

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

# **Controle de um Motor de Indução trifásico para Emulação de uma Turbina Eólica**

**Autor: Bruno Marques Ivo**  
**Orientador: Professor Lélío Ribeiro Soares Júnior**

Brasília, DF  
2017



Bruno Marques Ivo

## **Controle de um Motor de Indução trifásico para Emulação de uma Turbina Eólica**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Professor Lélío Ribeiro Soares Júnior

Coorientador: Professor Anésio de Leles Ferreira Filho

Brasília, DF

2017

---

Bruno Marques Ivo

Controle de um Motor de Indução trifásico para Emulação de uma Turbina Eólica/ Bruno Marques Ivo. – Brasília, DF, 2017 -

79 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Professor Lélío Ribeiro Soares Júnior

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2017 .

1. Turbina Eólica. 2. Bancada Experimental. I. Professor Lélío Ribeiro Soares Júnior. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Controle de um Motor de Indução trifásico para Emulação de uma Turbina Eólica

CDU 02:141:005.6

---

Bruno Marques Ivo

## **Controle de um Motor de Indução trifásico para Emulação de uma Turbina Eólica**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 7 de Julho de 2017:

---

**Professor Lélío Ribeiro Soares Júnior**  
Orientador

---

**Professor Jorge Andrés Cormane  
Angarita**  
Convidado 1

---

**Professor Alex Reis**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2017

# Agradecimentos

Ao Pai Celestial por todas as bênçãos, graças e força que tem me dado para continuar forte e perseverante na caminhada acadêmica e na vida.

A minha família, Wilson Ivo José, Erondina Marques Ivo, Isabella Marques Ivo e os demais que também são muito importantes e exemplos na minha criação e formação como um homem, por todo apoio, suporte amor e carinho que sempre me foi dado.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, elevado pela acendrada confiança no mérito de ética aqui presentes.

Ao meu orientador Lélío Ribeiro Soares Júnior e co-orientador Anésio de Leles Ferreira Júnior pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas correções, incentivos e ensinamentos.

A Livia de Sá Araújo e Stephanie Correia Costa por estarem ao meu lado dando apoio, empurrões e repreendendo quando preciso, para crescermos e desenvolvermos sendo o melhor possível na vida acadêmica e como cidadãos.

Por fim a todos que estiveram presentes ou mesmo cruzaram esta caminhada que foi longa e difícil mas que está chegando ao fim com muito mérito e aprendizado.

*“A sabedoria oferece proteção,  
como o faz o dinheiro,  
mas a vantagem do conhecimento é esta:  
a sabedoria preserva a vida  
de quem a possui.  
(Bíblia Sagrada, Eclesiastes 7:12)*

# Resumo

Para fins de análise da influência do comportamento do vento em um sistema de geração elétrica alternativa, baseada em energia eólica, serão realizados estudos de emulação de uma turbina eólica. A potência mecânica disponível no eixo de uma turbina eólica será emulada a partir da potência mecânica obtida no eixo de um motor elétrico trifásico de indução. A velocidade do eixo do motor deverá seguir um comportamento semelhante ao observado na relação entre a velocidade do vento, a velocidade e potência disponíveis no eixo de uma turbina eólica. Será implementado todo um aparato de instrumentação e controle dinâmico do motor de forma a integrar o sistema a uma bancada de simulação de geração eólica. Tal integração ocorrerá através de comunicação serial utilizando o protocolo MODBUS e a plataforma LabVIEW para realização do controle. O objetivo do projeto como um todo é tornar possível o controle do motor de indução trifásico para que o comportamento do mesmo se assemelhe ao de uma turbina eólica para futuras análises.

**Palavras-chaves:** Energia Eólica. Motor de Indução. Controle Dinâmico. Qualidade de energia. LabVIEW.

# Abstract

To wind influence behavior analysis purposes in an alternative power generation system based on wind power, it will be held emulation studies of a wind turbine. The mechanical power available on the shaft of a wind turbine will be emulated from the mechanical power obtained in the axis of a three-phase electric induction motor. Motor spindle speed must follow a behavior similar to that observed in the relationship between the wind speed, speed and power available on the shaft of a wind turbine. It will be implemented throughout an instrumentation apparatus and engine dynamic control in order to integrate the system to a wind power generation simulation bench. Such integration will occur through communication using MODBUS serial protocol and the LabVIEW platform for realization of control. The aim of the whole project is to make real the control of the motor to emulate the wind turbine with accuracy enough to afterwards analysis.

