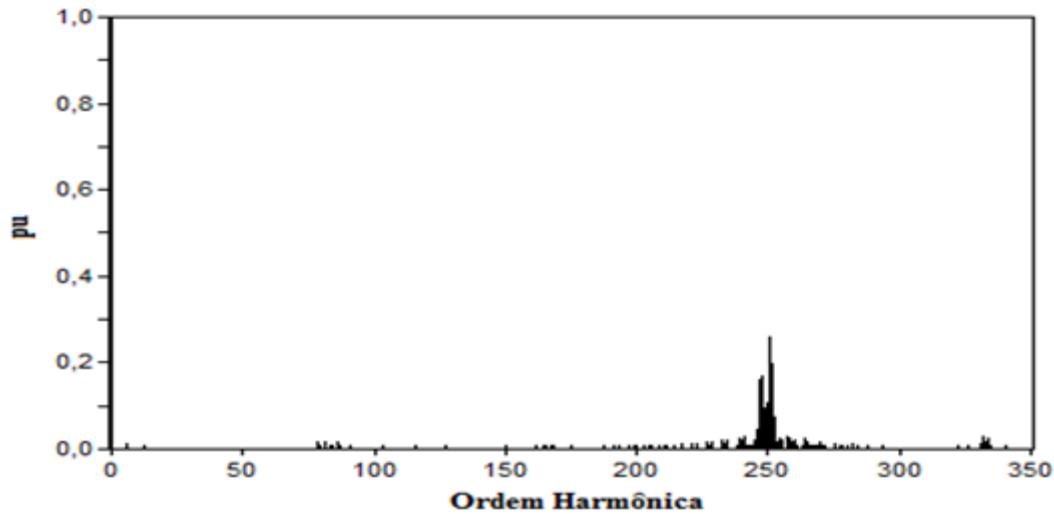


Figura 4.23 – Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) – Caso 1.

Quanto às correntes de linha, estas se apresentam com a forma indicada na Figura 4.24 e Figura 4.25, a primeira indicando seus valores instantâneos e a segunda os valores eficazes. Este último, na região estabilizada se apresenta em torno de 0,48 A.

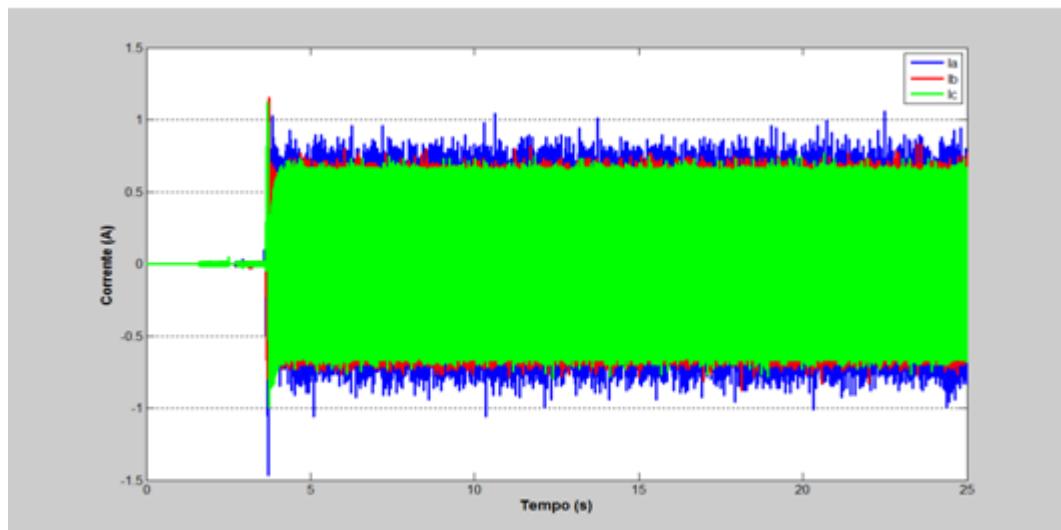


Figura 4.24 – Correntes trifásicas fornecidas para a carga isolada – Caso 1.

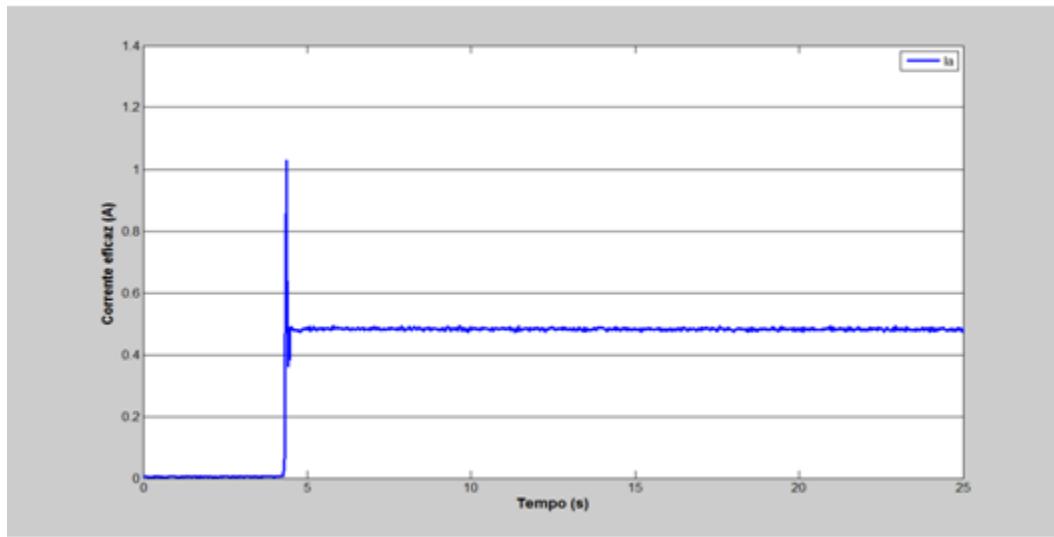


Figura 4.25 – Valores eficazes das correntes de linha para a carga isolada – Caso 1.

Maiores detalhes relacionados com as formas de onda das correntes podem ser verificados na Figura 4.26, relacionado com um detalhe na região normal de operação.

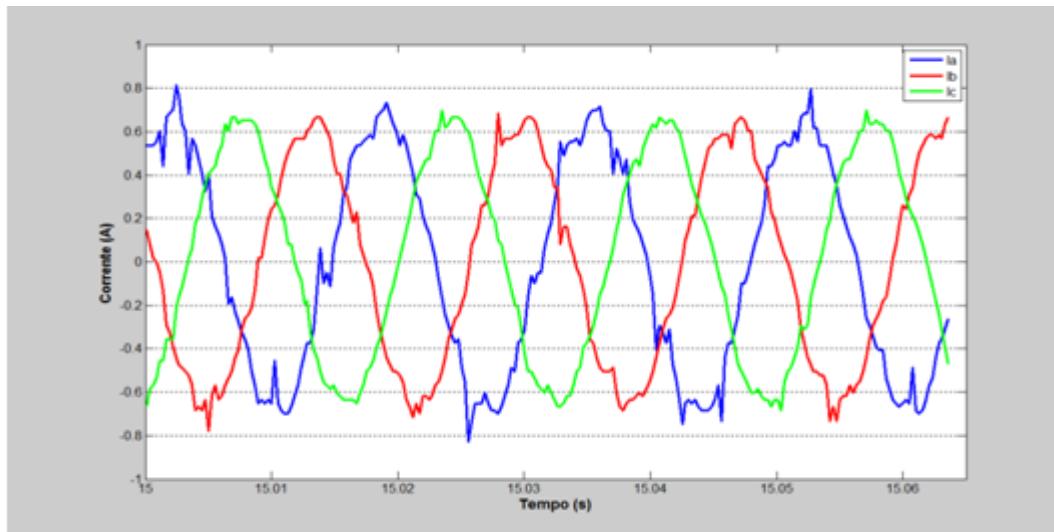


Figura 4.26 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada – Caso 1.

Quanto ao espectro de frequências das correntes, este é mostrado na Figura 4.27. O valor da distorção total desta grandeza está em torno de 13%.

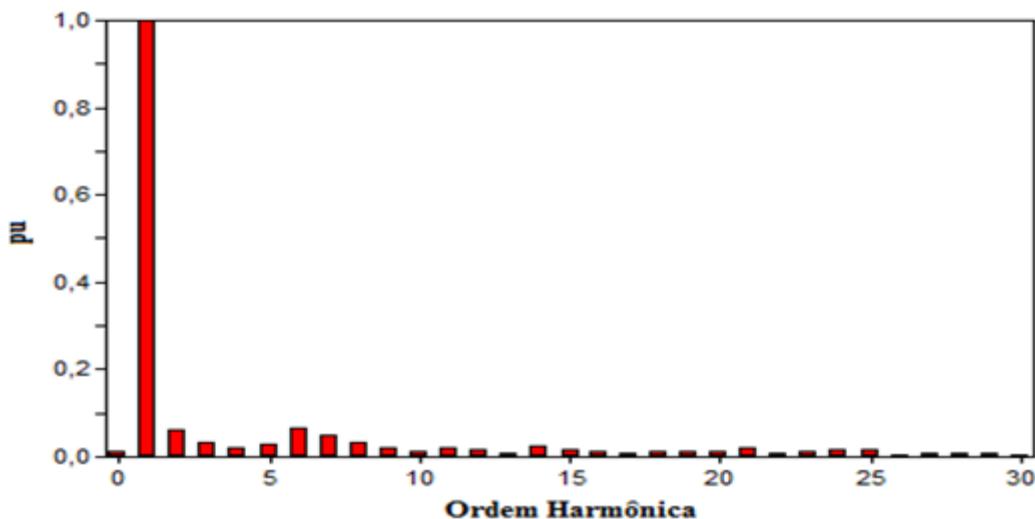


Figura 4.27 – Espectro das correntes harmônicas na carga isolada (em pu) – Caso 1.

## 4.5. – Resultados para o Caso 2

A situação aqui considerada apresenta-se, estruturalmente, similar a anterior, exceto pelo fato que o perfil do vento incidente, antes apenas com uma velocidade base constante e ruídos, passa a se apresentar com: uma componente base de 9 m/s, inserção de rajada e rampa que chegam a valores máximos de velocidade de 2,5 m/s, e ainda, os ruídos. Portanto, o presente caso contempla uma condição operacional com maior identidade com os fenômenos reais. Não obstante a isto, vale ressaltar que os níveis impostos para as velocidades limites para o vento, para o presente momento, não implicam em qualquer atuação do controle *Pitch*. É importante observar que todos os resultados aqui apresentados e discutidos são advindos na estrutura laboratorial em escala reduzida, portanto, são desempenhos experimentais.

### 4.5.1. – Ponto 01

A Figura 4.28 apresenta o vento base de 9 m/s e suas componentes: rampa, rajada e ruídos.

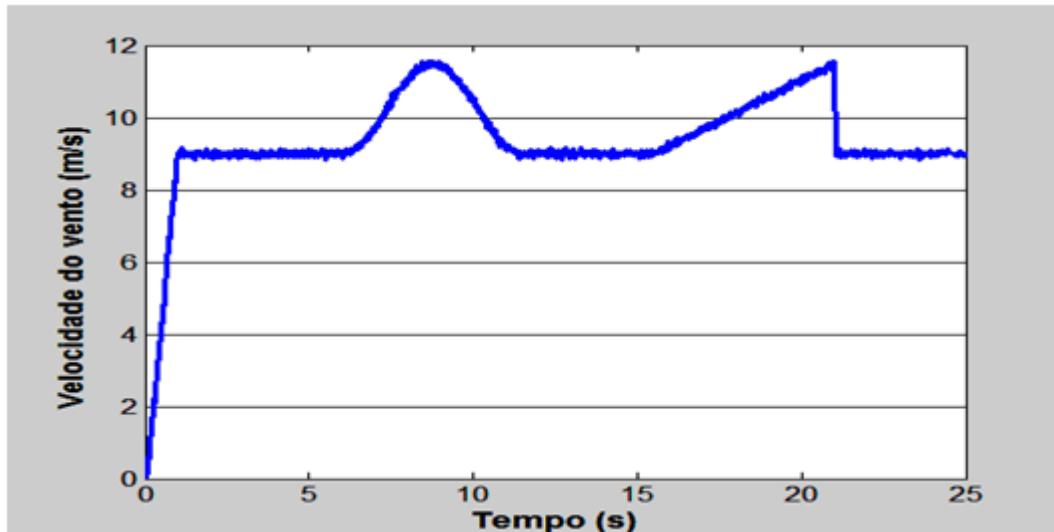


Figura 4.28 – Velocidade do vento – Caso 2.

Na Figura 4.29 é exibida a velocidade mecânica do eixo da turbina eólica, a qual é a mesma do gerador elétrico. Como pode ser constatado, esta grandeza, originalmente numa base de 940 rpm, é incrementada para aproximadamente 1350 rpm nos picos da rajada e rampa.

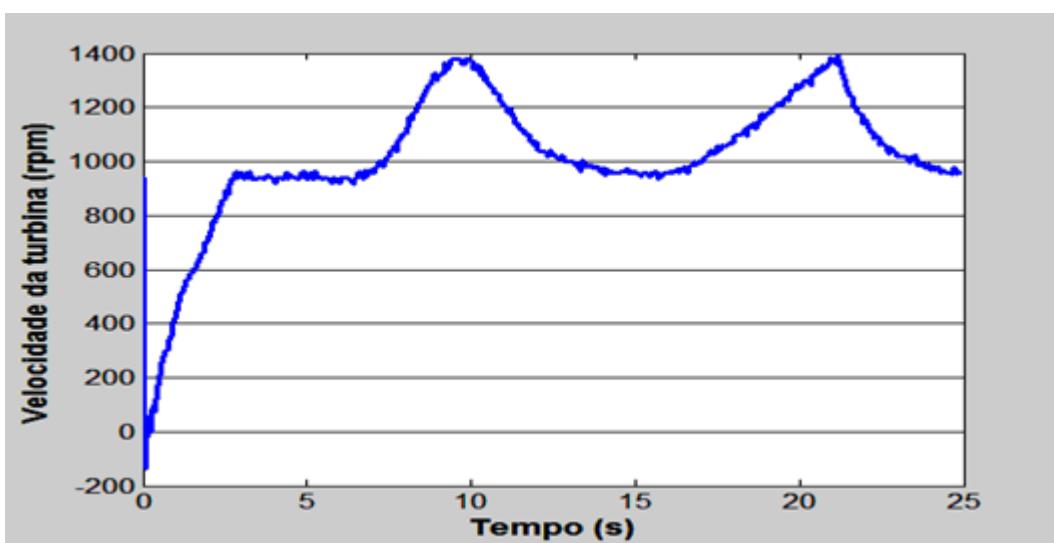


Figura 4.29 – Velocidade mecânica da turbina – Caso 2.

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

Na Figura 4.30 tem-se o coeficiente de potência  $C_p$  o qual sofre algumas variações durante a rajada e a rampa, reduzindo temporariamente o seu valor. A título de ilustração, nos momentos subsequentes à aplicação da rampa o coeficiente sofre uma maior perturbação caindo de 0,45 para 0,375, pois a velocidade do vento decai instantaneamente de 11,5 para 9 m/s. Essas alterações no perfil do  $C_p$  ocorrem devido a não existência de um controle de otimização da eficiência do conjunto, neste caso seria necessário um conversor de máquina (retificador controlado) o qual é capaz de manter o coeficiente de potência no seu valor máximo  $C_{p \text{ ótimo}}$ . Conforme foi visto no Capítulo 2, através da modelagem matemática das turbinas eólicas, pode-se melhorar o coeficiente de potência fixando o seu valor próximo ao máximo, utilizando conversores que conseguem controlar a injeção de potência elétrica na rede. Controlando a potência fornecida à carga consegue-se alterar a velocidade angular da turbina (pois a quantidade de carga altera o conjugado da máquina) de tal forma que uma razão de velocidade ótima seja alcançada, adequando o  $C_p$  ao seu valor máximo. Estas propriedades, todavia, não se encontram disponibilizadas para a estrutura experimental estabelecida.

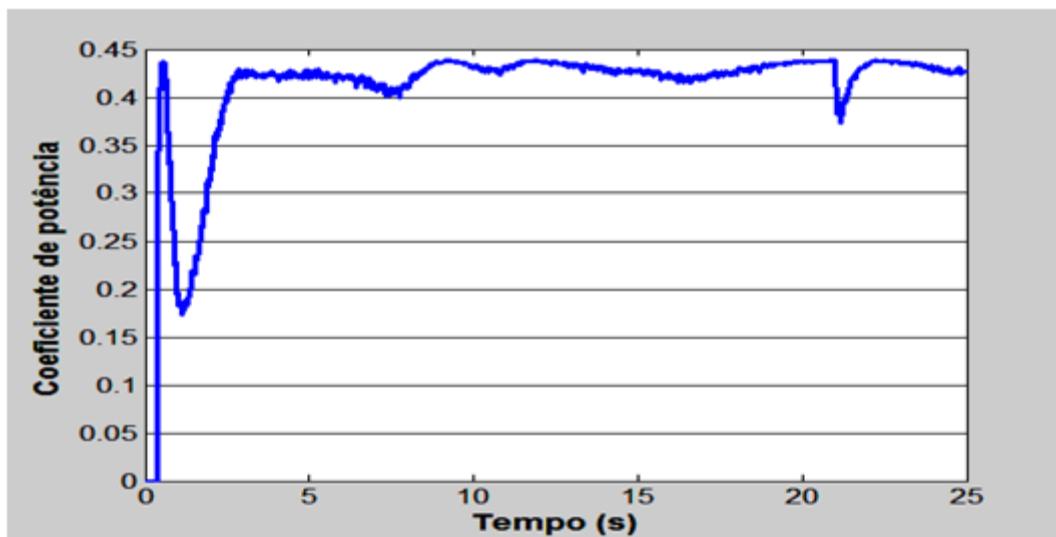


Figura 4.30 – Coeficiente de potência – Caso 2.

Na Figura 4.31 é apresentada a potência aerodinâmica extraída do vento. Como já esclarecido, o gráfico encontra-se correlacionado com os níveis que seriam disponibilizados em um sistema real, e não com o arranjo em escala reduzida aqui considerado. Isto conduziu a potências que se apresentam em centenas de kW, enquanto que, no modelo laboratorial, como será constatado, as unidades ficam restritas a W.

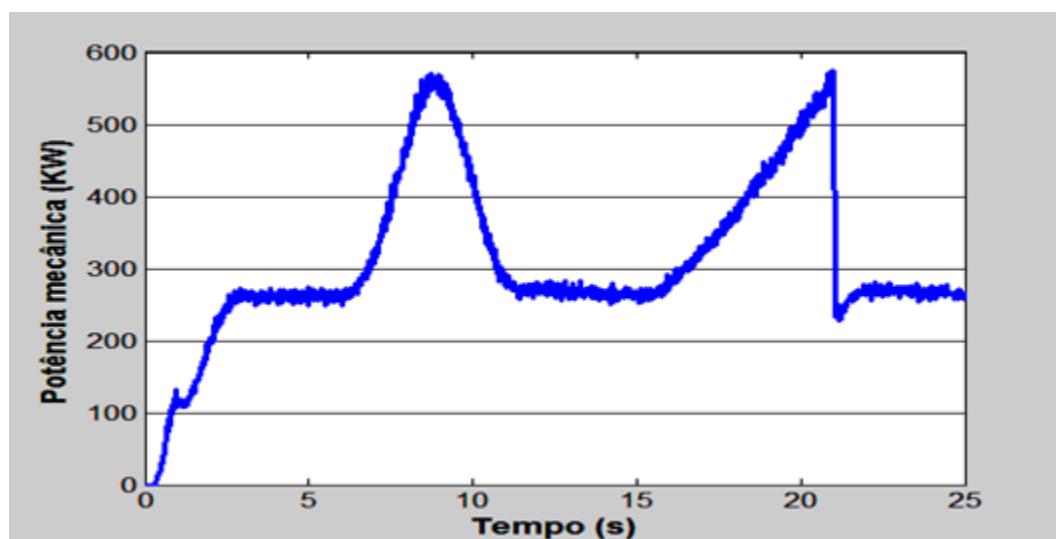


Figura 4.31 – Potência que seria disponibilizada no eixo de uma turbina eólica comercial para a situação imposta pelo Caso 2.

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

A Figura 4.32, apresenta os resultados laboratoriais correspondentes à situação representada pelo denominado Caso 2. Como se percebe, respeitadas as escalas reduzidas factíveis de representação no ambiente laboratorial, a potência disponibilizada cresce de 433 W para 950 W nos picos da rajada e da rampa.

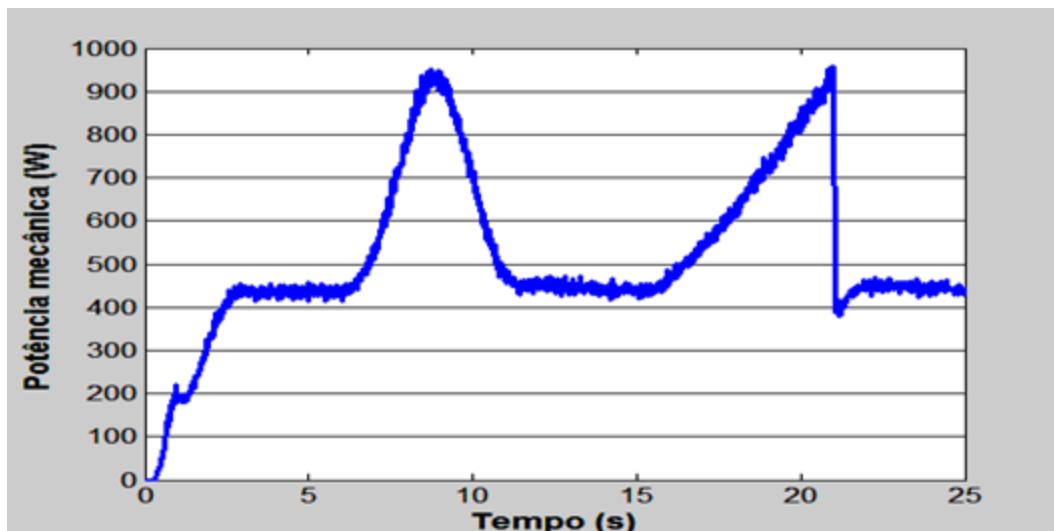


Figura 4.32 – Potência disponibilizada pelo motor de CC em ambiente laboratorial – Caso 2.

A Figura 4.33 é indicativa do torque mecânico oferecido pelo motor CC ao eixo do gerador síncrono. Verifica-se que, apesar do torque mecânico variar de 4,20 N\*m para 7,10 N\*m nos picos da rampa e rajada, o controle *Pitch* não foi acionado, como previsto anteriormente.

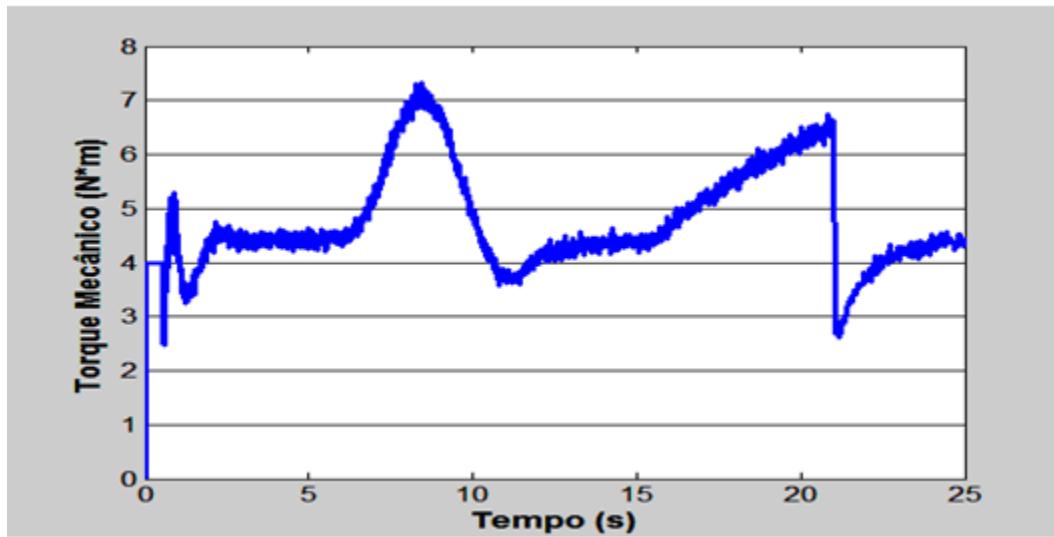


Figura 4.33 – Torque mecânico verificado no eixo do gerador – Caso 2.

#### 4.5.2. – Ponto 02

Este ponto, de acordo com a Figura 4.1, corresponde aos terminais de saída do gerador síncrono. Assim sendo, na Figura 4.34 têm-se as tensões trifásicas ao longo do período de estudo. Mais uma vez pode-se observar uma boa correlação entre as grandezas envolvidas no processo. De fato, em se tratando de um gerador a imã permanente, aumentos da velocidade em seu eixo determinam incrementos na amplitude das tensões produzidas, assim como também das frequências. Não obstante a isto, as alterações destas últimas grandezas não podem ser verificadas em uma única figura devido ao longo período amostrado.

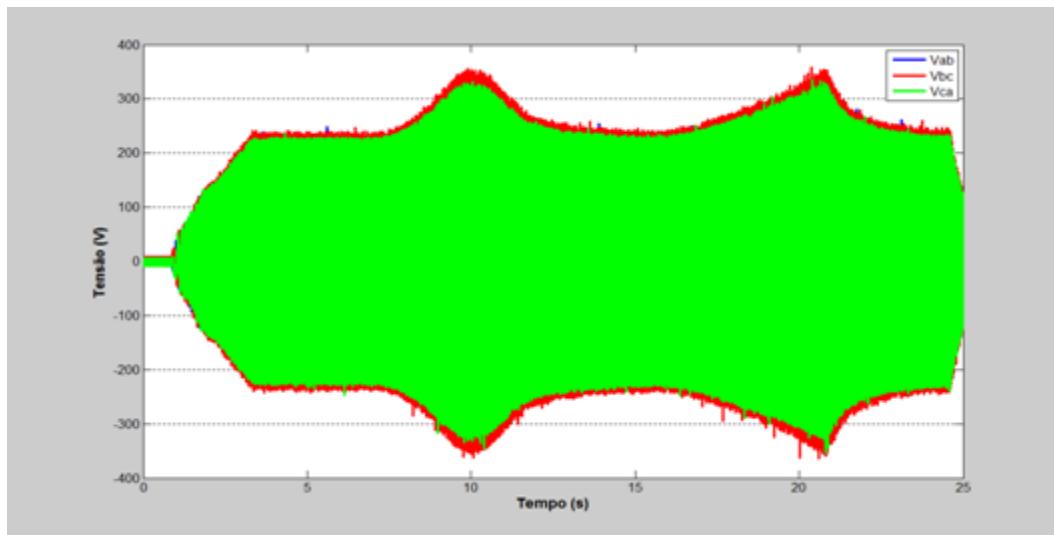


Figura 4.34 – Tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 2.

Complementarmente, na Figura 4.35 tem-se o desempenho do valor eficaz das tensões no decorrer do intervalo de tempo analisado. Percebe-se que a tensão que, para as condições do vento básico se situava em 143 V, com a incidência dos distúrbios na forma de rajada e rampa, atingem, valores de até 215 V. As oscilações dos valores se justificam pelos ruídos inseridos no vento base e pela taxa de amostragem dos equipamentos de medição.

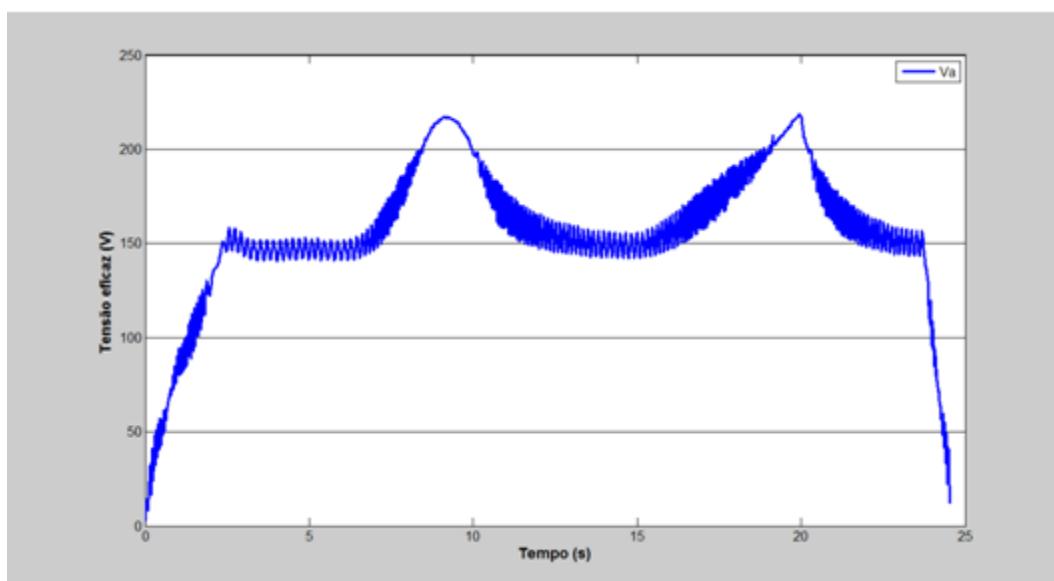


Figura 4.35 – Valores eficazes das tensões fornecidas pelo gerador – Caso 2.

Objetivando maiores detalhes sobre as formas de ondas produzidas pelo gerador, a Figura 4.36 e a Figura 4.37 mostram os detalhes para as três tensões nos momentos que ocorrem os picos da rajada e da rampa, respectivamente. Como se constata, as mesmas formam um conjunto trifásico de tensões, com expressiva distorção e com uma frequência fundamental variando de 33 Hz para 43 Hz (nos picos). Estes valores de frequências se apresentam em sintonia com a velocidade do vento imposta e com o número de polos do circuito de campo da máquina geradora.

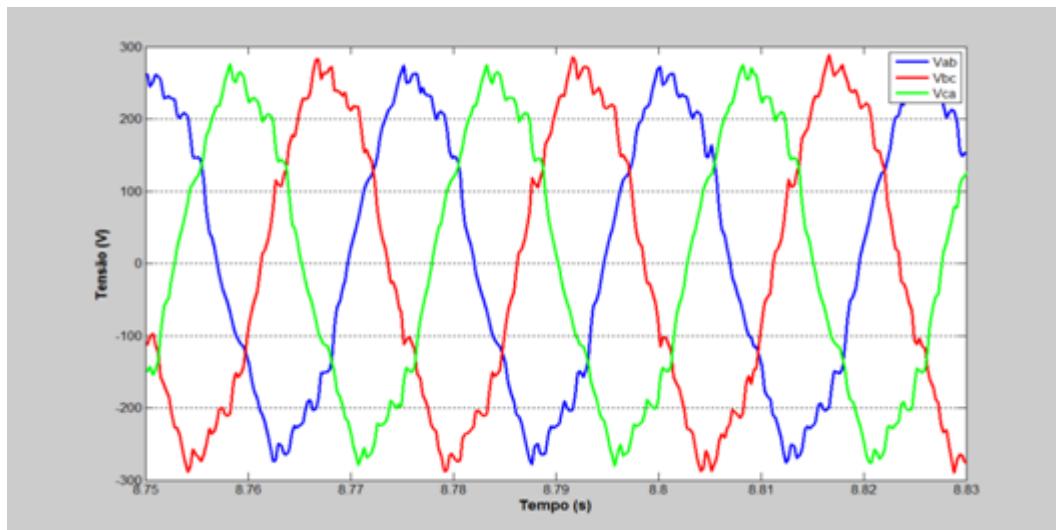


Figura 4.36 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rajada – Caso 2.

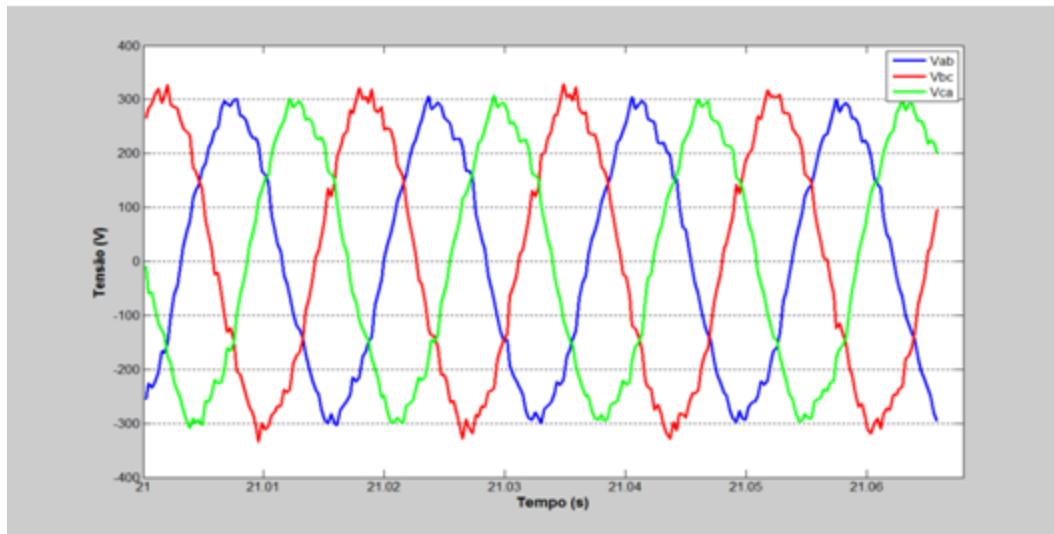


Figura 4.37 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rampa – Caso 2.

A Figura 4.38 e a Figura 4.39 apresentam os espectros correspondentes para as componentes harmônicas, nos picos da rajada e da rampa, respectivamente.

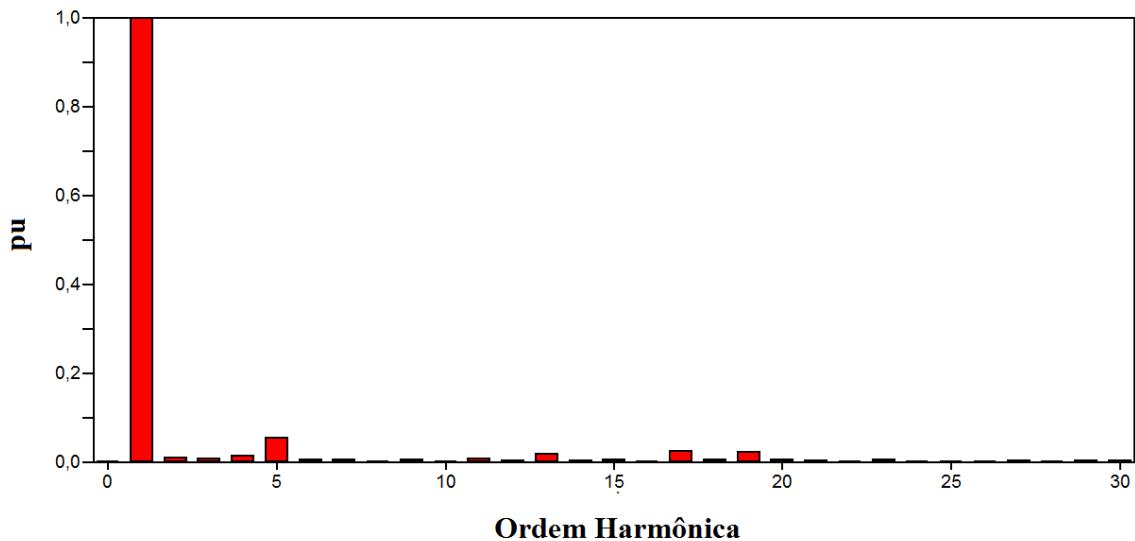


Figura 4.38 – Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no momento do pico da rajada – Caso 2.

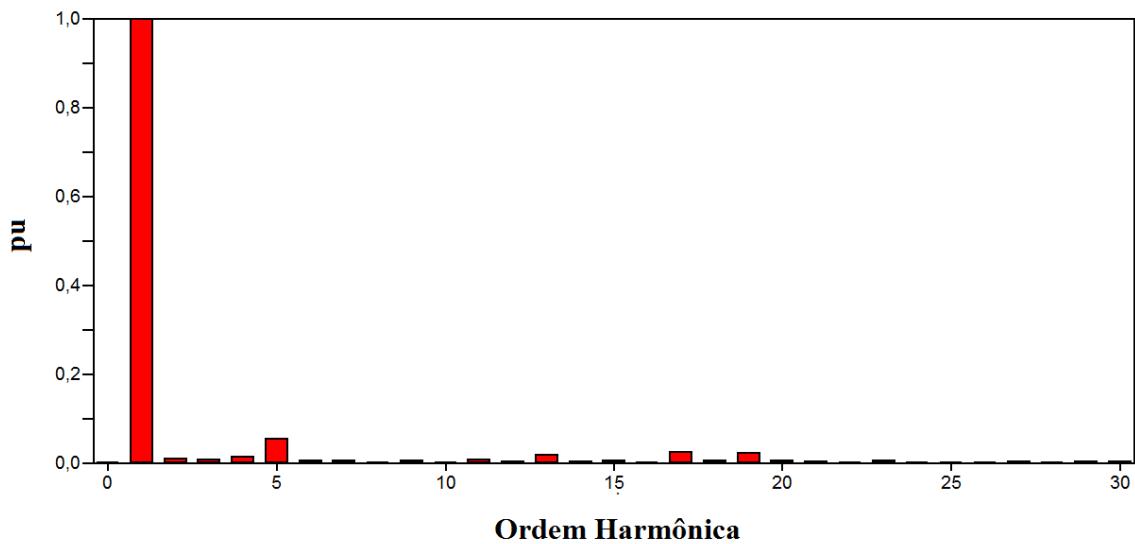


Figura 4.39 - Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no momento do pico da rampa - Caso 2.

De forma semelhante ao exposto para as tensões, na Figura 4.40, podem-se observar as correntes de linha na saída do gerador, enquanto que na Figura 4.41 tem-se o perfil das correntes eficazes, uma vez que o arranjo se encontra numa situação típica de suprimento de carga.

Como pode ser constatado, o valor eficaz original de 0,38 A que ocorre somente com a componente base, quando da manifestação da rajada e rampa são alterados, respectivamente, para 0,25 A e 0,21 A, quando tais fenômenos atingem seus picos. No que tange às oscilações indicadas, estas se devem aos ruídos inseridos no processo e a taxa de amostragem dos equipamentos de medição.

Neste momento cabe uma importante observação: diferentemente do esperado, ao ocorrer elevações da fonte primária de energia, na forma de rajadas e rampas, as correntes diminuem. A explicação disto se apoia numa limitação imposta pelo tipo de inversor empregado na montagem experimental. Este se apresenta com um controle próprio definido pelo fabricante desta unidade, o qual, independentemente da tensão CC de entrada, mantém o valor eficaz da tensão CA de saída constante. Assim, a carga suprida se comporta como sendo

do tipo potência constante e, nestas circunstâncias, aumentos da tensão implicam em reduções da corrente.

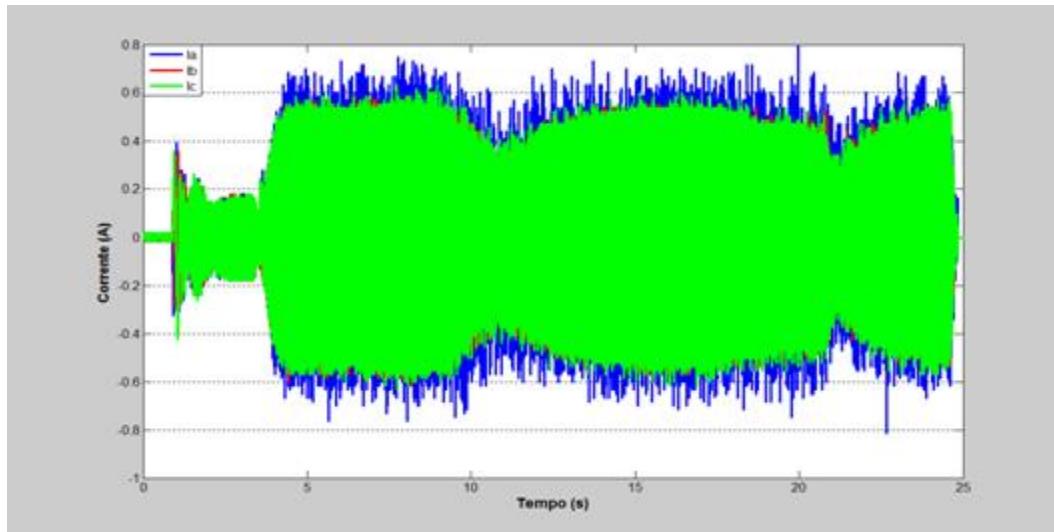


Figura 4.40 – Correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 2.

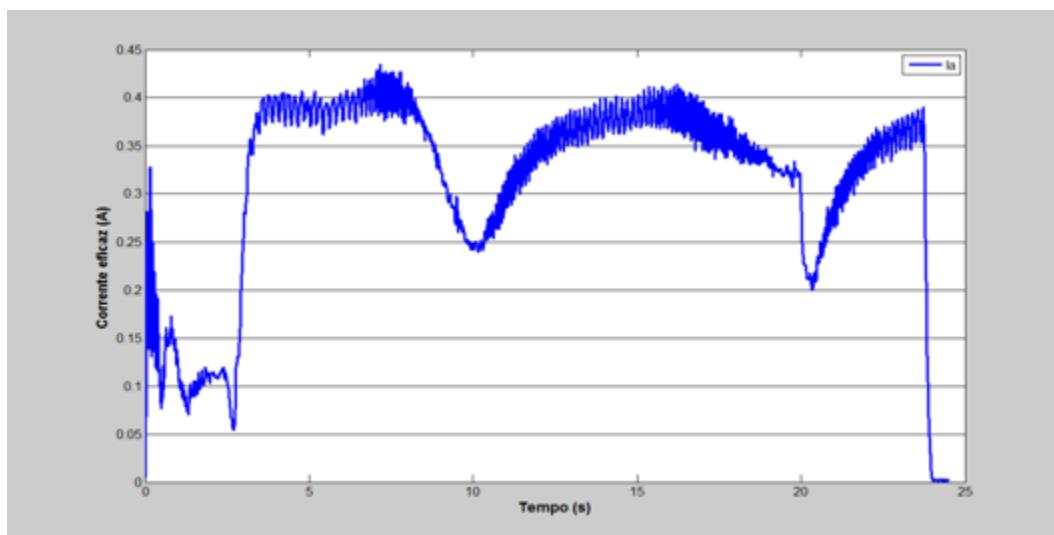


Figura 4.41 – Valores eficazes das correntes de linha fornecidas pelo gerador – Caso 2.

Quanto às formas de onda para as correntes, o detalhe da Figura 4.42 e Figura 4.43 evidenciam um expressivo conteúdo harmônico durante os picos da rajada e da rampa, respectivamente. Essas distorções eram esperadas em decorrência do fato que o gerador supre diretamente uma unidade retificadora de 6 pulsos.

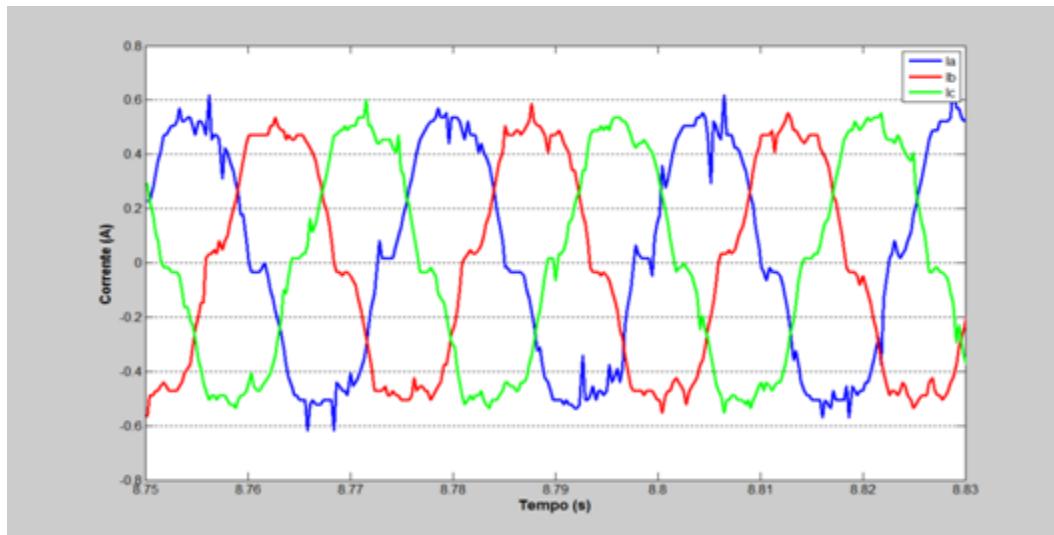


Figura 4.42 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rajada – Caso 2.

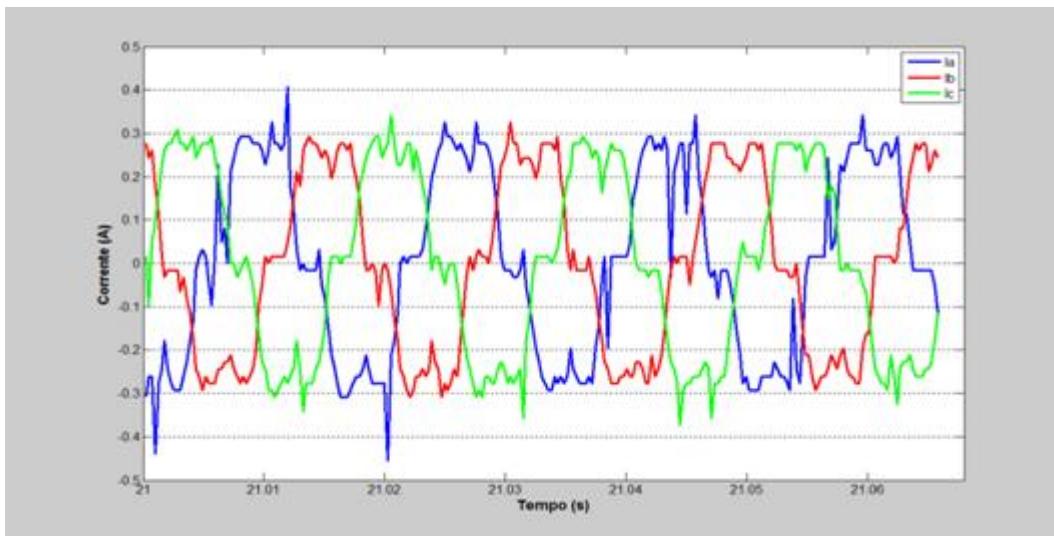


Figura 4.43 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador no momento do pico da rampa – Caso 2.

A Figura 4.44 e a Figura 4.45 fornecem o espectro das correntes harmônicas e permitem constatar que as suas ordens mais significativas são aquelas previstas na operação de um retificador de 6 pulsos. A distorção harmônica total se apresenta em 13,57% e 23,52% no momento da rajada e rampa, respectivamente.

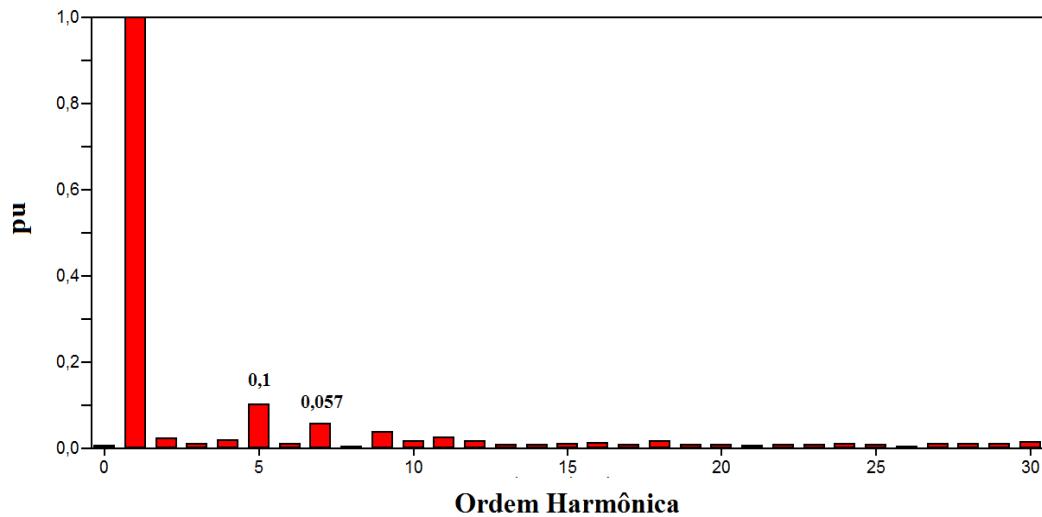


Figura 4.44 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no momento do pico da rajada - Caso 2.

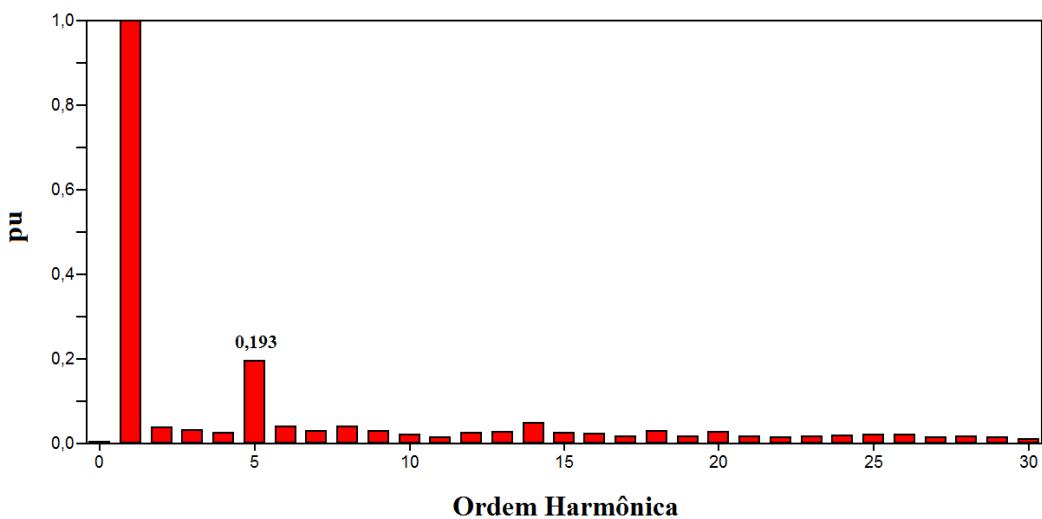


Figura 4.45 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no momento do pico da rampa - Caso 2.