**Key-words:** Wind Energy. Induction Motor. Dynamic Control. power quality. LabVIEW.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de Turbina Eólica (HOJE, 2014) . . . . .	23
Figura 2 – Desenho de um Estator (GUEDES, 1994) . . . . .	25
Figura 3 – Desenho de um Rotor (GUEDES, 1994) . . . . .	26
Figura 4 – Exemplo de MIT da empresa WEG (ANDRADE, 2014) . . . . .	27
Figura 5 – Circuito equivalente do Rotor (CASTRO, ) . . . . .	28
Figura 6 – Circuito equivalente do Rotor e Estator (CASTRO, ) . . . . .	28
Figura 7 – Circuito Simplificado do Rotor e Estator (CASTRO, ) . . . . .	29
Figura 8 – Circuito Simplificado Completo (CASTRO, ) . . . . .	29
Figura 9 – Diagrama de Potências e Perdas(CASTRO, ) . . . . .	30
Figura 10 – Diagrama de Blocos internos do Inversor de Frequência(RASHID, 1993) . . . . .	32
Figura 11 – Exemplo de um IHM típico(RASHID, 1993) . . . . .	32
Figura 12 – Diagrama de Controle V/F (CONTROLS, 2012) . . . . .	36
Figura 13 – Diagrama de Controle VVW (CONTROLS, 2012) . . . . .	37
Figura 14 – Diagrama de Controle Vetorial Sem Sensor (CONTROLS, 2012) . . . . .	38
Figura 15 – Módulo de Comunicação RS-485 (LTDA., 2010) . . . . .	41
Figura 16 – Conector DB-9 Macho (RODRIGUEZ, 2011) . . . . .	41
Figura 17 – Fluxo de dados sem erro (MODBUS.ORG, 2002) . . . . .	43
Figura 18 – Fluxo de dados com erro (MODBUS.ORG, 2002) . . . . .	43
Figura 19 – Diagrama de estados (MODBUS.ORG, 2002) . . . . .	44
Figura 20 – Logotipo do Programa LabVIEW (N.I., 2016) . . . . .	44
Figura 21 – Inversor de Frequência da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016) . . . . .	48
Figura 22 – Gerador PMSG da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016) . . . . .	49
Figura 23 – Conversor <i>Back-to-Back</i> da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016) . . . . .	50
Figura 24 – Filtros Indutivos da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016) . . . . .	51
Figura 25 – Resistores de Pré-carga da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016) . . . . .	51
Figura 26 – Adaptador Serial/USB (SIIG, 2015) . . . . .	53
Figura 27 – Diagrama de Referências a partir de Arquivo . . . . .	56
Figura 28 – Interface de Controle Vetorial . . . . .	59
Figura 29 – Interface para Configuração Auxiliar . . . . .	60
Figura 30 – Parâmetros Obtidos pela Auto-Estimativa . . . . .	61
Figura 31 – Interface em Funcionamento . . . . .	62
Figura 32 – Erro de Conexão . . . . .	62
Figura 33 – Provável Erro . . . . .	62
Figura 34 – Diagrama de Configuração Auxiliar . . . . .	70
Figura 35 – Diagrama de Controle . . . . .	71
Figura 36 – Interface do Exemplo MODBUS Init.vi . . . . .	76

Figura 37 – Diagrama de Blocos do Exemplo MODBUS Init.vi . . . . .	76
Figura 38 – Linha explicativa do parâmetro P0220 (CONTROLS, 2012) . . . . .	77
Figura 39 – Linha explicativa do parâmetro P0221 (CONTROLS, 2012) . . . . .	77
Figura 40 – Linha explicativa do parâmetro P0683 (CONTROLS, 2012) . . . . .	77
Figura 41 – Linha explicativa do parâmetro P0202 (CONTROLS, 2012) . . . . .	78
Figura 42 – Parâmetros relacionados ao controle do torque (CONTROLS, 2012) . .	78
Figura 43 – Parâmetros relacionados ao controle vetorial (CONTROLS, 2012) . . .	78
Figura 44 – Diagrama de Blocos do ExemploMB Serial Master Query.vi . . . . .	79