#### 4.5.3. – Ponto 03

Em atenção ao diagrama identificador dos pontos de medição, os resultados aqui considerados são aplicáveis ao elo CC que interliga o retificador ao inversor. Em função disto, não resta dúvida que as duas grandezas mais relevantes referem-se à tensão presente no

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

barramento e à sua respectiva corrente, as quais se encontram mostradas na Figura 4.46 e Figura 4.47, respectivamente. Os perfis se apresentam em concordância com os fenômenos e grandezas aqui contempladas e apresentam-se com tensões variando entre 172 V e 280 V, e correntes entre 0,65 A e 0,35 A.

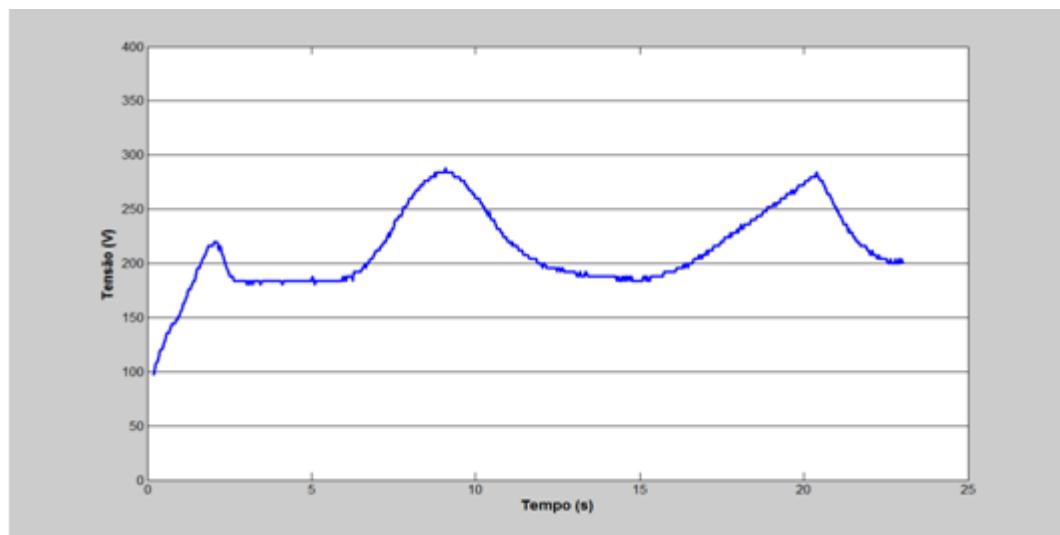


Figura 4.46 – Tensão no elo CC – Caso 2.

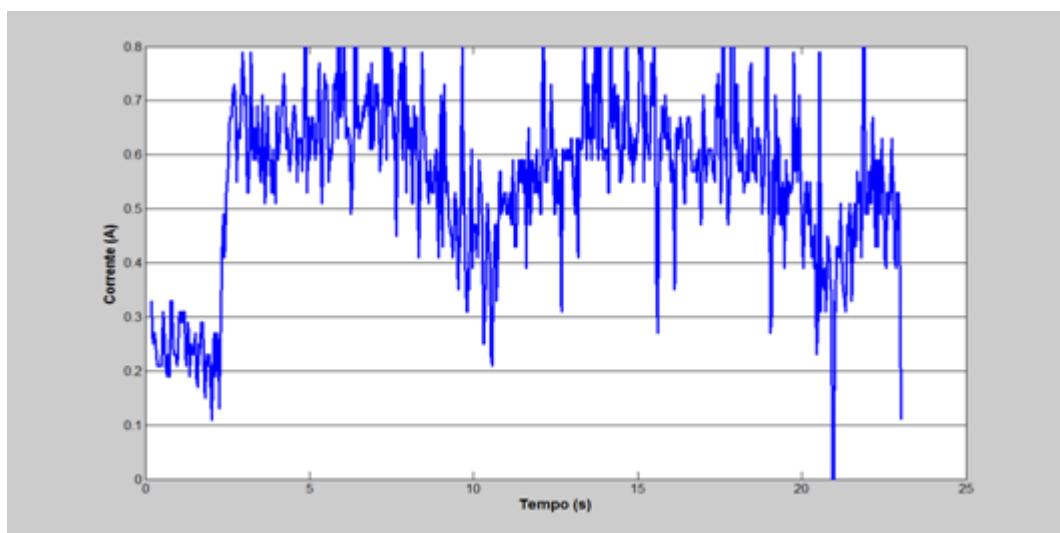


Figura 4.47 – Corrente no elo CC – Caso 2.

#### 4.5.4. – Ponto 04

Uma vez que o barramento CC disponibiliza as tensões anteriormente indicadas, o inversor, por sua vez, nos termos classicamente conhecidos, promove uma sucessão de chaveamentos visando à obtenção de um conjunto trifásico CA de tensões em seus terminais de saída. Assim agindo obtém-se as tensões instantâneas mostradas na Figura 4.48. Estas evidenciam uma região inicial nula, cujos motivos já foram considerados para o caso precedente. E mais uma vez, as oscilações em amplitude estão diretamente atreladas com as variações do vento incidente.

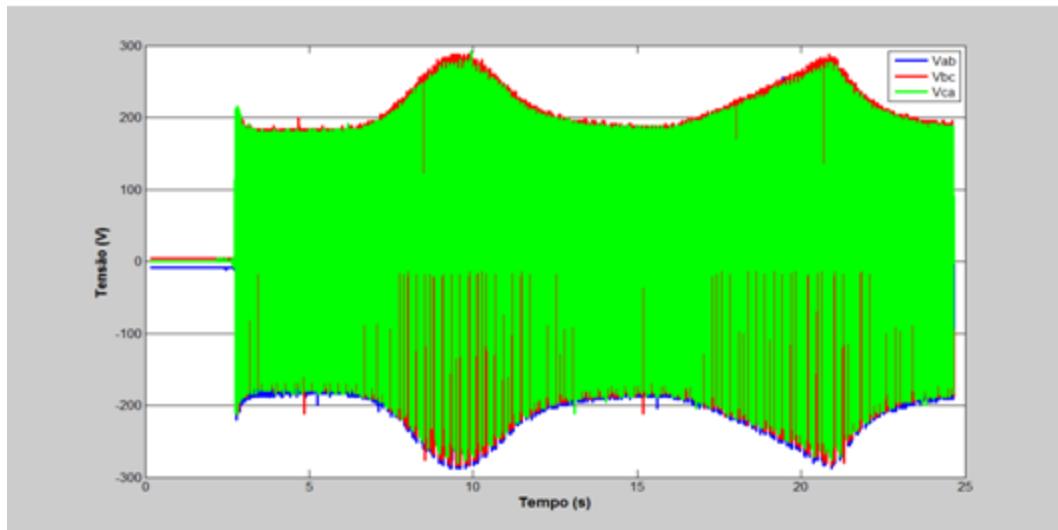


Figura 4.48 – Tensões trifásicas na saída do inversor – Caso 2.

Visando detalhar as formas de onda das tensões acima referidas, a Figura 4.49 e a Figura 4.50 mostram detalhes para pontos específicos das tensões acima referidas e, novamente, esclarecem que as mesmas são compostas por uma sucessão de pulsos, nos termos classicamente definidos pelas filosofias de operação dos inversores de frequência.

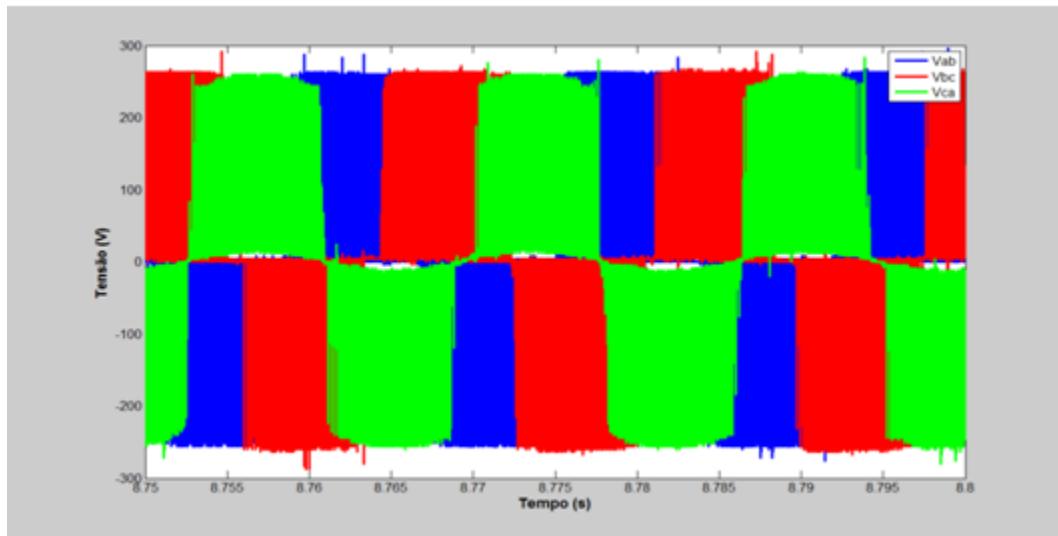


Figura 4.49 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no instante do pico da rajada – Caso 2.

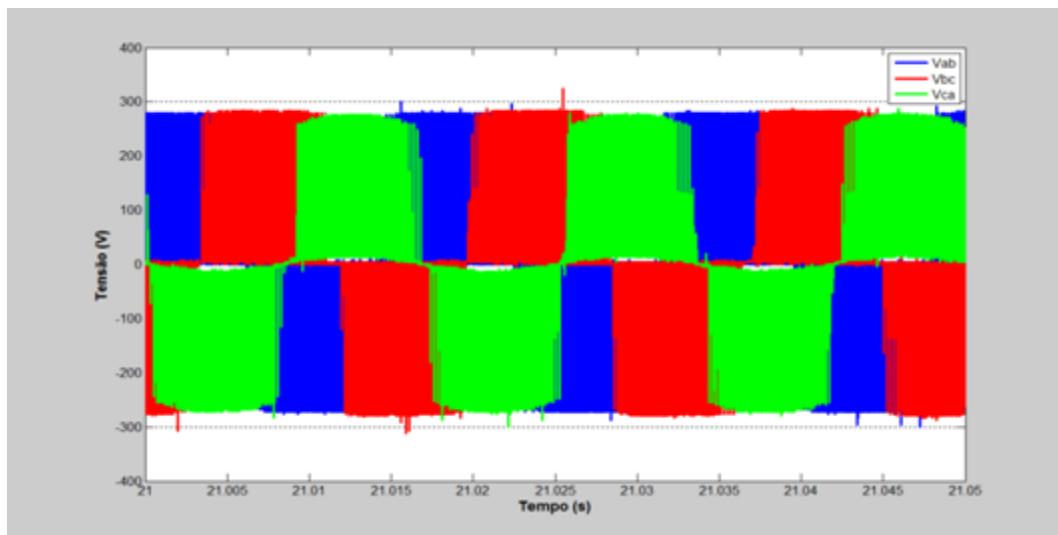


Figura 4.50 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no instante do pico da rampa – Caso 2.

A Figura 4.51 e a Figura 4.52 encontram-se correlacionadas com o conteúdo harmônico presente na tensão de saída do inversor. Como seria esperado, nestas constata-se ordens harmônicas mais pronunciadas e que se apresentam em blocos múltiplos inteiros da frequência de chaveamento de 15 kHz. As demais ordens que não estas se constituem em frequências espúrias. Resumindo, as figuras apresentam um espalhamento do espectro com

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

inter-harmônicas. Os níveis para a distorção total encontram-se em torno de 78% e 83% no instante da rajada e da rampa, respectivamente.

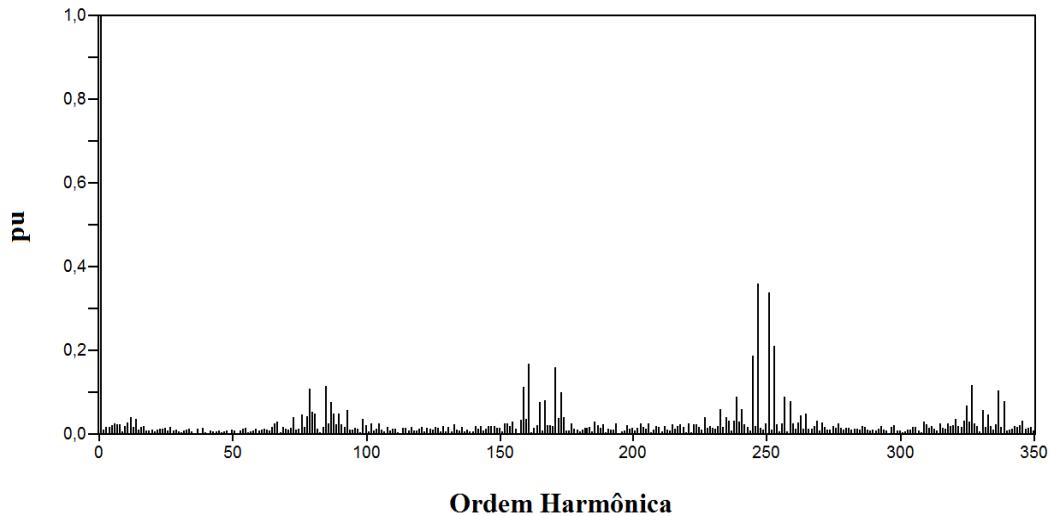


Figura 4.51 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) no instante do pico da rajada - Caso 2.

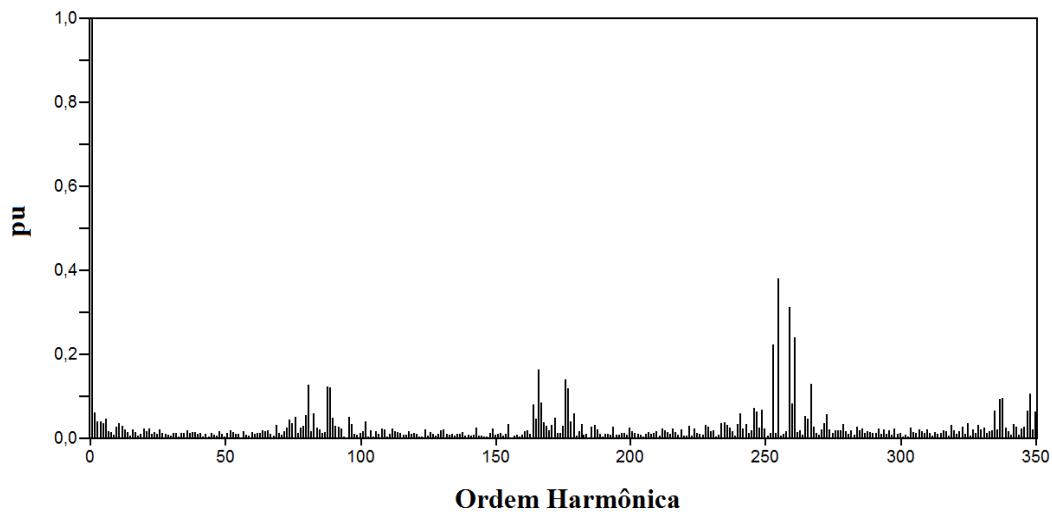


Figura 4.52 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) no instante do pico da rampa - Caso 2.

#### 4.5.5. – Ponto 05

As tensões trifásicas aplicadas à carga são apresentadas na Figura 4.53. Muito embora as aparentes variações das tensões vale ressaltar que, no que se refere às amplitudes, isto realmente ocorre, todavia, como será esclarecido, estes incrementos em valores de pico são compensados pelo inversor na forma de redução das larguras dos pulsos destinados a formação das tensões, e, assim, os valores eficazes são mantidos constantes. O motivo disto foi apresentado anteriormente, quando se discutiu a filosofia básica do controle do inversor comercial utilizado para a montagem da estrutura física do laboratório.

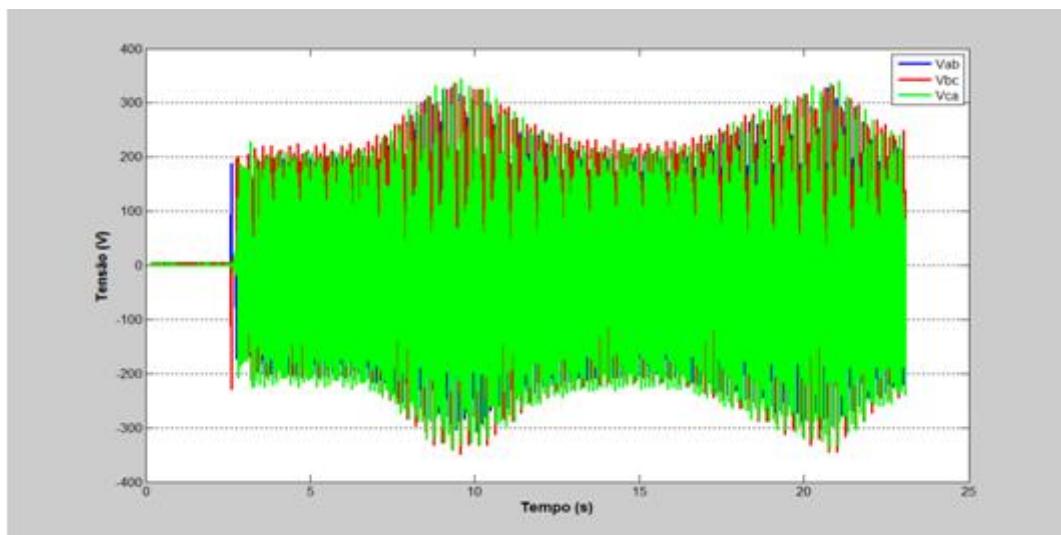


Figura 4.53 – Tensões trifásicas nos terminais da carga isolada – Caso 2.

A Figura 4.54 e a Figura 4.55 apresentam os detalhes das formas de ondas nos momentos do pico da rajada e da rampa na saída do transformador. Pode-se constatar que as tensões do lado secundário do transformador de acoplamento, comparativamente aos resultados da Figura 4.49 e Figura 4.50, se mostram com formas de onda melhoradas quanto à questão das distorções harmônicas.

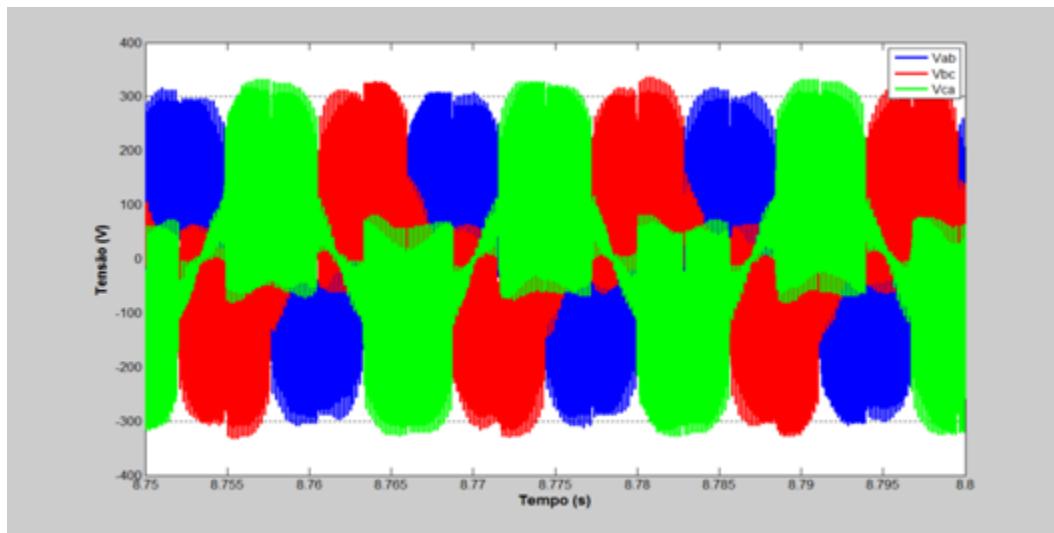


Figura 4.54 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no momento do pico da rajada – Caso 2.

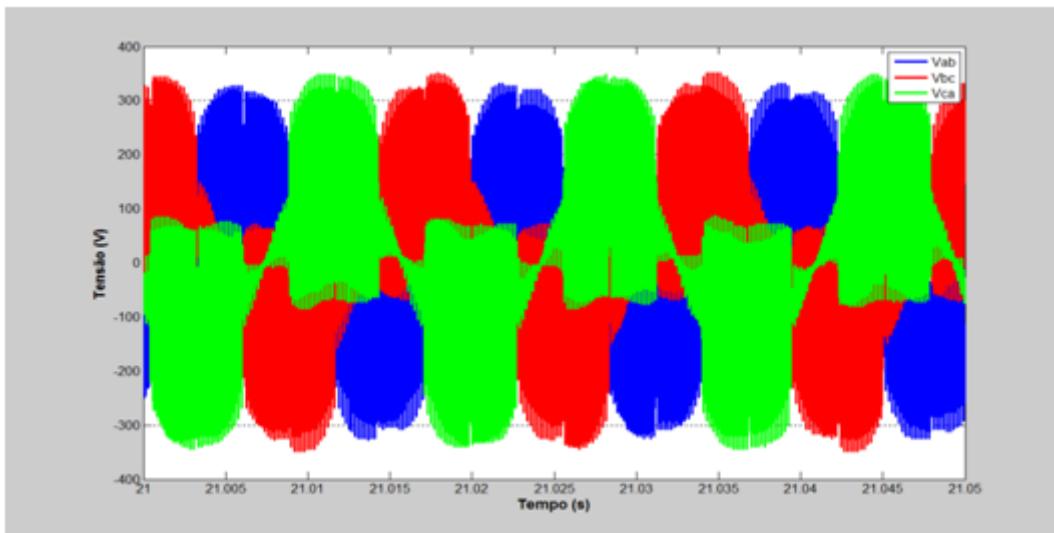


Figura 4.55 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no momento do pico da rampa – Caso 2.

Os espectros das tensões harmônicas anteriormente referidas encontram-se na Figura 4.56 e Figura 4.57. Suas distorções harmônicas totais encontram-se na faixa de 75,08 % e 79,56 %, para o pico da rajada e rampa, respectivamente. Devido a ausência de filtros na saída do inversor isto determina que a tensão apresenta ainda componentes harmônicas dominantes nas imediações daquela empregada pelo inversor para os chaveamentos.

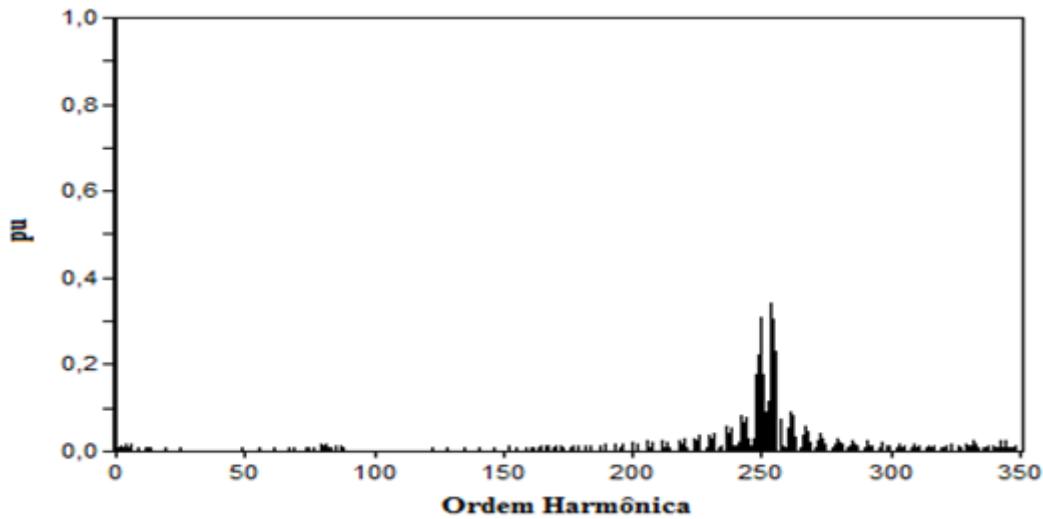


Figura 4.56 – Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no pico da rajada – Caso 2.

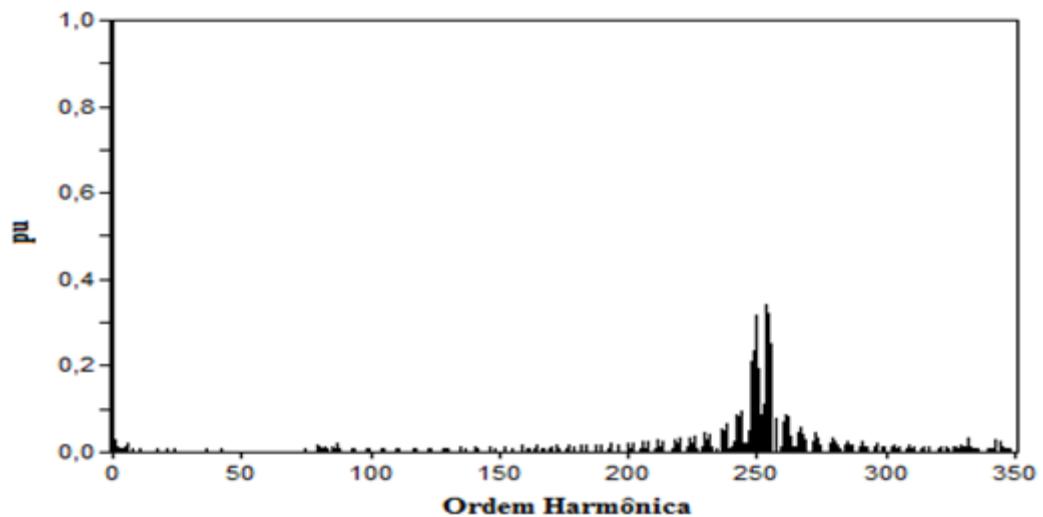


Figura 4.57 – Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no pico da rampa – Caso 2.

No que se refere às correntes de linha, estas se apresentam como indicado na Figura 4.58 e Figura 4.59, associadas, respectivamente, com os valores instantâneos e a segunda aos valores eficazes. Observa-se que as magnitudes destas grandezas se apresentam praticamente constantes ao longo da região amostrada, fato este que se justifica pelos mesmos motivos já

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

apresentados e relacionados com o princípio funcional do inversor. Como indicado, o valor da corrente eficaz se apresenta em torno de 0,48 A.

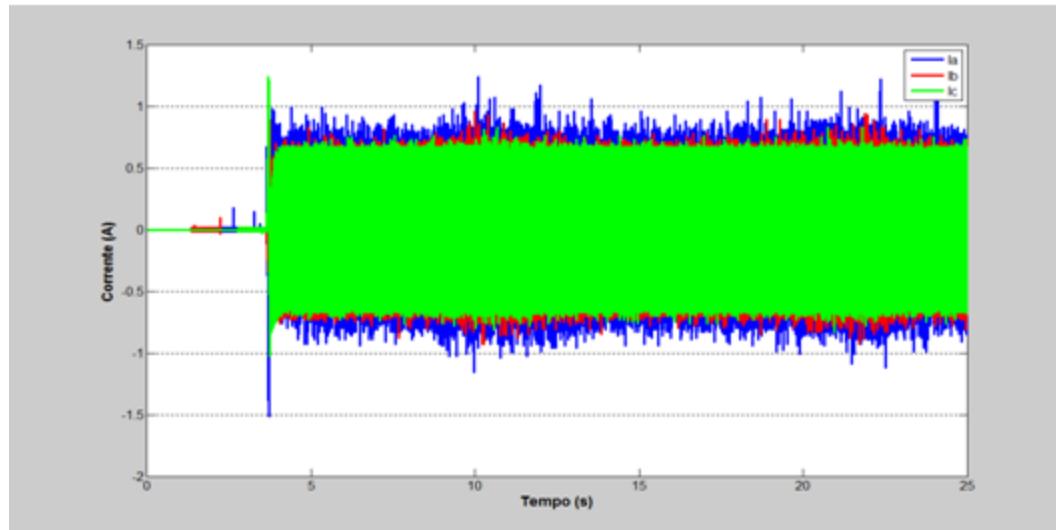


Figura 4.58 – Correntes trifásicas fornecidas para a carga isolada – Caso 2.

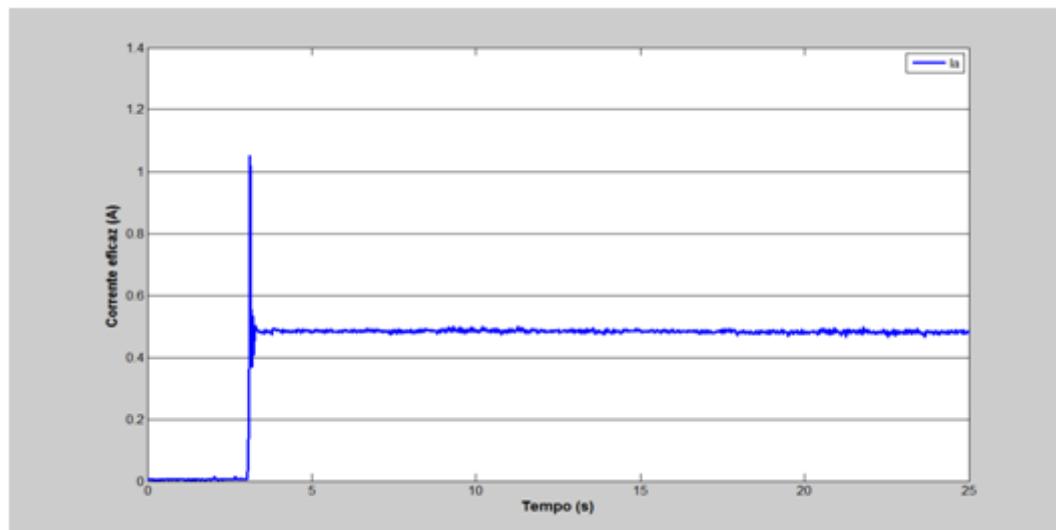


Figura 4.59 – Valores eficazes das correntes de linha para a carga isolada – Caso 2.

Na Figura 4.60 e Figura 4.61 são apresentados os detalhes das correntes nos momentos da rajada e da rampa, respectivamente.

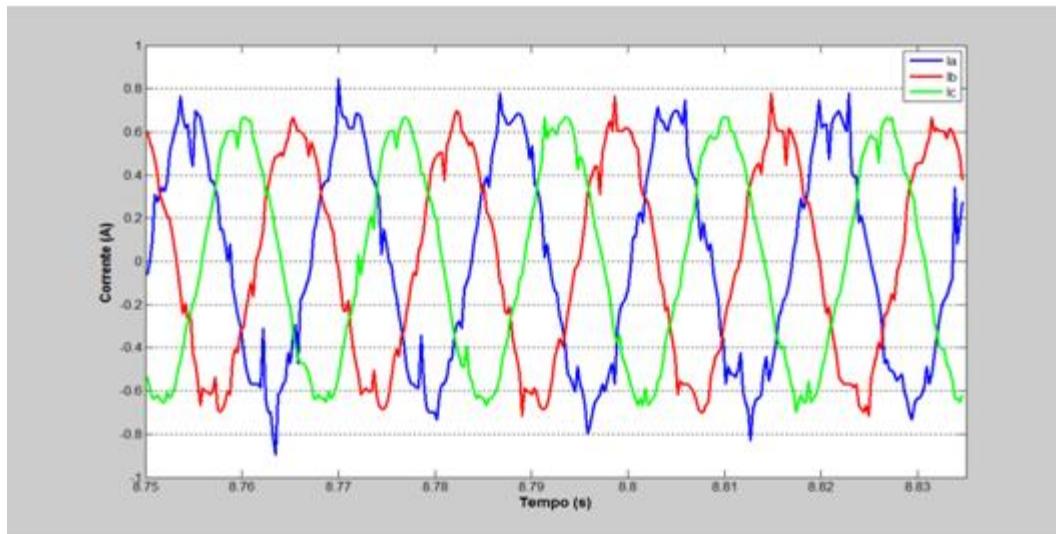


Figura 4.60 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada no momento do pico da rajada – Caso 2.

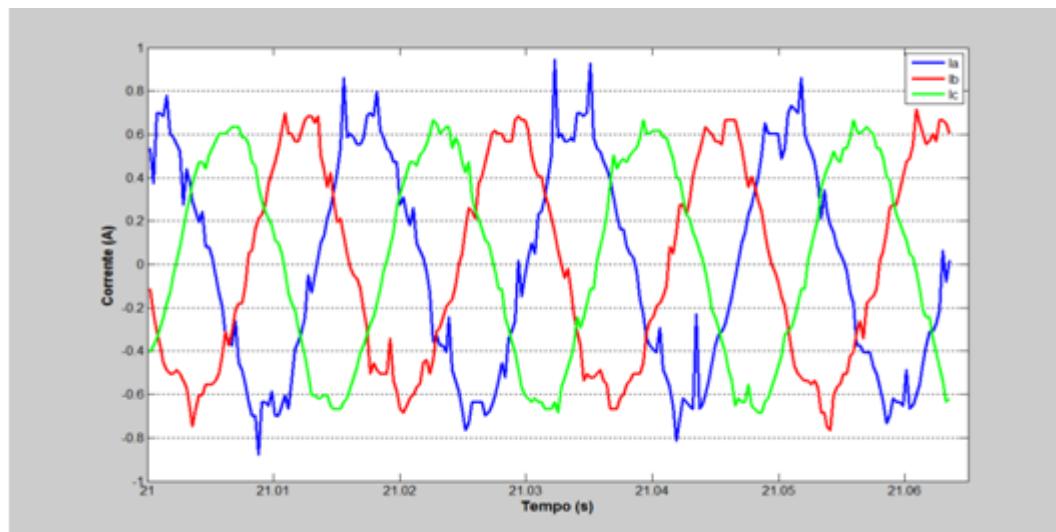


Figura 4.61 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada no momento do pico da rampa – Caso 2.

A Figura 4.62 apresenta o espectro harmônico das correntes injetadas na carga isolada no momento do pico da rampa. A taxa de distorção harmônica está em torno de 17,14%.

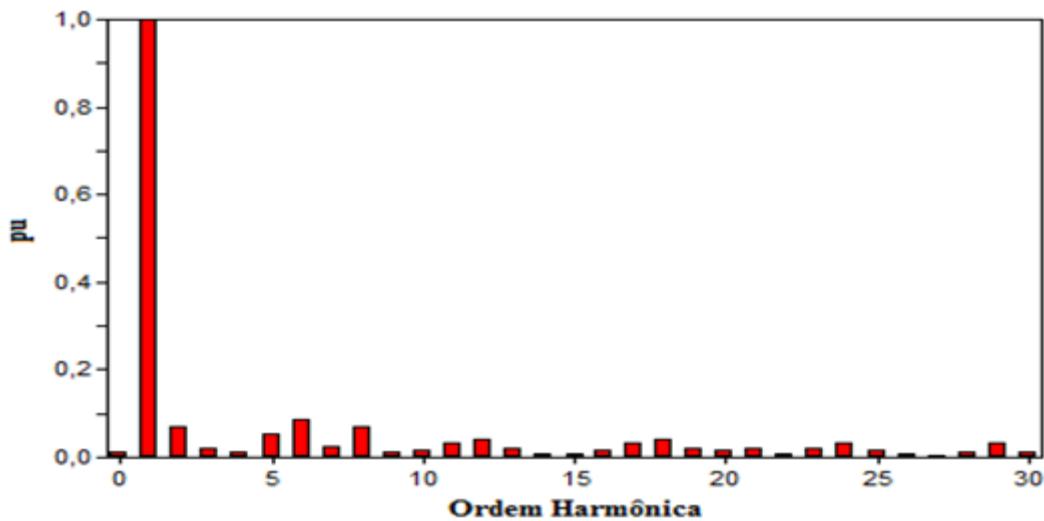


Figura 4.62 – Espectro das correntes harmônicas na carga isolada (em pu) durante o pico da rampa – Caso 2.

#### 4.6. – Resultados para o Caso 3

O último caso estudado representa uma ocorrência típica através da qual as características do vento incidente, no que tange a sua velocidade, se apresenta em proporções tais que o controle *Pitch*, é acionado, visando, como estabelecido, a limitação do processo de transferência da velocidade e, por conseguinte, da potência transmitida ao eixo do gerador.

Em função das metas estabelecidas, o perfil das variações adotado para a fonte primária de energia compreende a definição de um comportamento para o vento de tal modo que as rampas e rajadas aplicadas atingem níveis superiores ao limite admissível, para o caso adotado como sendo de 12 m/s. Assim sendo, ao longo do período simulado, o vento é composto pela componente base de 9 m/s, ruídos, e as componentes rajada e rampa, ambas com uma amplitude máxima de 4,5 m/s (acima do valor base).

#### 4.6.1. – Ponto 01

A Figura 4.63 apresenta o comportamento do vento, nos termos acima postos. Como se percebe, o mesmo é constituído por um vento base de 9 m/s, ruídos, e as componentes rajada e rampa, as quais, atingem valores de pico de 13,5 m/s.

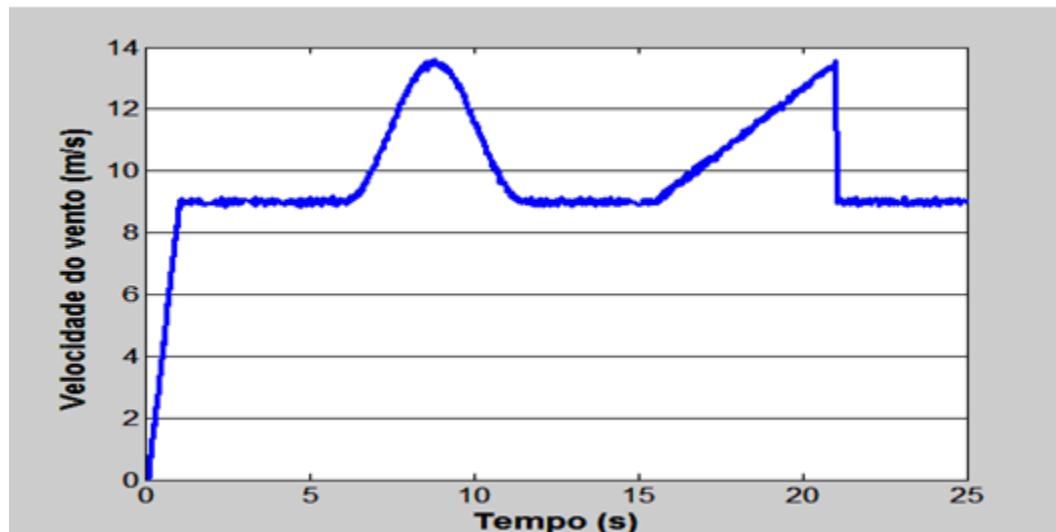


Figura 4.63 – Velocidade do vento – Caso 3.

Na Figura 4.64 corresponde a velocidade disponibilizada no eixo da turbina eólica ou do gerador síncrono. Como pode ser observada, esta grandeza, inicialmente em torno de 940 rpm, chega a cerca de 1400 rpm nos picos da rajada e rampa. Nessa figura é possível observar a reação do rotor da turbina diante dos patamares do vento incidente. Uma característica meritória de destaque é que, tão logo se percebe a atuação do controle *Pitch*, a rotação do eixo mostra um comportamento sugestivo de uma saturação de valores e constância enquanto perdura o excesso de vento.

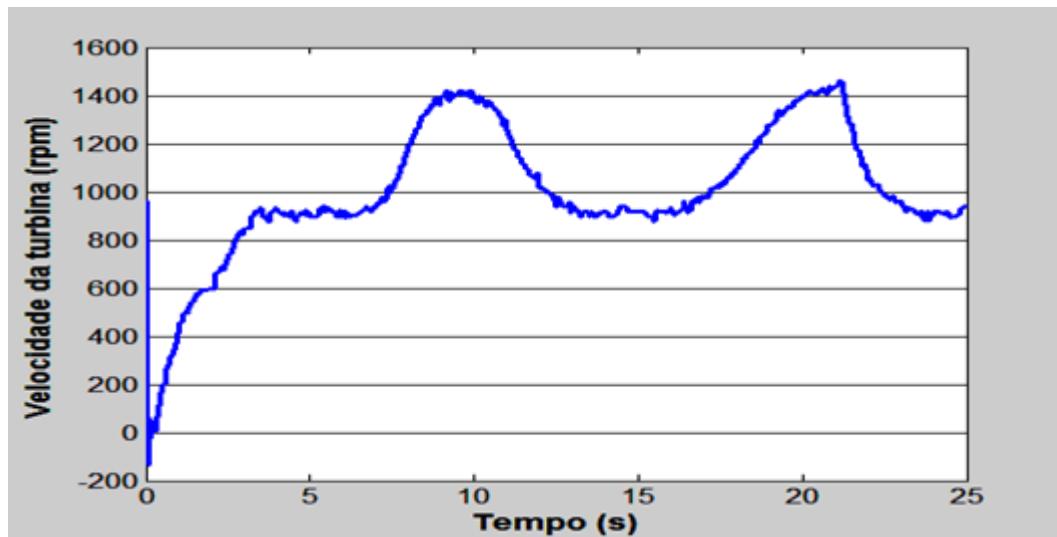


Figura 4.64 – Velocidade mecânica da turbina – Caso 3.

Na Figura 4.65 tem-se o coeficiente de potência  $C_p$ , o qual sofre grandes variações durante a rajada e a rampa, reduzindo temporariamente o seu valor, em consonância com a técnica de controle classicamente empregada para os objetivos operacionais deste tipo de geração de energia, no qual uma variação na velocidade do vento altera a razão de velocidade das pás  $\lambda$  de tal forma que o valor do  $C_p$  é alterado. Na região para a qual ocorre rampa o coeficiente sofre uma grande perturbação, indicando reduções de 0,45 até 0,24. Também, o referido coeficiente mostra uma expressiva redução durante os intervalos para os quais as velocidades ultrapassam os valores nominais pré-estabelecidos no controle.

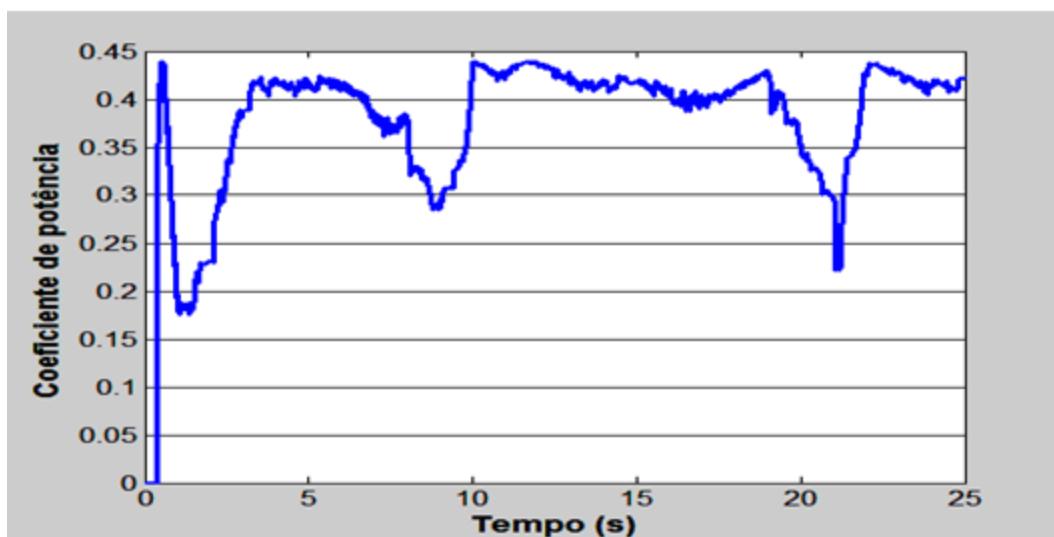


Figura 4.65 - Coeficiente de potência – Caso 3.

Na Figura 4.66 é apresentada a potência aerodinâmica extraída do vento, caso o aproveitamento em pauta fosse feito por um equipamento comercial. Mais uma vez, isto justifica a escala em kW, a qual, posteriormente, no ambiente laboratorial, corresponderá a apenas algumas dezenas de W.

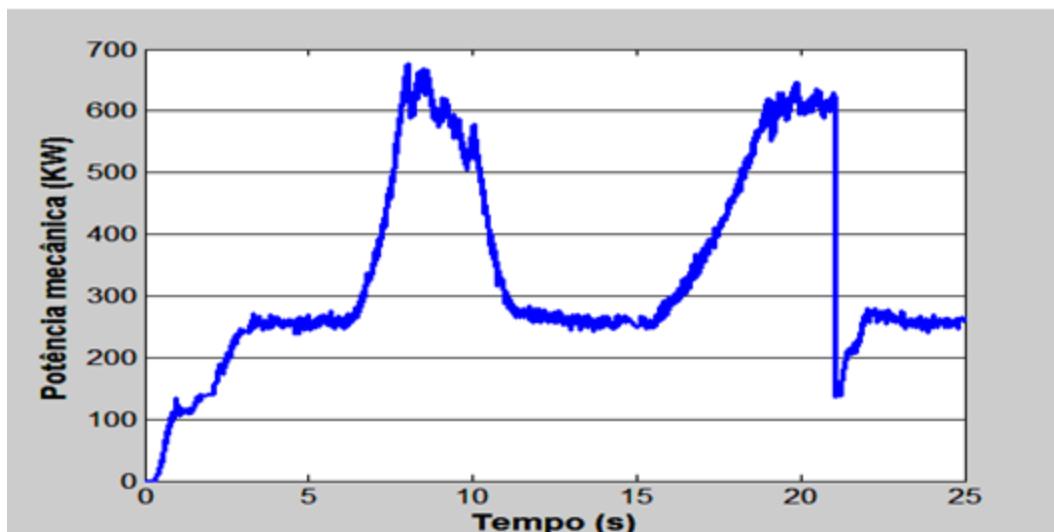


Figura 4.66 – Potência que seria disponibilizada no eixo de uma turbina eólica comercial para a situação imposta pelo Caso 3.

A Figura 4.67, apresenta os resultados correspondentes ao caso sob análise, respeitadas as escalas reduzidas da estrutura experimental. Os resultados evidenciam que a potência disponibilizada cresce de 433 W para valores superiores, conforme o funcionamento esperado e a ação do controle *Pitch*. Para o presente estudo, foi estabelecido um limite de velocidade associado com uma potência de 1000 W. A título informativo, caso não houvesse a ação do controle *Pitch*, o valor de pico do vento aqui utilizado conduziria a uma potência disponibilizada de 1250 W.

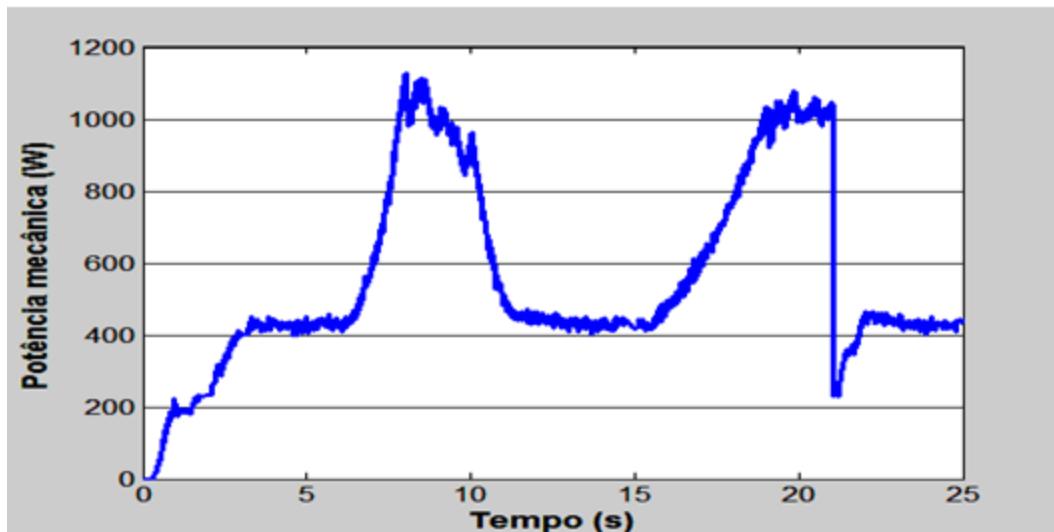


Figura 4.67 – Potência disponibilizada pelo motor CC em ambiente laboratorial – Caso 3.

A Figura 4.68 é indicativa do torque mecânico oferecido pelo motor CC ao eixo do gerador síncrono. Como mostrado, esta grandeza varia de 4,20 N\*m para um máximo de 9 N\*m no pico da rajada. Mais uma vez fica evidenciada a ação do controle *Pitch* nos valores do torque.

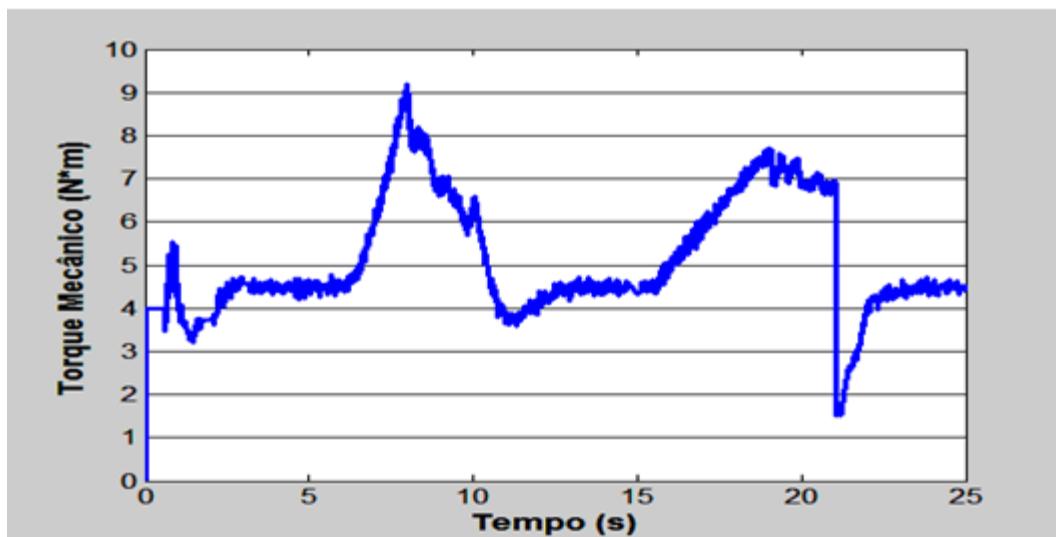


Figura 4.68 – Torque mecânico verificado no eixo do gerador – Caso 3.

Objetivando evidenciar a ação do controle *Pitch*, a Figura 4.69 indica o seu desempenho em termos das alterações nos ângulos das pás ocasionando, desta forma, uma delimitação da potência extraída do vento. Os resultados mostram que sua atuação é relativamente lenta ao promover a redução da potência, quando esta ultrapassa o valor máximo admissível. Isto ocorre em sintonia com a velocidade estipulada para a atuação do controle, a qual, para o presente caso, foi adotada como  $10^{\circ}/s$ . Uma vez realizada sua função, o retorno à situação inicial, isto é para um ângulo de  $0^{\circ}$ , também se apresenta relativamente lento, o que é devido a inércia mecânica da turbina eólica.