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Especificações do MIT (SILVEIRA, 2016) . . . . .	47
Tabela 2 – Especificações do Inversor de Frequência (SILVEIRA, 2016) . . . . .	48
Tabela 3 – Especificações do PMSG (SILVEIRA, 2016) . . . . .	49
Tabela 4 – Especificação do conversor de frequência <i>Back-to-Back</i> (SILVEIRA, 2016) . . . . .	50
Tabela 5 – Especificações dos Indutores (SILVEIRA, 2016) . . . . .	51
Tabela 6 – Pinagem do conector de 4 vias para RS485 (LTDA., 2010) . . . . .	52
Tabela 7 – Pinagem do conector DB9 para o Adaptador Serial-USB (SIIG, 2015) . . . . .	52

# Lista de abreviaturas e siglas

RTU	Remote Terminal Unit
PDU	protocol data unit
ADU	application data unit
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
VVW	Voltage Vector WEG
MIT	Motor de Indução trifásico
RPM	Rotações por Minuto
CPU	Unidade Central de Processamento
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IHM	Interface Homem Máquina
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
v/f	Velocidade versus Frequência
VISA	Virtual Instrument Software Architecture
VI	Virtual Instrument
LQEE	Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica

# Lista de símbolos

$I_s$	Corrente de Saída
$I_0$	Corrente Estatórica
$I_d$	Corrente Direta
$I_q$	Corrente de Quadratura
$P_{in}$	Potência de Entrada
$T$	O Torque
$P$	A Potência Desenvolvida no Rotor
$P_t$	A Potência Mecânica da Turbina Eólica
$\omega_1$	A velocidade Angular
$p_{polos}$	O número de Polos
$f_1$	Frequência do estator
$R_2$	Resistência do circuito do rotor
$X_{20}$	Reatância do circuito do rotor na partida
$I_{20}$	Corrente rotórica
$v_{20}$	Tensão induzida no estator
$S$	Escorregamento
$n_1$	Velocidade de deslocamento do estator em RPM
$n_2$	Velocidade mecânica do rotor em RPM
$\vec{F}$	Vetor força
$\vec{i}$	Vetor intensidade de Corrente
$\vec{B}$	Vetor intensidade de Fluxo
$I_{rms}$	Corrente Nominal do Conversor <i>Back-to-Back</i>
$I_{rmsmax}$	Frequência de Chaveamento Máxima do Conversor <i>Back-to-Back</i>

$V_{outmax}$	Tensão Máxima de Saída AC
$V_{dcmax}$	Tensão Máxima do Barramento CC
$C$	Capacitância
$\rho$	Massa Específica
$C_p$	Coefficiente de Potência
$A$	Área Varrida
$V$	Velocidade Nominal
$C_t$	Coefficiente de Torque
$R$	Raio da Turbina
$Ref$	Referência em 13 Bits.
$vel$	Velocidade que se deseja enviar.

# Sumário

<b>I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	Contextualização	18
1.2	Problema	19
1.3	Objetivos	19
1.4	Apresentação do Manuscrito	20
<b>II</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>22</b>
2.1	Turbina Eólica	22
2.2	Motor de Indução Trifásico	24
2.2.1	Princípio de Funcionamento e Composição	25
2.2.2	Modelagem Matemática	26
2.3	Inversor de Frequência	30
2.3.1	Princípios de Funcionamento	31
2.3.2	Parâmetros	31
2.3.2.1	parâmetros de Leitura	33
2.3.2.2	Parâmetros de regulação	33
2.3.2.3	Parâmetros de configuração	33
2.3.2.4	Parâmetros de motor	33
2.3.2.5	Parâmetros das funções especiais	34
2.3.3	Tipos de Controle	34
2.3.3.1	Controle Escalar	35
2.3.3.2	Controle VVW	35
2.3.3.3	Controle Vetorial	36
2.4	Comunicação Serial	39
2.4.1	RS-485	40
2.4.2	Protocolo MODBUS	41
2.4.3	LabVIEW	43
<b>III</b>	<b>COMPOSIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DA BANCADA</b>	<b>46</b>
<b>3</b>	<b>COMPONENTES E DEFINIÇÕES</b>	<b>47</b>
3.1	Motor de Indução Trifásico (MIT)	47