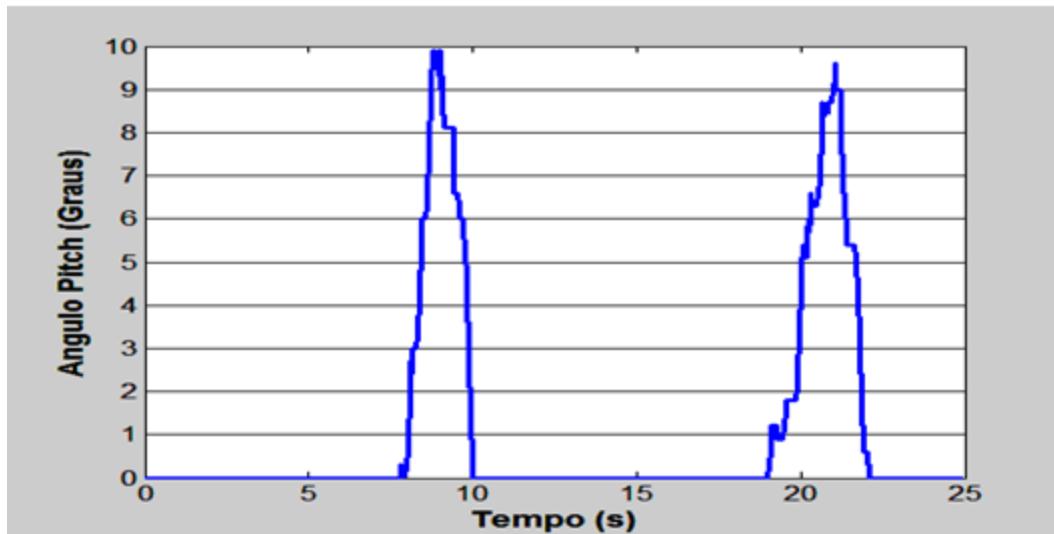


Figura 4.69 – Atuação do controle do ângulo *Pitch* – Caso 3.

#### 4.6.2. – Ponto 02

Quanto às tensões trifásicas produzidas pelo gerador síncrono, a Figura 4.70 ilustra o seu comportamento ao longo do período de estudo.

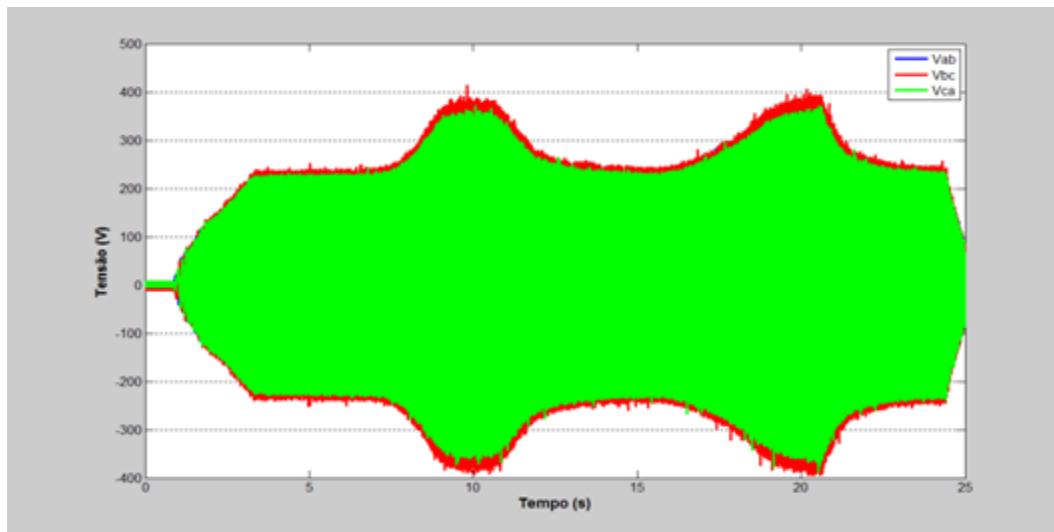


Figura 4.70 – Tensões trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 3.

Complementarmente, a Figura 4.71 representa o desempenho do valor eficaz das tensões no decorrer do intervalo de tempo analisado. Esta grandeza, ao longo do período

analisado, varia entre 143 V e 243 V. Observa-se ainda que no patamar máximo das tensões, estas se apresentam com os efeitos introduzidos pela limitação do controle *Pitch*.

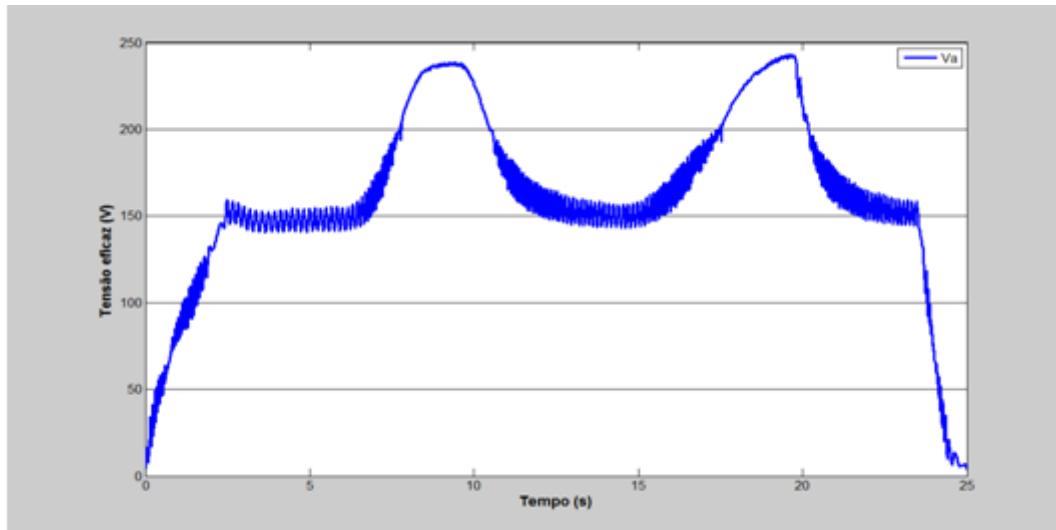


Figura 4.71 – Valores eficazes das tensões fornecidas pelo gerador – Caso 3.

Objetivando maiores detalhes sobre as formas de onda produzidas pelo gerador, a Figura 4.72 e a Figura 4.73 mostram os detalhes para as três tensões nos maiores patamares para a rajada e a rampa. Como se constata, as mesmas formam um conjunto trifásico de tensões, com expressiva distorção e com frequência fundamental que varia de 33 Hz para 58 Hz nos picos. Estes valores de frequências se apresentam em sintonia com a velocidade do vento imposta e com o número de polos do circuito de campo da máquina geradora.

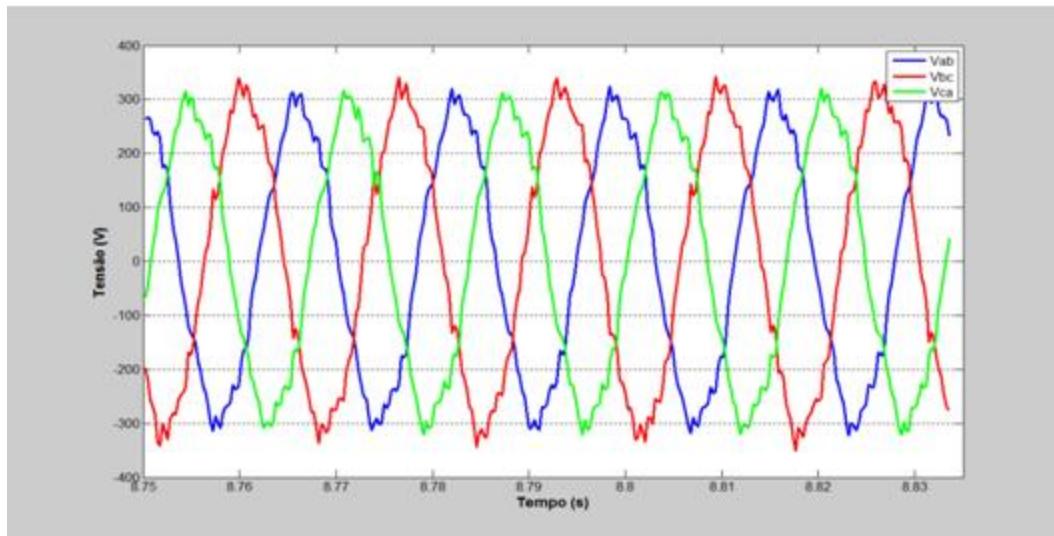


Figura 4.72 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no patamar superior da rajada – Caso 3.

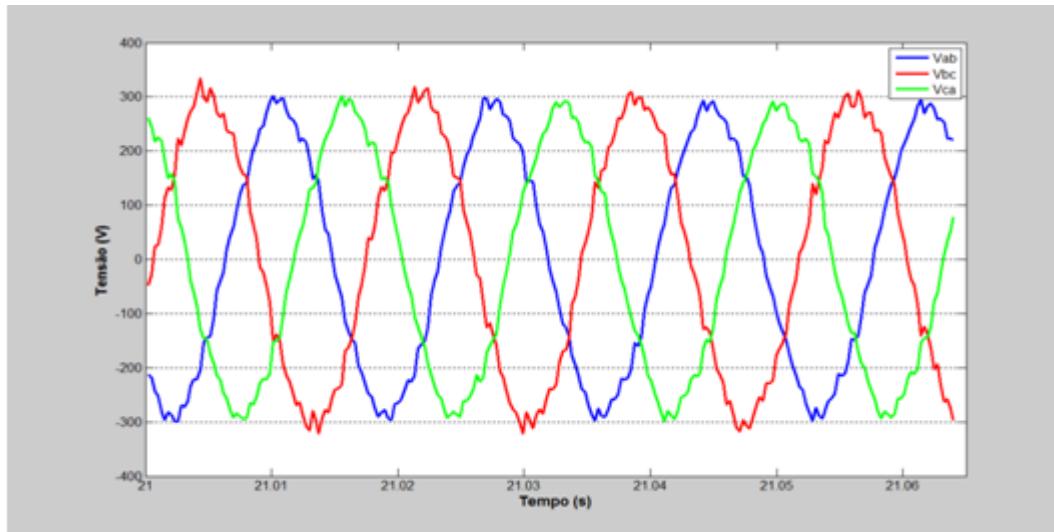


Figura 4.73 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo gerador no patamar superior da rampa – Caso 3.

A Figura 4.74 e a Figura 4.75 apresentam os espectros correspondentes para as componentes harmônicas, nos maiores patamares da rajada e da rampa, respectivamente.

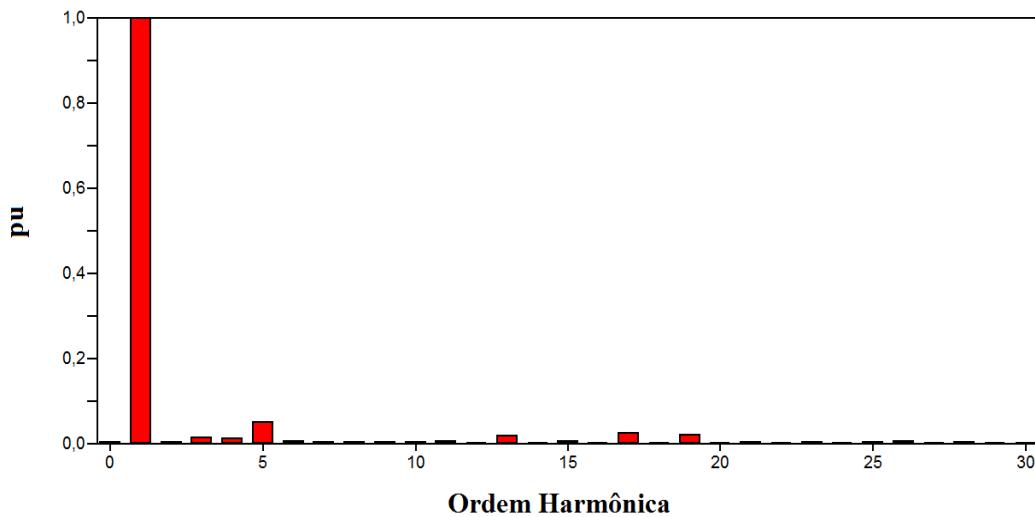


Figura 4.74 - Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no patamar superior da rajada - Caso 3.

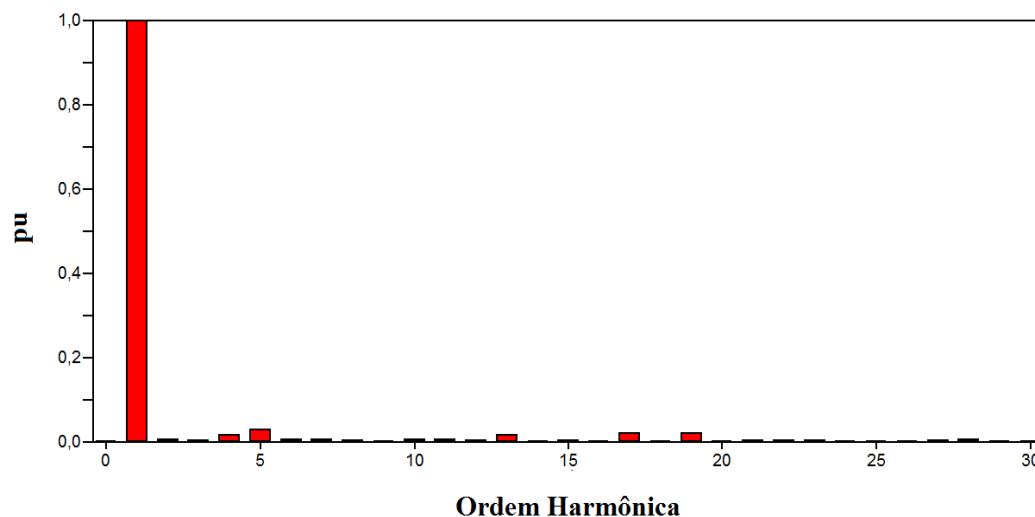


Figura 4.75 - Espectro das tensões harmônicas fornecidas pelo gerador (em pu) no patamar superior da rampa - Caso 3.

Já a Figura 4.76 representa as correntes de linha na saída do gerador. De modo similar ao procedimento para as tensões, na Figura 4.77 tem-se o perfil das correntes eficazes. O valor inicial de 0,38 A é alterado para 0,2 A e 0,12 A, respectivamente nos picos da rajada e rampa. As oscilações indicadas se devem à introdução de ruídos sobre o vento base, taxa de

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

aquisição dos equipamentos de medição e as reduções das correntes se fundamentam na lógica operacional atribuída ao inversor, como já discutido anteriormente.

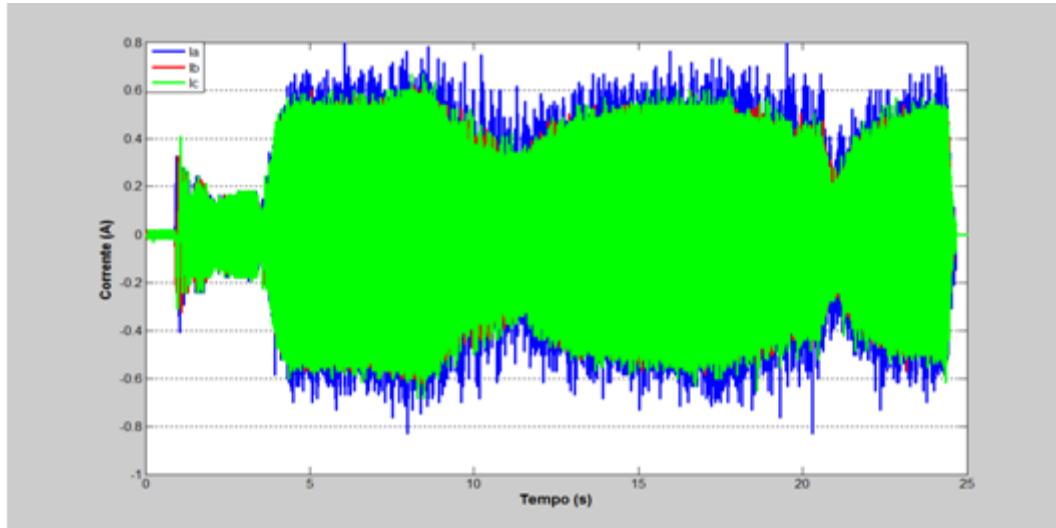


Figura 4.76 – Correntes trifásicas fornecidas pelo gerador – Caso 3.

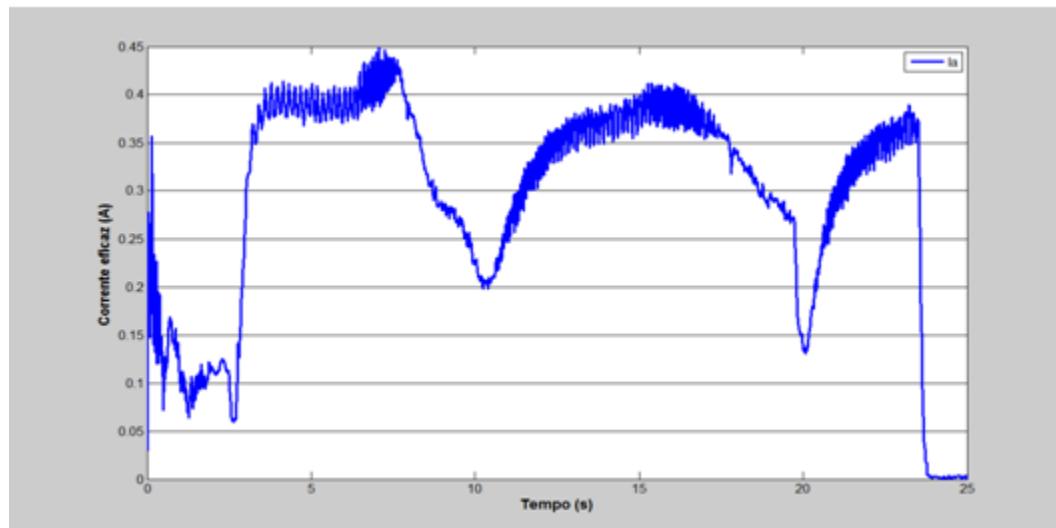


Figura 4.77 – Valores eficazes das correntes de linha fornecidas pelo gerador – Caso 3.

Quanto às formas de onda para as correntes, os detalhes da Figura 4.78 e Figura 4.79 evidenciam um expressivo conteúdo harmônico, conforme Figura 4.80 e Figura 4.81, nos

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

patamares superiores da rajada e da rampa, respectivamente. Essas distorções se apresentam em concordância com o suprimento de uma unidade retificadora de 6 pulsos.

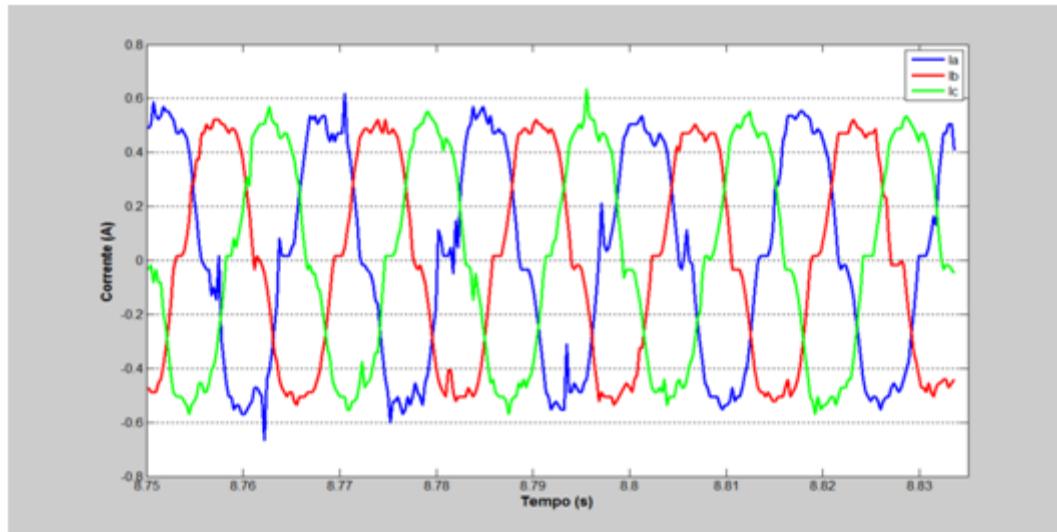


Figura 4.78 – Detalhes das correntes fornecidas pelo gerador no patamar superior da rajada – Caso 3.

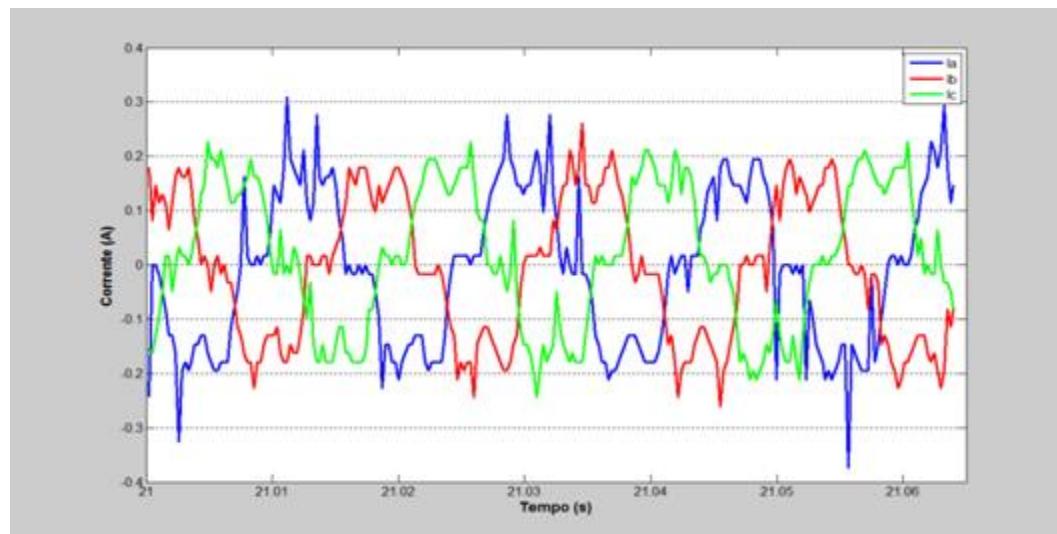


Figura 4.79 – Detalhes das correntes trifásicas fornecidas pelo gerador no patamar superior da rampa – Caso 3.

A Figura 4.80 e a Figura 4.81 fornecem o espectro das correntes harmônicas e permitem constatar que as suas ordens mais significativas são aquelas previstas para um

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

retificador de 6 pulsos. A distorção harmônica total se apresenta em 19,41% e 33,62% para os patamares superiores da rajada e rampa, respectivamente.

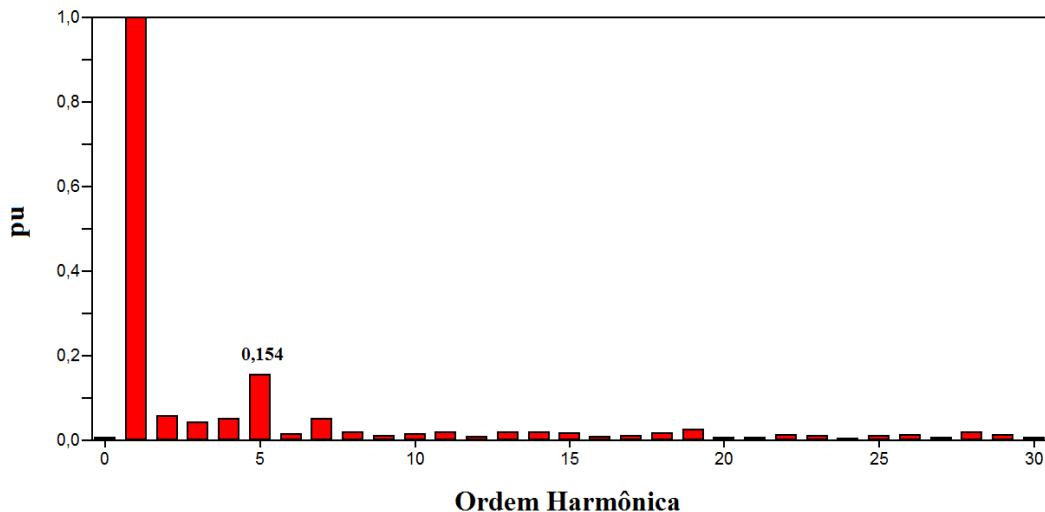


Figura 4.80 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no patamar superior da rajada - Caso 3.

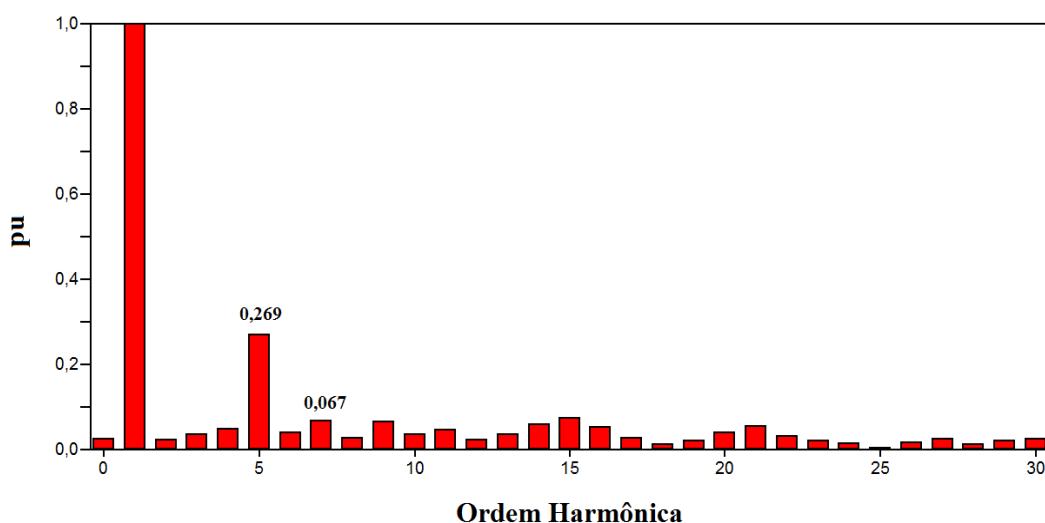


Figura 4.81 - Espectro das correntes harmônicas do gerador (em pu) no patamar superior da rampa – Caso 3.

#### **4.6.3. – Ponto 03**

Quanto ao elo CC de interligação entre o retificador e inversor, nos mesmos moldes já empregados, são duas as grandezas mais relevantes: tensão CC e corrente CC. Estas se encontram mostradas na Figura 4.82 e Figura 4.83, respectivamente. Como pode ser observada, a tensão varia entre 172 V e 315 V, enquanto que a corrente entre 0,65 e 0,3 A.

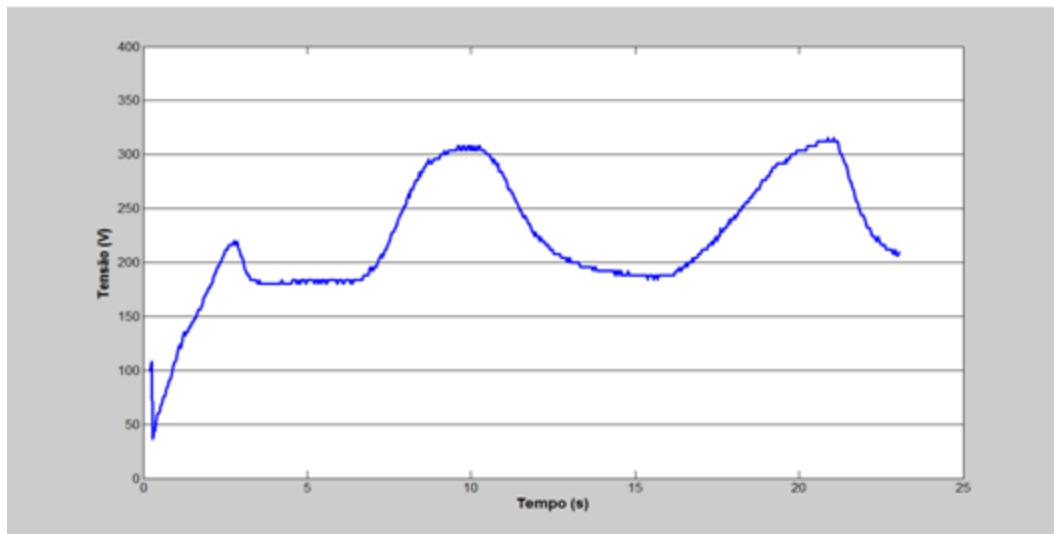


Figura 4.82 – Tensão do elo CC – Caso 3.

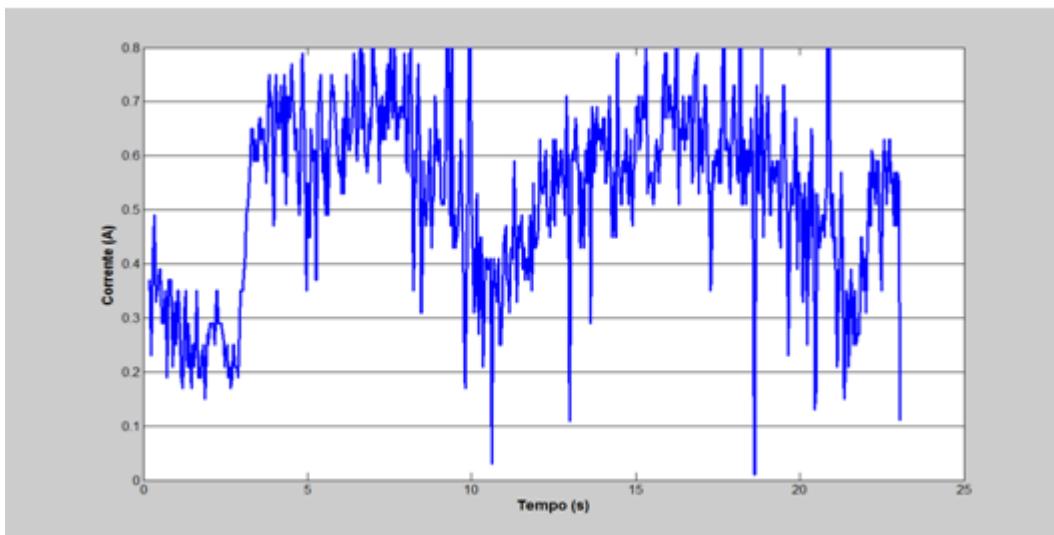


Figura 4.83 – Corrente injetada no elo CC – Caso 3.

#### 4.6.4. – Ponto 04

A partir das tensões contínuas anteriormente indicadas e da lógica de chaveamento definida pelo controle do inversor obtém-se as tensões trifásicas indicadas na Figura 4.84. O perfil, ao longo do período de estudos, se mostra bastante compatível com os resultados já mostrados para os demais casos, exceto pela particularidade associada com a atuação do controle *Pitch* que age no sentido de saturar a velocidade do eixo e, por conseguinte, o nível da tensão para as respectivas regiões onde a velocidade é delimitada.

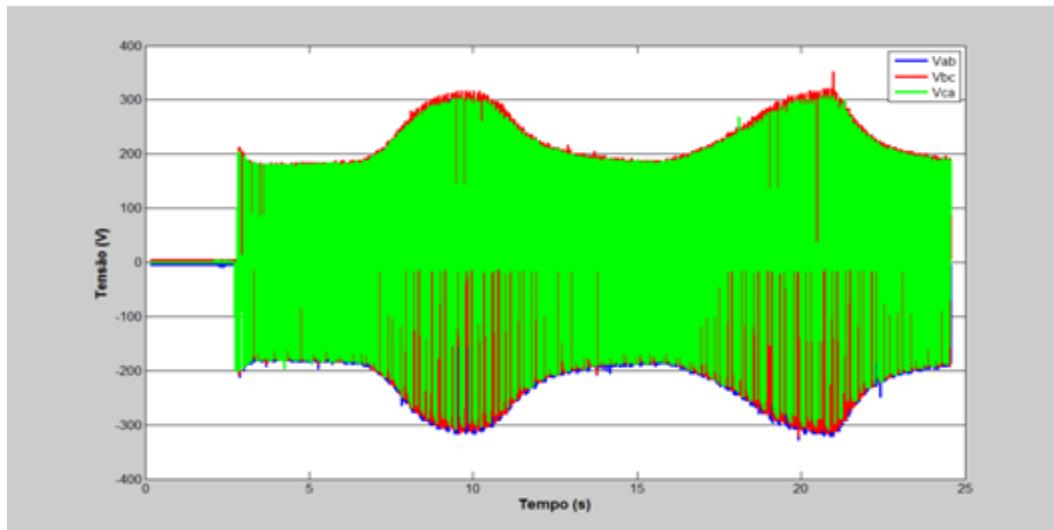


Figura 4.84 – Tensões trifásicas na saída do inversor – Caso 3.

A Figura 4.85 e a Figura 4.86 mostram detalhes para pontos específicos das tensões acima referidas. Como esperado, estas se mostram compostas por uma sucessão de pulsos diretamente associadas com a frequência de chaveamento imposta.

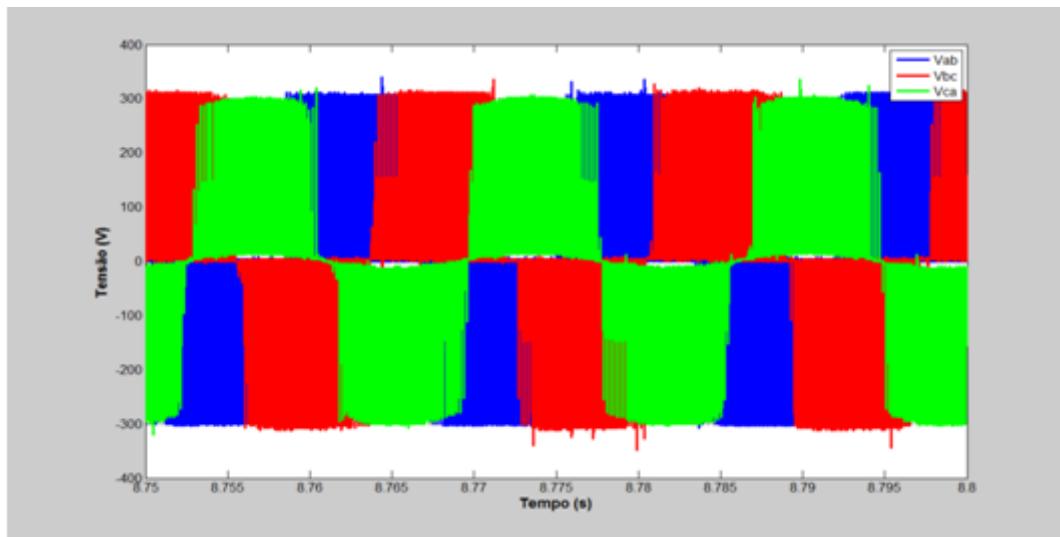


Figura 4.85 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no patamar superior da rajada – Caso 3.

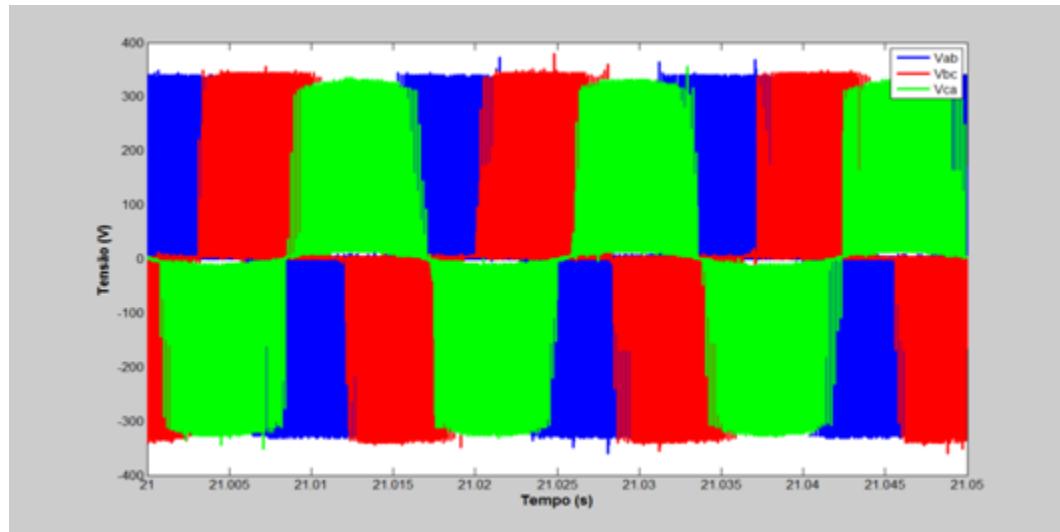


Figura 4.86 – Detalhes das tensões trifásicas fornecidas pelo inversor no patamar superior da rampa – Caso 3.

A Figura 4.87 e a Figura 4.88 fornecem os correspondentes conteúdos harmônicos. Nestas constata-se que as ordens harmônicas, novamente, se apresentam em blocos múltiplos inteiros da frequência de chaveamento de 15 kHz, com algumas frequências espúrias. Os níveis para as distorções totais são, respectivamente, de 92% e 98 % para os patamares superiores da rajada e da rampa.

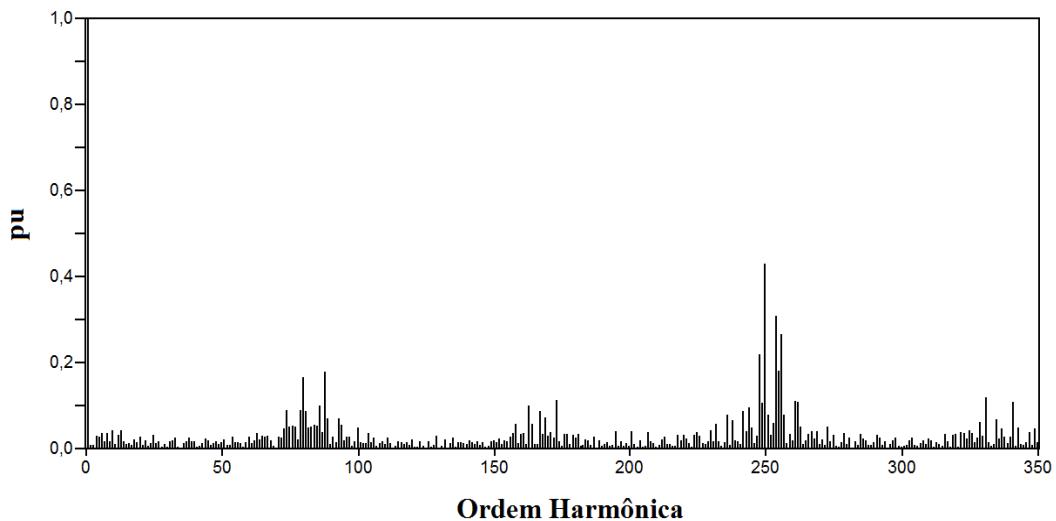


Figura 4.87 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) para o patamar superior da rajada - Caso 3.

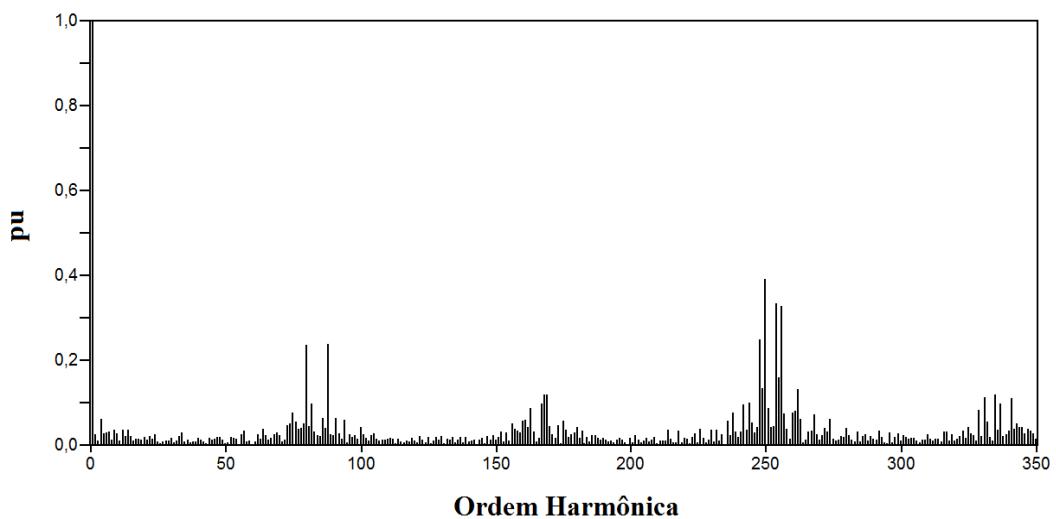


Figura 4.88 - Espectro das tensões harmônicas na saída do inversor (em pu) para o patamar superior da rampa - Caso 3.

#### **4.6.5. – Ponto 05**

As tensões trifásicas aplicadas à carga são, por sua vez, apresentadas na Figura 4.89. Conforme explicações já dadas, o valor eficaz destas se mantém constante e em torno de 100 V (eficaz).

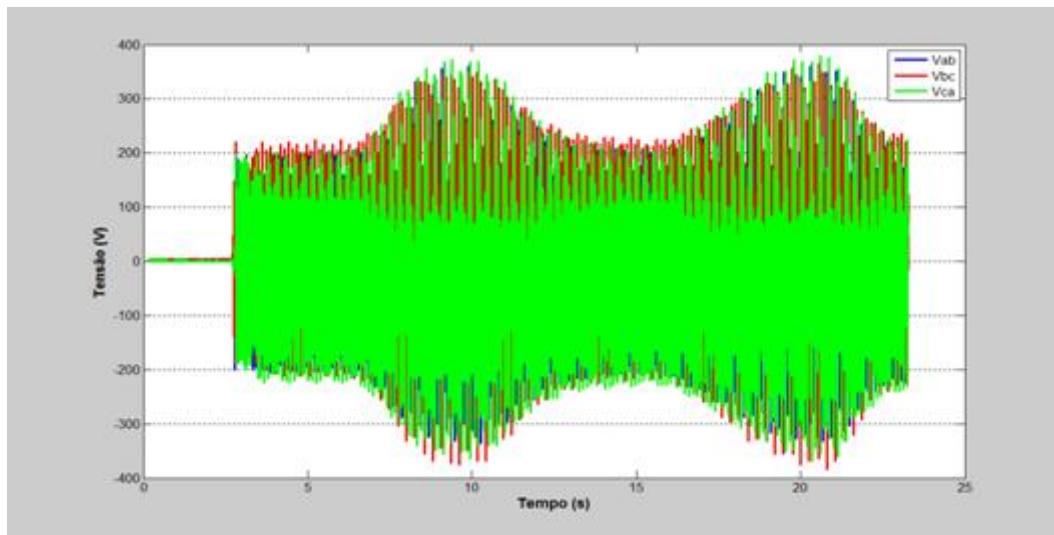


Figura 4.89 – Tensões trifásicas nos terminais da carga isolada – Caso 3.

A Figura 4.90 e a Figura 4.91 apresentam os detalhes das formas de onda das tensões nas regiões superiores à manifestação da rajada e da rampa. Como já ressaltado, comparativamente aos resultados da Figura 4.85 e Figura 4.86, constata-se uma substancial melhoria no que tange às distorções harmônicas, fato este introduzido pela presença do transformador.

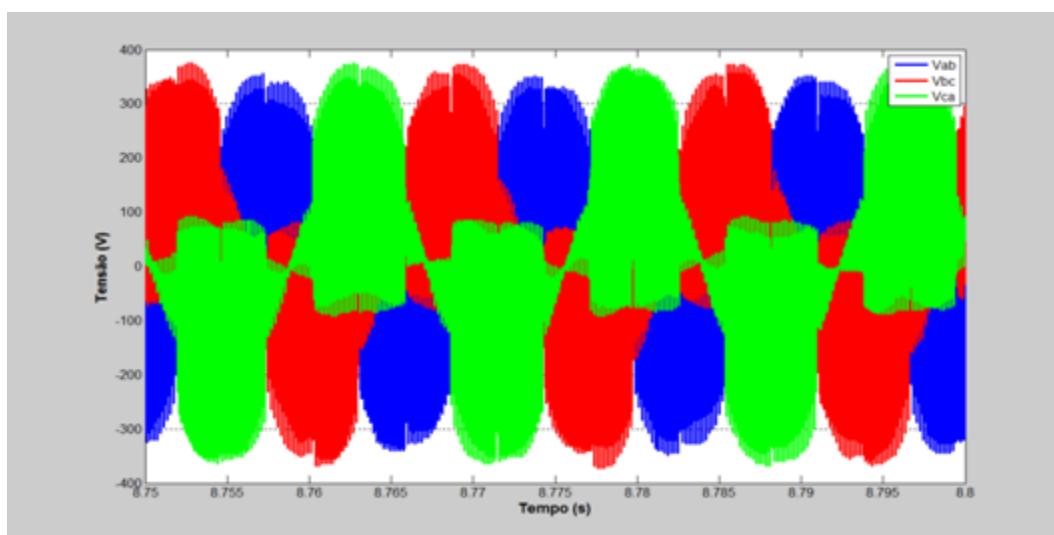


Figura 4.90 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no patamar superior da rajada – Caso 3.

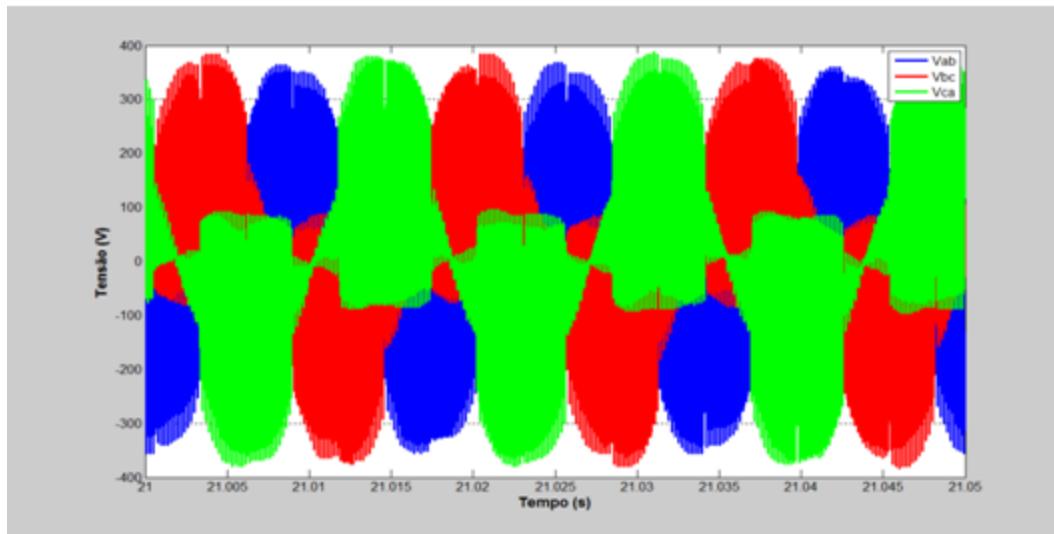


Figura 4.91 – Detalhes das tensões trifásicas nos terminais da carga no patamar superior da rampa – Caso 3.

Os espectros das tensões harmônicas anteriormente referidas encontram-se na Figura 4.92 e Figura 4.93 e se apresentam, respectivamente, em torno de 85% e 87%, para a região correspondente aos patamares da rajada e rampa, com as frequências harmônicas dominantes em consonância com o já exposto.

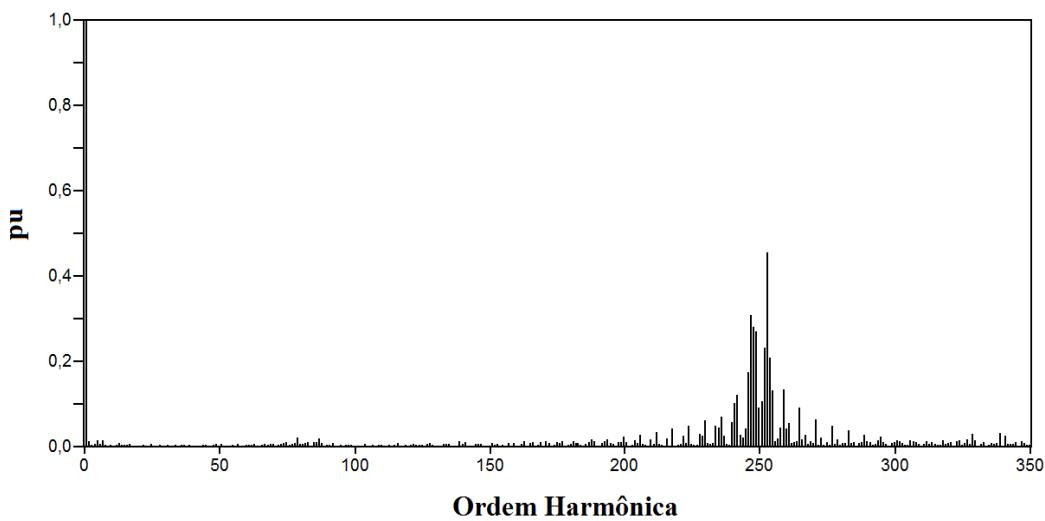


Figura 4.92 - Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no patamar superior da rajada - Caso 3.

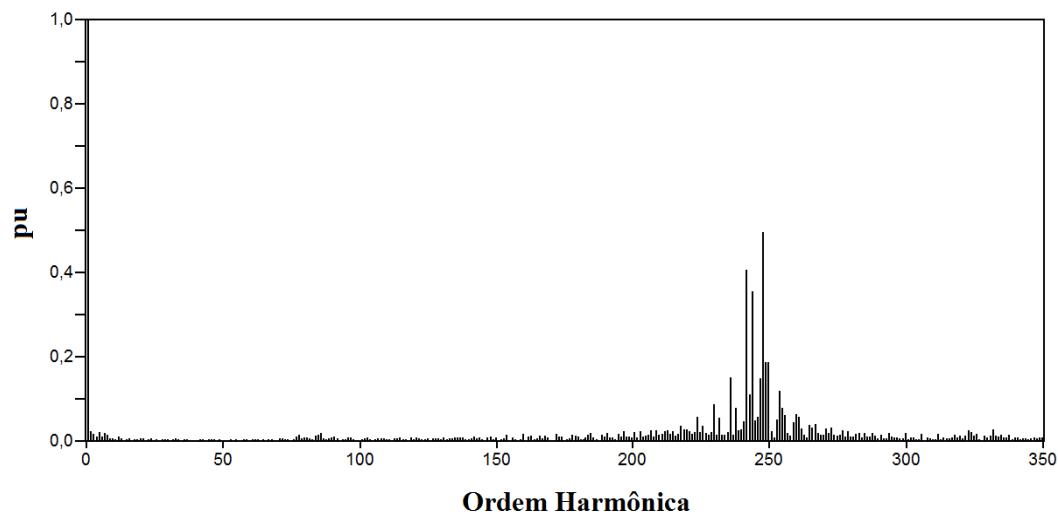


Figura 4.93 - Espectro das tensões harmônicas na carga isolada (em pu) no patamar superior da rampa - Caso 3.