3.2	Inversor de Frequência . . . . .	47
3.3	Gerador Síncrono de Imãs Permanentes (PMSG) . . . . .	48
3.4	Conversor Back-to-Back . . . . .	49
3.5	Filtros Indutivos . . . . .	50
3.6	Pré-Carga . . . . .	51
3.7	Módulo RS-485 . . . . .	52
3.8	Adaptador Serial-USB . . . . .	52
<b>IV</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE VIA LABVIEW</b>	<b>54</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE VETORIAL . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>Procedimentos . . . . .</b>	<b>55</b>
4.1.1	Configuração e Programação do Inversor de Frequência . . . . .	55
4.1.2	Procedimentos Computacionais para Desenvolvimento da Interface LabVIEW	56
4.1.3	Desenvolvimento LabVIEW . . . . .	58
<b>4.2</b>	<b>Resultados Obtidos . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>V</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>64</b>
5.1	Atividades Futuras . . . . .	65
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE A – DIAGRAMAS . . . . .</b>	<b>70</b>
	<b>APÊNDICE B – DETALHAMENTO DOS DIAGRAMAS . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>B.1</b>	<b>Estruturas de Repetição . . . . .</b>	<b>72</b>
<b>B.2</b>	<b>Parâmetros . . . . .</b>	<b>73</b>
B.2.1	Parâmetros de Leitura . . . . .	73
B.2.2	Parâmetros de Leitura . . . . .	74
	<b>ANEXOS</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO A – VI DE INICIALIZAÇÃO . . . . .</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO B – PARÂMETROS . . . . .</b>	<b>77</b>



<b>ANEXO C – VI REFERÊNCIA . . . . .</b>	<b>79</b>
--	-----------

Parte I

INTRODUÇÃO

# 1 Introdução

Assuntos introdutórios, contextualização, problema, objetivos e uma breve apresentação do manuscrito são tópicos deste capítulo. Para que uma ideia inicial seja dada sobre o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.1 Contextualização

A conversão de energia eólica é a transformação da energia do vento em energia útil, tal como na utilização de aerogeradores para produzir eletricidade, moinhos de vento para produzir energia mecânica ou velas para impulsionar veleiros. A energia eólica, enquanto alternativa aos combustíveis fósseis, é renovável, está permanentemente disponível, é limpa, não produz gases de efeito de estufa durante a produção e requer menos terreno.([FTHENAKIS, 2009](#))

A energia do vento é bastante consistente ao longo de intervalos anuais, mas tem variações significativas em escalas de tempo curtas. À medida que cresce a proporção de energia eólica numa determinada região, torna-se necessário aumentar a capacidade da rede de modo a absorver os picos de produção, aproveitar o aumento da capacidade de armazenamento e recorrer à importação e exportação de eletricidade para regiões adjacentes quando há menos procura ou a produção eólica é insuficiente. Há necessidade das previsões meteorológicas auxiliarem no ajuste da rede de acordo com as variações de produção previstas.([PLATT, 2013](#))([PLATT REG; FITCH-ROY; GARDNER, 2012](#))

O Brasil possui grande potencial em energia eólica. Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobras, o território brasileiro tem capacidade para gerar até 300 gigawatts, mas atualmente a capacidade instalada é de 8.12 GW, o que representa menos de 3% do potencial. ([BRASIL, 2015](#))

A quantidade total de potência que, em termos econômicos é viável explorar a partir do vento, é consideravelmente maior que o atual consumo humano de energia a partir de todas as fontes.([HURLEY, 2009](#))

A qualidade de energia no contexto da geração eólica descreve o desempenho elétrico do sistema de geração de eletricidade do aerogerador. Quaisquer perturbações sobre a rede elétrica devem ser mantidas dentro de limites técnicos estabelecidos conforme o nível de exigência imposto pelo gerente de operações da rede. Para a maior parte das aplicações de unidades eólicas, a rede pode ser considerada como um componente capaz

de absorver toda a potência gerada por estas unidades, com tensão e frequência constantes. No caso, por exemplo, de sistemas isolados de pequeno porte, podem ser encontradas situações onde a potência elétrica fornecida pelo aerogerador alcance valores compatíveis com a capacidade da rede. Onde a rede é fraca, quando, no ponto de interligação, a relação entre a potência de curto circuito da rede e a potência eólico-elétrica injetada na rede é pequena, a qualidade da energia deve ser uma das principais questões a serem observadas sobre a utilização de aerogeradores (tamanho, tipo de controle, etc.).(CARVALHO, 2003)

## 1.2 Problema

Com o intuito de estudar e analisar a qualidade da energia produzida através de Turbinas eólicas, uma bancada experimental no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica está sendo desenvolvida.