No que se referem às correspondentes correntes de linha, estas se apresentam com as formas indicadas na Figura 4.94 e Figura 4.95. A primeira indicando seus valores instantâneos e a segunda os valores eficazes.

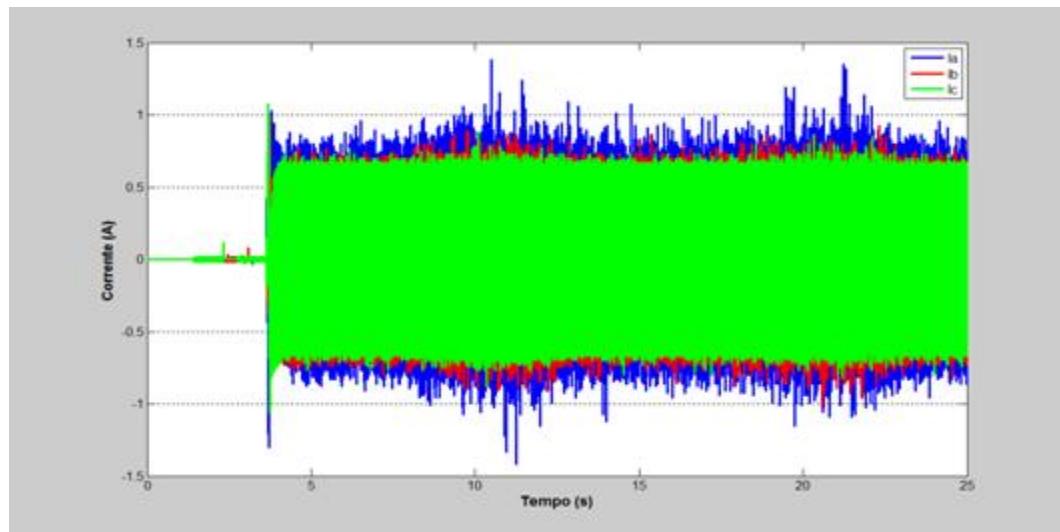


Figura 4.94 – Correntes trifásicas fornecidas para a carga isolada – Caso 3.

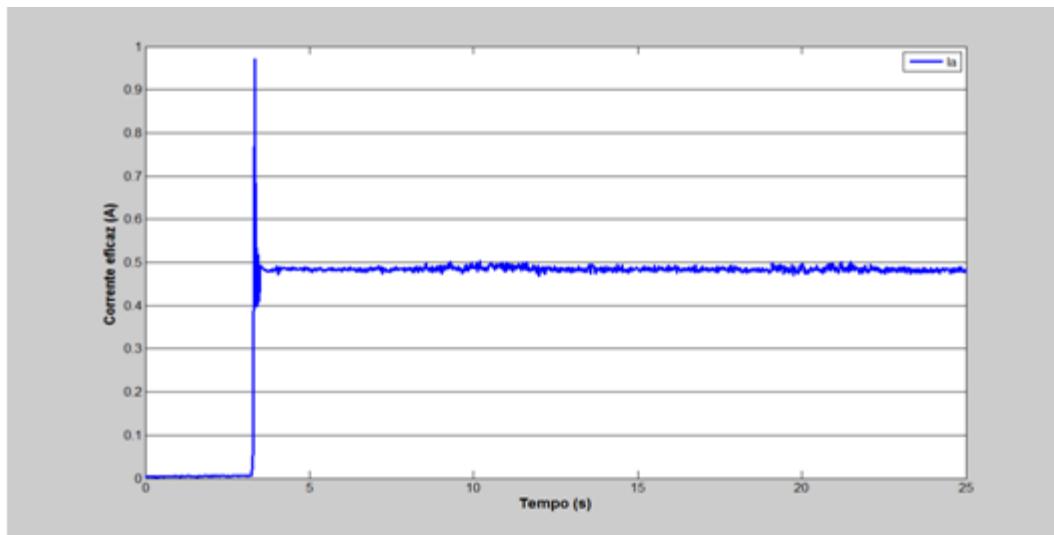


Figura 4.95 – Valores eficazes das correntes de linha para a carga isolada – Caso 3.

Na Figura 4.96 e Figura 4.97 são apresentados os detalhes das correntes para os patamares superiores da rajada e da rampa, respectivamente.

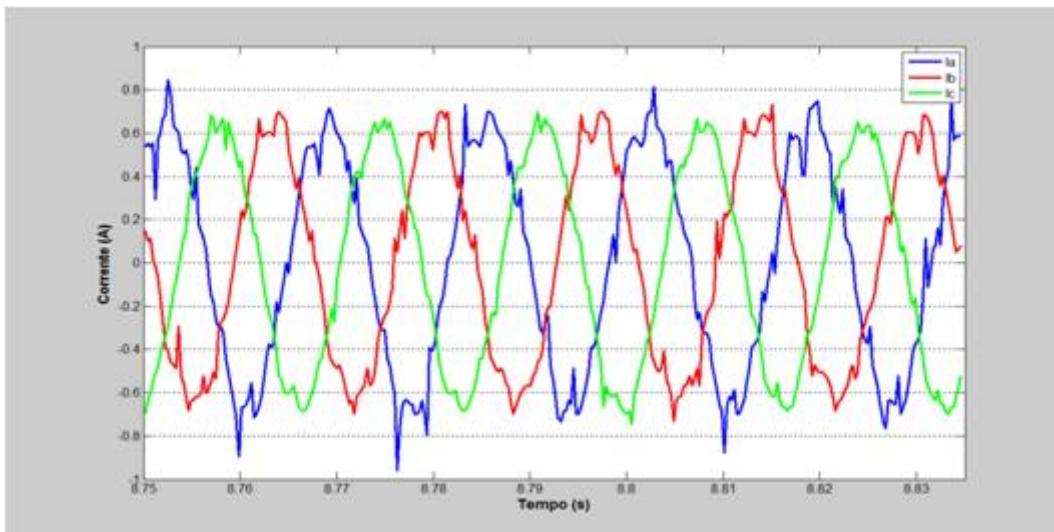


Figura 4.96 – Detalhes das correntes trifásicas na carga isolada no patamar superior da rajada – Caso 3.

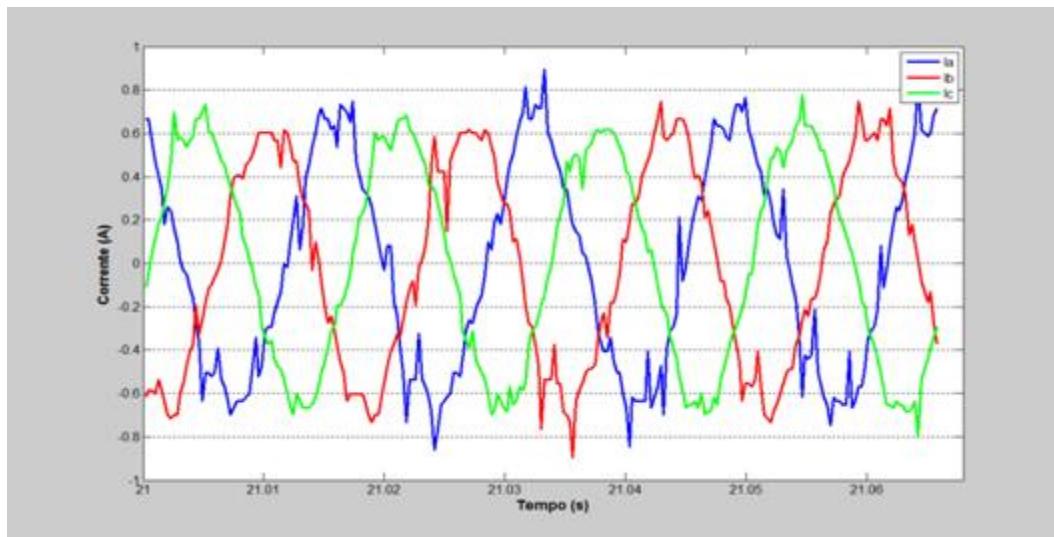


Figura 4.97 – Detalhes das correntes trifásicas na carga no patamar superior da rampa – Caso 3.

Complementarmente, a Figura 4.98 fornece o espectro harmônico das correntes injetadas na carga isolada para um momento associado com o patamar superior para a rampa. A taxa de distorção harmônica se apresenta em torno de 18%.

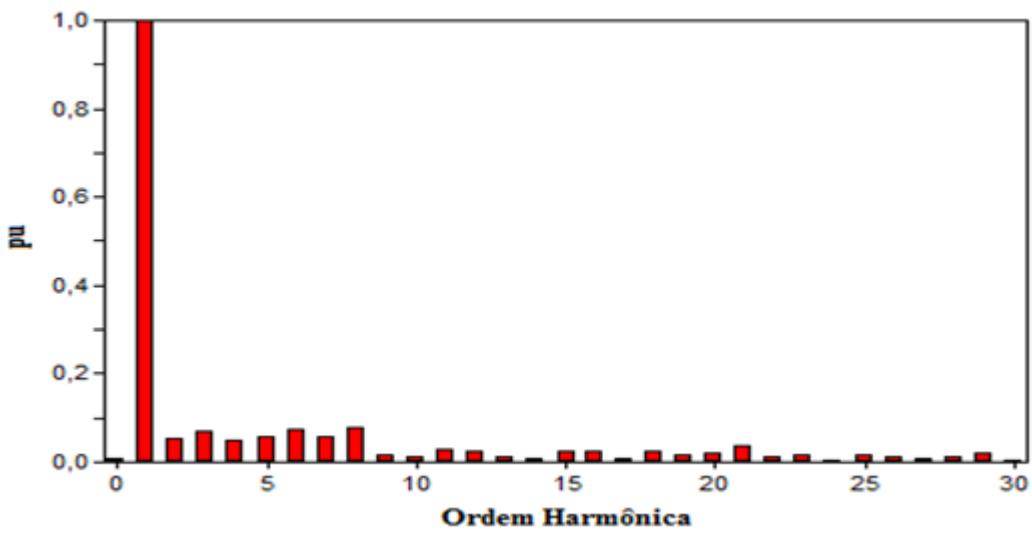


Figura 4.98 – Espectro das correntes harmônicas na carga isolada (em pu) para o patamar superior da rampa – Caso 3.

## **4.7. – Considerações Finais**

A essência do presente capítulo foi direcionada ao processo de avaliação de desempenho e validação da estratégia concebida para a estruturação física do laboratório destinado à reprodução dos fenômenos mecânicos e elétricos associados com a modelagem experimental, em escala reduzida, de uma unidade constituinte de um parque eólico à geração síncrona.

De um modo geral, através da realização de experimentos compreendo a simulação de três situações operativas quando às características do vento incidente, pôde-se observar que:

- **Quanto à representação do vento:**

Como estabelecido pela modelagem da fonte primária de energia, esta, na sua forma mais genérica, compreende uma composição formada por um valor base, ruídos aleatórios, rajadas e rampas. Dentro desta lógica, como já explorado no capítulo anterior, foram idealizados, especificados e montados os componentes que permitiram, através de uma efetiva combinação de recursos de hardware (motor CC e acessórios diversos) e software (comando e controle operativo do motor CC), reproduzir, com bom nível de aderência à realidade do campo, as situações típicas e comumente manifestadas. Não obstante o sucesso já ressaltado nos estudos e constatações feitas no Capítulo III não é demais reafirmar que os resultados de caráter mecânico mostraram, com clareza, a grande correspondência entre os efeitos físicos reais e aqueles obtidos laboratorialmente. De um modo especial, a correlação entre o vento incidente e a atuação dos controles tipicamente encontrados para as turbinas eólicas puderam ser evidenciados de forma inequívoca, mostrando que o modelo produzido condiz com as propriedades operacionais dos sistemas eólicos em funcionamento;

- **Quanto à representação do gerador síncrono:**

Em consonância com a tendência atual e direcionada para o emprego de geradores síncronos a imã permanente, através de um modelo em escala reduzida, nos termos apresentados, foi empregada uma estratégia que primou pela manutenção, na bobina do rotor, de uma corrente de excitação de valor constante. Uma vez realizado tal procedimento as tensões trifásicas geradas passam, tanto no que se refere às suas magnitudes, quanto às frequências, a dependerem totalmente da velocidade do acionamento primário promovido pelo motor CC. Isto pode ser detalhadamente constatado ao longo dos experimentos realizados, fato este que aproxima a operação da máquina com o funcionamento dos sistemas reais. Ainda em relação à unidade de geração, é importante destacar a questão das formas de onda produzidas, as quais, como visto, se apresentam com expressivos níveis de distorções harmônicas, todavia, em total sintonia com as expectativas de um gerador suprindo uma carga retificadora de 6 pulsos;

- **Quanto à representação da unidade retificadora - inversora:**

A topologia dos dispositivos conversores se baseia, em sua estrutura fundamental, numa unidade retificadora (controlada ou não), num elo CC de interligação e, numa unidade inversora (tipo comutação forçada ou natural). Para a presente aplicação, em sintonia com os arranjos mais comumente empregados, a opção feita recaiu sobre o uso de um retificador a diodos formando uma ponte de 6 pulsos, um barramento CC sem qualquer atuação sobre o valor da tensão retificada e, por fim, num inversor convencional (para acionamento). O complexo assim definido foi adquirido na forma de um produto comercial e as partes mencionadas constituíram

um único dispositivo físico, com a estratégia de controle já pré-estabelecida, o qual foi inserido entre os terminais trifásicos do gerador e a entrada do transformador de acoplamento com a carga suprida. Como ressaltado ao longo dos experimentos, o processo da conversão obedeceu à lógica convencional e, quanto à tensão de saída, esta se mostrou, como esperado, na forma de pulsos sucessivos que perfizeram a rede CA de suprimento da carga. As distorções harmônicas observadas, tanto à montante do conversor (entrada do retificador) quanto à jusante (saída do inversor) se apresentaram com as componentes dominantes em concordância com as expectativas teóricas. Do lado do gerador com o espectro típico definido por  $n=6k\pm 1$  e na saída do inversor na forma de blocos de componentes associadas com a frequência de chaveamento utilizada pelo mesmo, ou seja, 15 kHz. Outro ponto meritório de destaque refere-se ao fato que o equipamento adquirido possui, intrinsecamente, um controle destinado à manutenção da tensão de saída com um valor eficaz constante, além de não ter sua fonte de corrente controlada. Isto se apresentou como uma característica limitante para a estrutura montada e impediu que o arranjo representativo de uma unidade de geração eólica pudesse ser conectado à rede CA disponibilizada no laboratório, isto é, a operação em paralelo com a concessionária não foi possível. Diante disto a única opção viabilizada foi o suprimento de uma carga isolada, formada por componentes R, L e C com parâmetros constantes;

- **Quanto à representação do transformador de acoplamento:**

Sabidamente, os arranjos eólicos comerciais se apresentam com uma tensão gerada na saída de seus inversores em níveis tais que se torna imperativo o emprego de

transformadores elevadores para transportar a energia em longas distâncias. Neste sentido, foi inserido, entre a saída do inversor e a entrada da carga, um transformador com as características identificadas no capítulo II. Este dispositivo, além de proporcionar meios para a compatibilização dos níveis de tensão, ainda oferece uma propriedade associada com uma ação de mitigação de algumas das frequências harmônicas produzidas, portanto, agindo como uma espécie de filtro (indutância de dispersão). Isto pode ser detalhadamente observado para as situações investigadas;

- **Quanto à representação da carga:**

Como mencionado, a impossibilidade operacional atribuída ao inversor utilizado conduziu a definição de uma carga estática, caracterizada por componentes do tipo impedância constante. Portanto, neste particular não foram observados pontos importantes para maiores discussões, a não ser por dois aspectos. Um primeiro vinculado com o fato que, uma vez suprida uma carga do tipo impedância constante com tensão também constante, não resta outra alternativa senão a constatação que o dispositivo experimental encontra-se suprindo um consumidor tipo potência constante. Outra particularidade está na questão das distorções harmônicas, as quais, para o denominado ponto 5 de medição se apresentaram em níveis bastante elevados em relação aos padrões recomendados. Muito embora esta observação ressalta-se que os experimentos realizados com a estrutura montada não contemplam qualquer tipo de filtro, outro que não a presença do transformador de conexão. Portanto, apesar dos altos valores detectados, estes, para o momento, não servem como uma base de dados para comparação com os valores de referência estabelecidos pelas agências reguladoras. Os desempenhos obtidos não

---

## Capítulo IV – Avaliação de desempenho da estrutura laboratorial

---

se encontram associados com a interligação do modelo laboratorial com uma rede elétrica comercial, fato este decisivo para que os níveis de curto-circuito do barramento de interligação sejam compatíveis com a realidade de campo.

Por fim, no que se refere ao processo de conversão relacionado com uma estrutura física real de uma unidade de geração eólica, os trabalhos investigativos indicaram, com as limitações impostas e apontadas no texto, um desempenho apropriado para a modelagem laboratorial em escala reduzida aqui considerada. Tal afirmativa se apoia no funcionamento do conjunto sob o ponto de vista da dinâmica operacional, das correlações entre as características do vento incidente e a transferência de potência à carga, nas formas de onda envolvidas, e outros aspectos explorados.

# CAPÍTULO V

---

## 5. Conclusões

Muito embora ao reconhecimento que, ao término de cada uma das unidades componentes desta dissertação, foram realizadas análises, discussões e ponderações sobre os resultados e metas atingidas, considera-se de grande relevância, ao término deste trabalho, a apresentação de uma síntese dos principais aspectos envolvidos na pesquisa, em que pese as principais contribuições e avanços alcançados.

Neste sentido, o Capítulo II contemplou aspectos conceituais e operacionais sobre o estado da arte sobre a tecnologia de geração eólico-elétrica, iniciando pela apresentação dos principais componentes de potência que perfazem um complexo típico e as peculiaridades da fonte primaria de energia, qual seja, o vento. Ainda dentro deste cenário, foi realizada uma síntese da modelagem matemática clássica, a qual, a partir do perfil do vento incidente, passando pela turbina eólica e seus respectivos controles, conclui pelo estabelecimento da expressão da potência mecânica disponibilizada para o eixo do gerador. Quanto aos arranjos considerados nas discussões, estes compreenderam diversas concepções para a exploração da energia e distintas formas de conexão aos pontos de suprimento. Por fim, os trabalhos realizados nesta seção culminaram por ressaltar as estratégias comercialmente em uso que se fundamentam no princípio dos aproveitamentos eólicos à velocidade variável. Feita a opção pelos complexos que utilizam a geração elétrica através de máquinas síncronas, os trabalhos avançaram no sentido de estabelecer a concepção da estrutura laboratorial focada nesta pesquisa, nos termos requeridos para a obtenção de uma base experimental de estudos em escala reduzida.

---

## Capítulo V – Conclusões

---

Uma vez estabelecida a proposta laboratorial e definido que o conjunto caracterizado pelo vento, turbina e controles, seriam representados no ambiente laboratorial através de um motor de corrente contínua, procedeu-se a uma correlação entre os modelos matemáticos impostos pela fonte primária de energia e a estratégia operacional a ser contemplada para que o motor viesse a reproduzir as características naturais aos ventos incidentes. Esta foi à essência do Capítulo III, o qual, além das expressões de correlação acima referidas, também abordou os complementos necessários à nível de hardware e software, para o atendimento às premissas estabelecidas. Para tanto, somado ao conjunto de placas e outros acessórios, foram também tecidas as devidas considerações pertinentes ao estabelecimento do interfaceamento entre as unidades, o qual foi desenvolvido através dos recursos oferecidos pelo software *LabView*. Uma vez concluídos tais trabalhos, foram então realizados testes iniciais de desempenho da estrutura concebida e desenvolvida, ilustrando, de forma clara e inequívoca, o sucesso da representação aqui almejada.

No que tange ao cerne do Capítulo IV, este foi direcionado para a realização de experimentos diversos, com destaque às características típicas e distintas para os ventos, e voltados para a avaliação de desempenho e validação da estratégia concebida para o arranjo laboratorial voltado para a reprodução dos fenômenos mecânicos e elétricos associados com o funcionamento de uma unidade de geração eólico-elétrica à geração síncrona. Em consonância com estes propósitos, foram estabelecidos três casos representativos para as ocorrências do vento em campo, cada qual caracterizado por uma composição que viesse a contemplar: um valor base, ruídos aleatórios, rajadas e rampas.

Ainda em relação à unidade de geração, constituída por uma máquina síncrona com correntes de excitação fixada com vistas à simulação de um campo produzido por imã permanente, é importante destacar tanto as tensões e correntes produzidas e destinadas à

---

## Capítulo V – Conclusões

---

conversão eletromecânica aqui considerada, se apresentam, qualitativamente e quantitativamente, em total conformidade com as expectativas. Destaque deve ser dado à presença da não linearidade atrelada com o suprimento da carga retificadora de 6 pulsos e os correspondentes harmônicos, nas ordens dominantes típicas.

A unidade inversora também demonstrou total eficácia aos seus objetivos, ressaltadas duas particularidades, já ressaltadas e aqui sintetizadas. Uma delas está no fato que o conversor adquirido e utilizado se apresenta com uma lógica de controle e operação nos termos estabelecidos pelo fabricante, fato este que conduziu a uma impossibilidade de alterações ou adequações aos objetivos específicos desta pesquisa. Diante disto ocorreram duas grandes limitações para o arranjo montado, uma atrelada com a inviabilização da conexão do modelo laboratorial em paralelo com a rede CA trifásica comercial disponibilizada no laboratório, e outra, que determina o funcionamento do produto na forma de tensão CA produzida com valor constante, independentemente da tensão CC advinda do seu correspondente barramento CC. À luz desta última propriedade, em se tratando do suprimento de uma carga isolada, está se comportará como possuindo uma propriedade de consumo conhecida por potência constante, indiferentemente à energia disponibilizada pela fonte primária de energia. Em relação ao conteúdo harmônico encontrado nas tensões e correntes de saída do inversor, estas encontram-se diretamente identificadas com a de chaveamento do equipamento, ou seja, em blocos de sinais nas imediações dos múltiplos inteiros de 15 kHz.

Para fins da caracterização do suprimento elétrico promovido pela estrutura laboratorial estabelecida, esta compreendeu uma conexão de cargas tipo impedância constante com um transformador de conexão inserido entre os terminais do inversor e da carga. Em função disto, além do papel da compatibilização dos níveis de tensão o transformador ainda

---

## Capítulo V – Conclusões

---

contribui para a mitigação as altas frequências harmônicas produzidas, portanto, agindo como uma espécie de filtro (L).

Por fim, no que se refere ao processo de conversão relacionado com uma estrutura física real de uma unidade de geração eólica, os trabalhos investigativos indicaram, com as limitações impostas e apontadas no texto, um desempenho apropriado para a modelagem laboratorial em escala reduzida aqui considerada. Tal afirmativa se apoia no funcionamento do conjunto sob o ponto de vista da dinâmica operacional, das correlações entre as características do vento incidente e a transferência de potência à carga, nas formas de onda envolvidas, e outros aspectos explorados.

Ao encerrar o presente trabalho, o qual se apresenta como um primeiro passo na direção da obtenção de um modelo experimental em escala reduzida para fins da representação de uma unidade de geração eólico-elétrica à geração síncrona vale enfatizar que, muito embora o reconhecimento de importantes conquistas, ainda há uma série de trabalhos a serem feitos até a consolidação do processo, em atenção às instalações em campo.

Dentre os desafios que se fazem presentes ressaltam-se:

- Melhorias quanto a modelagem do motor CC com vista a se atingir meios para aprimoramentos do controle do torque mecânico através de uma retroalimentação de informações, e ainda, implementar formas para medições diretas desta grandeza através de torquímetros;
- Avaliar, comparativamente, o emprego de um motor CC controlado, nos termos aqui utilizados, com a alternativa do uso de um motor de indução acionado por um inversor de frequência com correspondente estratégia operacional para fins da representação da fonte primária de energia e suas particularidades. Este tema

encontra-se em desenvolvimento numa outra dissertação já em sua fase conclusiva;

- Utilizar resultados de um banco de dados extraído de medições diretas em um complexo comercial em operação para fins comparativos com aqueles aqui obtidos, viabilizando, assim, meios para o estabelecimento de uma estratégia de validação da proposta aqui concebida e concretizada;
- Promover meios para que a unidade laboratorial possa ser operada em paralelo com uma rede de distribuição comercial e a realização de um vasto número de estudos investigativos contemplando tal condição operativa;
- Complementar a proposta de modelagem aqui utilizada através da inserção de efeitos desconsiderados até o presente estágio dos desenvolvimentos, a exemplo do fenômeno do sombreamento de torres, dentre outros;
- MPPT (*Maximum Power Point Tracking* ou controle de extração máxima de potência) da turbina através de um retificador chaveado (conversor de máquina) que controlará o torque e a velocidade de rotação da turbina e consequentemente a operação no MPP (*Maximum Power Point Tracking* ou Ponto Ideal de Carga).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GLOBAL WIND REPORT 2011. **Global Wind Energy Concil.**
- [2] EPE. “**Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica**”.
- [3] ELETROBRÁS. “**A Empresa - Programa POINFA**”. Disponível em: [http://www.eletrobras.com.br/EM\\_Programas\\_Proinfa/default.asp](http://www.eletrobras.com.br/EM_Programas_Proinfa/default.asp). Acesso em: 08 dez. 2010.
- [4] NAVES, Paulo Henrique Barbosa. “**Uma Contribuição à Modelagem de Complexos Eólicos Contendo Geradores Especiais para Atenuação das Componentes Harmônicas**”. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo, Brasil). **Menos cara do que parece**. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/zpublisher/materias/Noticias.asp?id=19398>. Acesso em: 11 out. de 2011.
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo, Brasil). **Ventos ajudam Brasil a diversificar matriz energética**. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/zpublisher/materias/Noticias.asp?id=19385>. Acesso em: 11 out. de 2011.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo, Brasil). **Nordeste desponta como potencial de energia eólica**. Disponível em: <http://www.abeeolica.org.br/zpublisher/materias/Noticias.asp?id=19455>. Acesso em: 11 out. de 2011.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo, Brasil). **Leilão de energia eólica surpreende governo e bate outras fontes**. Disponível em:

---

## Referências Bibliográficas

---

- <http://www.abeeolica.org.br/zpublisher/materias/Noticias.asp?id=19370>. Acesso em: 11 out. de 2011.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (São Paulo, Brasil). **Leilões de agosto movimentam R\$ 26,9 bilhões em fonte de energia alternativa.** Disponível <http://www.abeeolica.org.br/zpublisher/materias/Noticias.asp?id=19574>. Acesso em: 11 out. de 2011.
- [10] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional** – PRODIST – 2010.
- [11] Operador Nacional do Sistema (ONS), “**Procedimentos de Rede - Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão**”, 2010.
- [12] International standard IEC 61400-21 “**Wind turbines – Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines**”, 2008.
- [13] F. L. C. Pires, M. R. B. Neto, F. C. M. da Silva, J. B. Xavier, F. L. L. Serpa, R. P. S. Leão, “**Análise das Regulamentações para Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica**”, Induscon – VIII International Conference on Industry Applications, August, 2008.
- [14] BONELLI, Arthur Fernando. “**Modelagem e simulação de unidade eólica para estudos de indicadores de qualidade da energia elétrica**”. 2010. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [15] CARVALHO, Bismarck Castillo. “**Desenvolvimento de Modelo Computacional de Sistemas Eólicos Utilizando Geradores Síncronos para Estudos de Desempenho no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica**”. 2006. 213 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [16] Martínez, F., Pablo, S., Herrero, L. C., “**Fixed Pitch Wind Turbine Emulator using a DC Motor and a Series Resistor**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Setembro, 2009, pp. 1 – 9.
- [17] Gao, L., Luo, Y., “**Simulation of Imitation of the Characteristics of Wind Turbine Based on DC Motor with Matlab**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Abril, 2009, pp. 1 – 5.
- [18] Xinyin, Z., Minqiang, H., Xiaohu, C., Zaijun, W., “**The Research on Grid-connected Wind-power Generation System of Variable Speed Permanent Magnet Synchronous Wind Generator**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Abril, 2008, pp. 2640 – 2646.
- [19] Ovando, R. I., Aguayo, J., Cotorogea, M., “**Emulation of a Low Power Wind Turbine with a DC motor in Matlab/Simulink**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Junho, 2007, pp. 859 – 864.
- [20] Mushi, J. F., Han, K., Chen, G., Daozhuo, J., “**Design and Implementation of Wind Turbine Imitation System for Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator using DC Motor**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Abril, 2009, pp. 1 – 6.
- [21] Li, J., Zhou, B., Guo, H., “**Hardware-In-Loop Simulation of Wind Turbine Based on BLDCM**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Setembro, 2009, pp. 1 – 5.
- [22] Guo, H., Zhou, B., Li, J., Cheng, F., Zhang, L., “**Real-Time Simulation of BLDC-based Wind Turbine Emulator Using RT-LAB**”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Novembro, 2009, pp. 1 – 6.
- [23] Bonelli, A. F.; Vieira, R. F.; Oliveira, J. C.; Guimarães, G. C.; Vitório, Z. S. “**Uma Proposta para Modelagem Laboratorial de Turbinas Eólicas por Motores de**

---

## Referências Bibliográficas

---

- Corrente Contínua”.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE 2010), 2010, Belém – PA, Brasil.
- [24] Dericott, J.; Hanson, B. “**Emulation of a Low Power Wind Turbine using a DC Motor**”. 2008. 53 f.
- [25] PINTO, A. C. “**Modelagem e Análise de Desempenho Dinâmico de Complexos Elétricos Contendo Centrais Eólicas Dotadas de Geradores Síncronos**”. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia. 2007
- [26] CASTRO, R. M. G., “**Energias Renováveis e Produção Descentralizada – Introdução à Energia Eólica**”, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, DEEC/ Secção de Energia, Janeiro, 2003.
- [27] ALVARENGA, E. B., BONELLI, A. F., XAVIER, G. L., “**Validação da Estratégia de Modelagem Laboratorial de Turbinas Eólicas por Motores de Corrente Contínua**”. XI Induscon - 9th IEEE/IAS - International Conference on Industry Applications, Novembro, 2010.
- [28] LabVIEW. **User Manual**. Edição Abril de 2003.
- [29] Liang, Y. C., Gosbell, V. J. “**Realistic Computer Model of DC Machine for CADA Topology on SPICE2**”. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Abril, 1988, pp. 765 – 771.
- [30] E. Bim. “**Máquinas Elétricas e Acionamento**”. Campinas: Campus, 2009. 480 p.
- [31] PCI – 1602. **Manual de Utilização**.
- [32] uDX Série 200. **Controlador Programável. Manual de Utilização uDX 200**. DEXTER, Revisão 2.87. Dezembro de 2009.

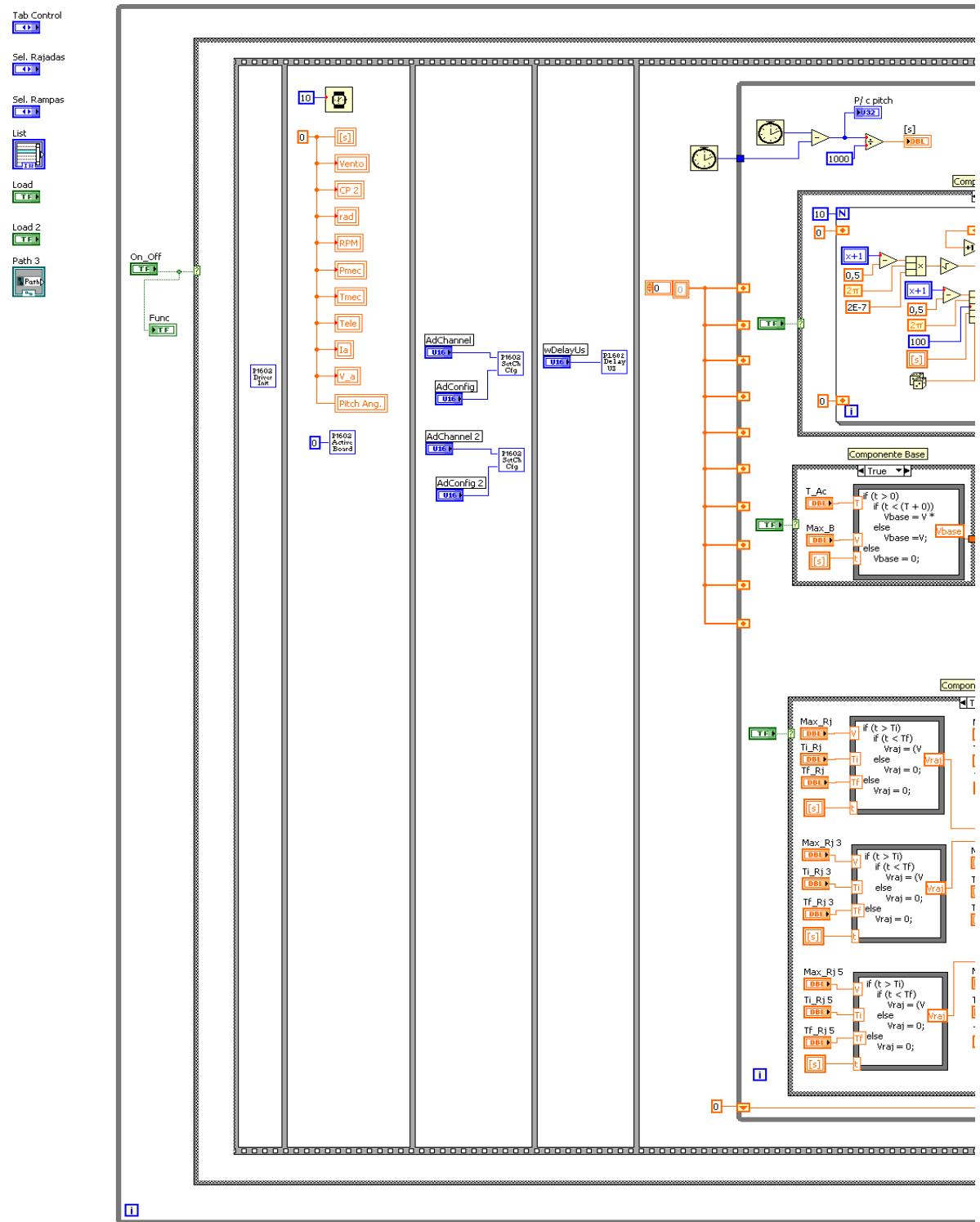
---

## Referências Bibliográficas

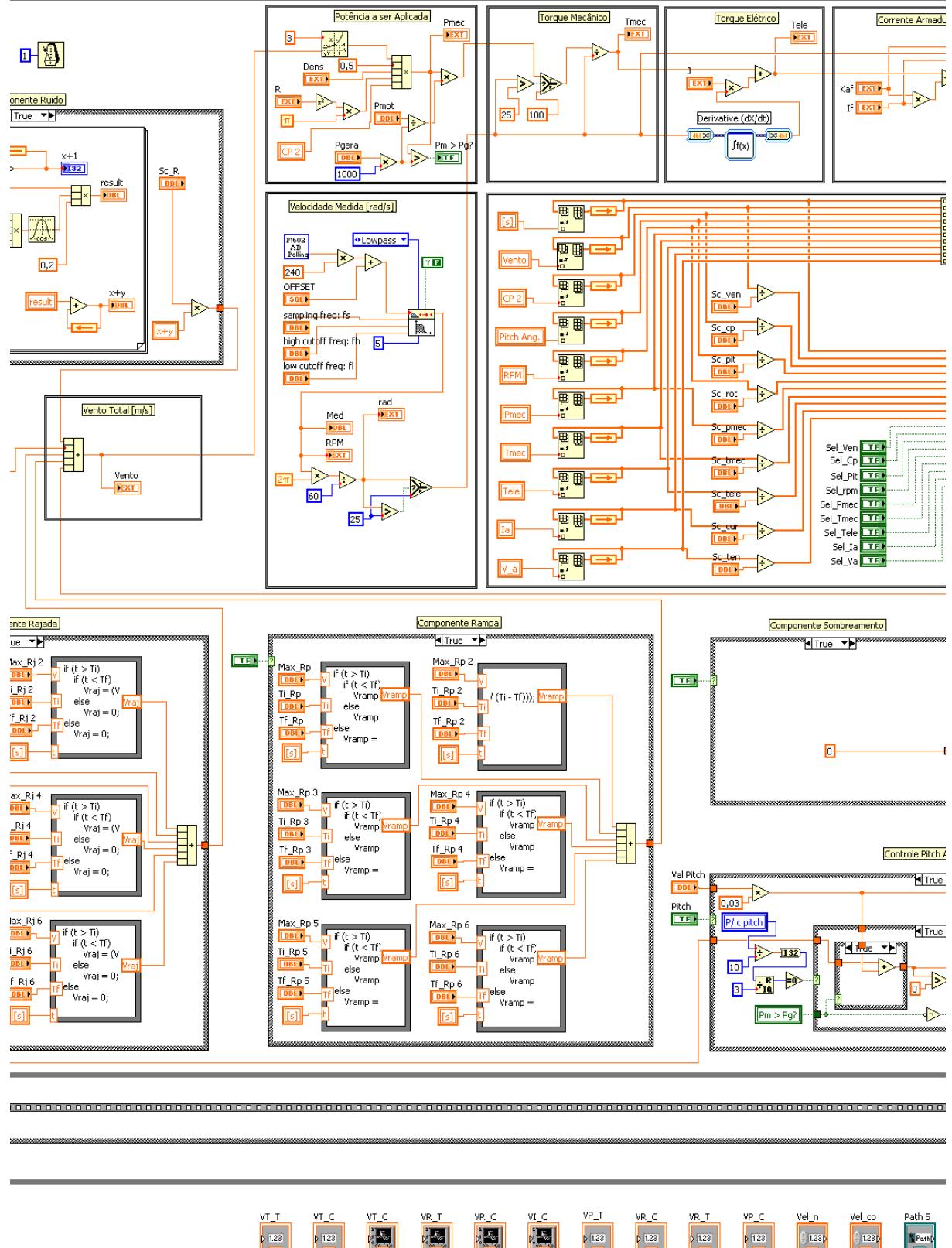
---

- [33] F. H. Costa, E. B. Alvarenga, J. C. Oliveira G. C. Guimarães, A. F. Bonelli, Z. S. Vitório, “**Time Domain Variable Speed Wind Energy Conversion Systems Modelling Using ATP Platform**”, ICREP - International Program Committee for the 'International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Fevereiro, 2011.
- [34] Fernanda H. Costa, Alex Reis, Guilherme L. Xavier, Elias B. Alvarenga, José C. Oliveira, Geraldo C. “**A Laboratory Structure for Dynamic and Power Quality Studies of Wind Farms**”. COBEP - XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência. Abril, 2011.

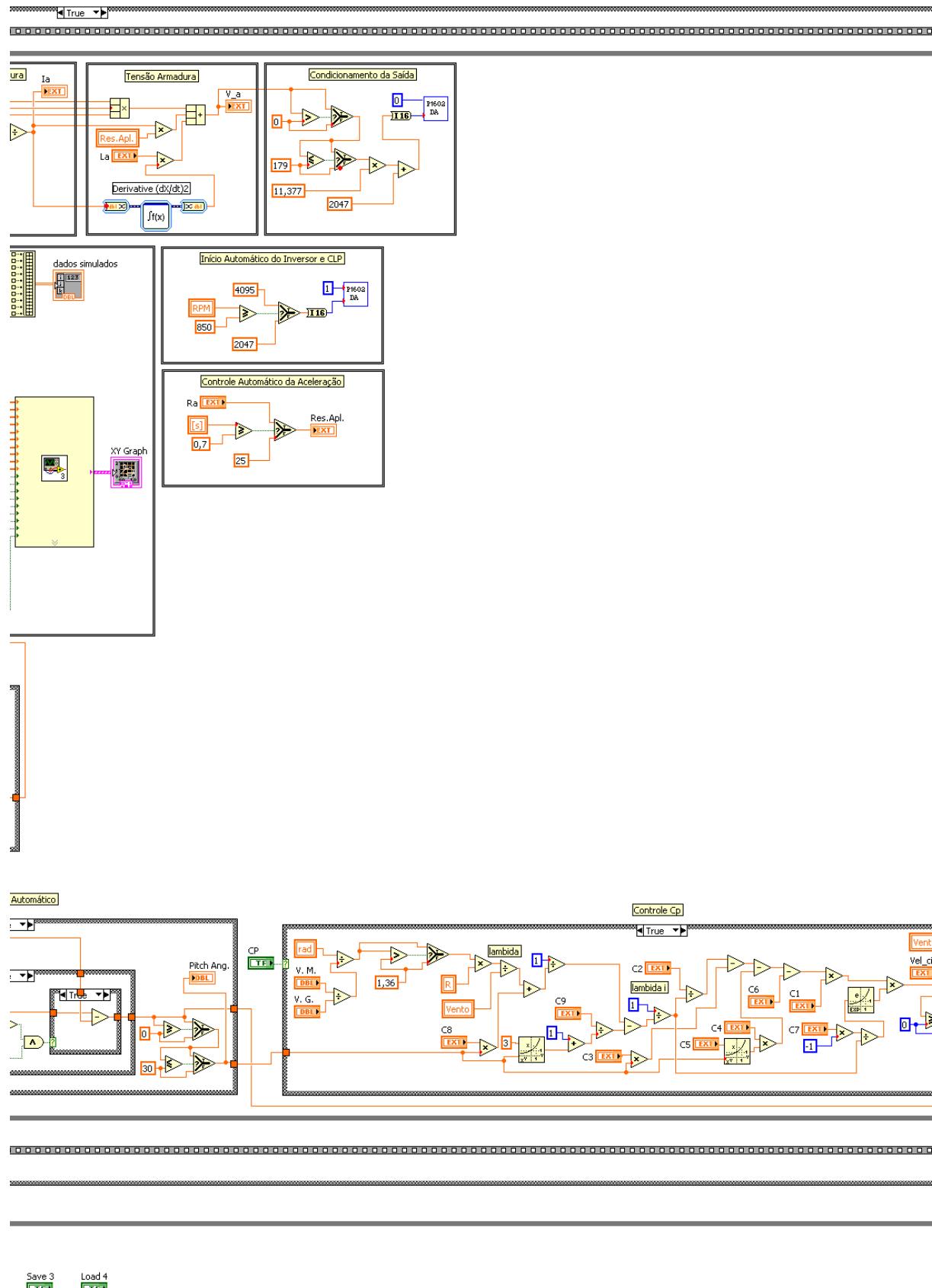
# ANEXO 1



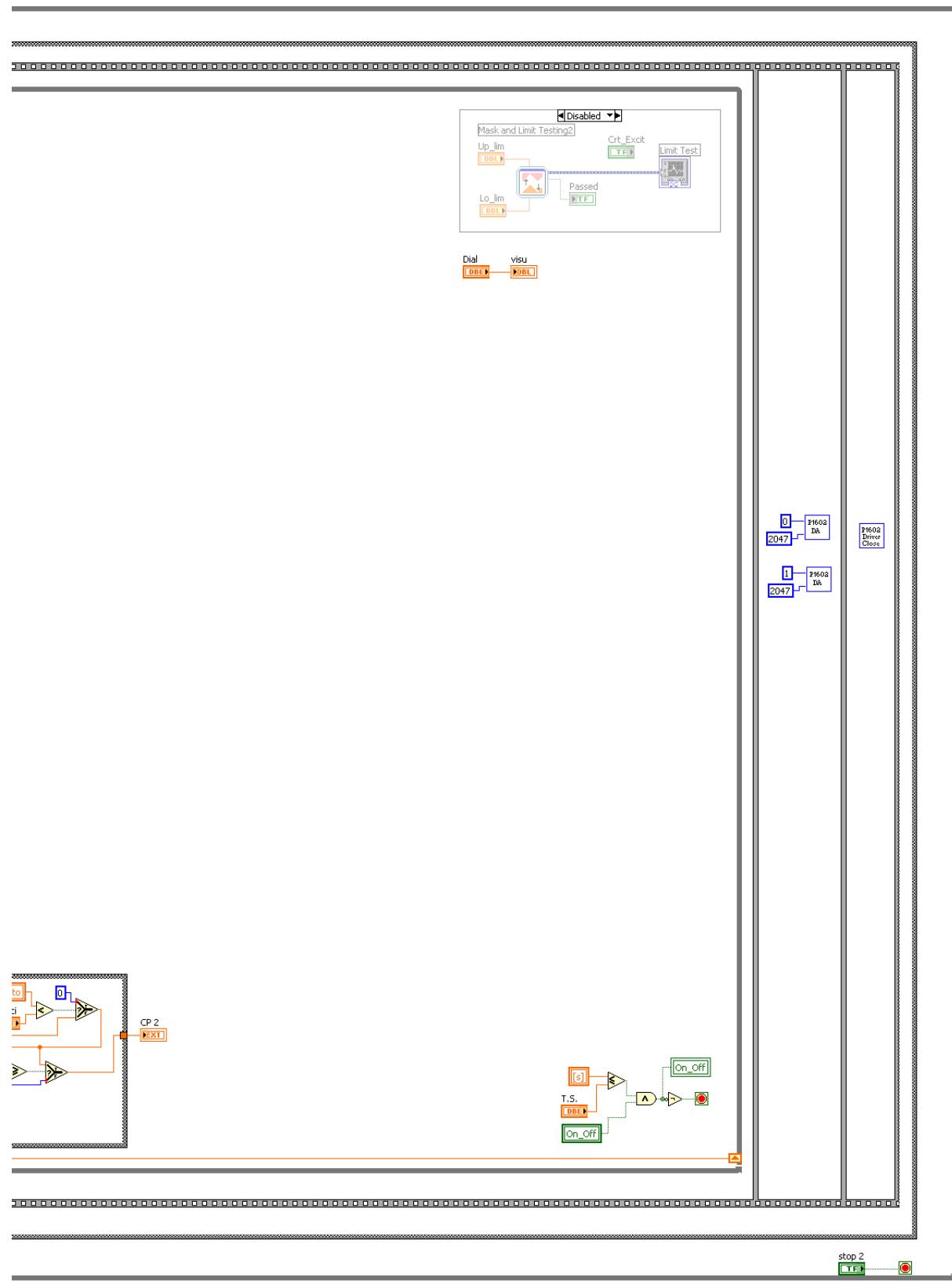
## Anexo 1



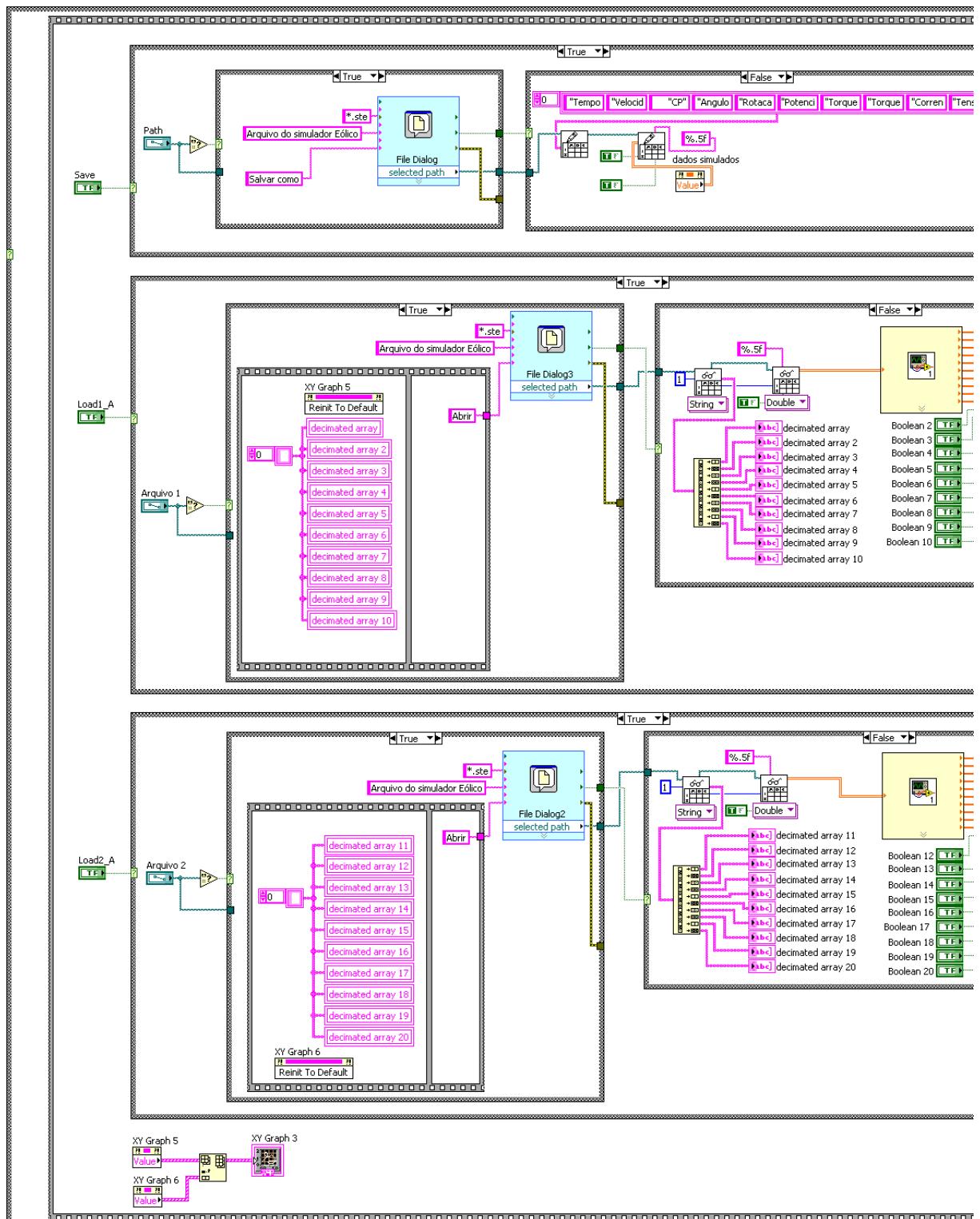
## Anexo 1



## Anexo 1



## **Anexo 1**



## **Anexo 1**