Um motor de indução trifásico é utilizado para reproduzir as funções mecânicas da turbina eólica, gerando diferentes velocidades e simulando a ação do vento nas pás. Portanto o motor deve ser controlado de tal forma a reproduzir perfis de vento pré-determinados e possibilitar os estudos quanto à energia produzida no gerador. Sendo o Inversor o componente que irá acionar (energizar) o motor, deve-se encontrar uma forma de comunicar-se com o mesmo através de uma interface de fácil acesso ao usuário. Possibilitando introduzir no sistema os parâmetros necessários e observar/analisar dados, como: velocidade de referência e de rotação, frequência, gráficos, entre outros valores que possam ser obtidos com todo o aparato disponibilizado.

## 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo encontrar uma solução para tornar possível a comunicação entre o Inversor de Frequência WEG CFW-11 e o computador que irá enviar informações para controle do motor pelo inversor. Definindo então o tipo de comunicação, protocolo a ser usado, *software* o qual irá servir de base para desenvolver a interface usuário/máquina e quais são os parâmetros, requerimentos e especificações para tal interface e para o *background* do programa. A fim de que isso possa ser introduzido ao sistema e promover adequada emulação de uma turbina eólica. Espera-se possibilitar futuros estudos em laboratório quanto à qualidade de energia elétrica produzida a partir de geradores eólicos observando os diferentes perfis de vento possíveis.

Para isso um motor de indução trifásico, controlado pelo inversor de frequência, conectado ao eixo do gerador será utilizado emulando a velocidade do vento recebida pelas pás e transferida para o eixo. Comandos e análise dos dados enviados e de veloci-

dade do motor através do software LabView (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), da National Instruments introduzidos em uma interface gráfica. De fácil compreensão estes dados serão enviados ao sistema através da comunicação Serial-USB conectado ao inversor pelo conversor e um módulo RS-485 se comunicando através do protocolo MODBUS. Podendo então fazer com que o motor tenha diferentes torques em determinados tempos de acordo com os perfis de vento previamente definidos em estudos anteriores e definidos pelo grupo de trabalho.

## 1.4 Apresentação do Manuscrito

Esta dissertação é dividida em capítulos, de forma a melhor apresentar o desenvolvimento da pesquisa e dos avanços do projeto. Os capítulos serão brevemente e previamente apresentados abaixo:

- **Capítulo 2 - Fundamentação Teórica:** aqui é dada uma breve explicação sobre turbinas eólicas; uma base teórica suficiente sobre motores de indução trifásicos para entender o uso do mesmo na reprodução das propriedades mecânicas da turbina eólica; explicação sobre inversores de frequência, sua composição, funções e seus tipos de controle, que serão utilizados; e por fim uma exposição de informações sobre comunicação serial, o conversor Serial RS-485 / Serial USB, o protocolo MODBUS e o programa LabVIEW que é utilizado para criar a interface de controle do sistema.
- **Capítulo 3 - Composição e Especificação da Bancada:** este capítulo foi reservado para apresentar os componentes desta bancada laboratorial para estudos a partir da simulação de uma turbina eólica.
- **Capítulo 4 - Desenvolvimento da Comunicação Via LabVIEW:** por fim são apresentados os desenvolvimentos quanto à comunicação e interação do usuário via computador (LabVIEW) com o inversor de frequência para possibilitar o controle do MIT. De forma a permitir o controle e facilitar para um futuro próximo os estudos desejados quanto aos modelos de vento e a qualidade de energia no sistema pelos responsáveis pela análise.

## Parte II

### Fundamentação Teórica

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As informações a seguir representam uma breve explicação sobre alguns elementos importantes para a boa compreensão do objetivo e solução desta dissertação. Então será apresentado o necessário para um completo entendimento do trabalho e informações complementares, possíveis de ser encontradas em referências bibliográficas apresentadas.

### 2.1 Turbina Eólica

Energia eólica é aquela gerada pelo vento, embora ainda pouco utilizada, é considerada uma importante fonte de energia por se tratar de uma fonte limpa (não gera poluição e não agride o meio ambiente). (OLIVEIRA, 2012)

(ROSSI, 2016) define que basicamente a produção de energia é obtida a partir de grandes turbinas (aerogeradores), em formato de cata-vento, colocadas em locais abertos e com boa quantidade de vento. Através de um gerador, o movimento destas turbinas gera energia elétrica.

O aerogerador é um dispositivo destinado a converter a energia cinética contida no vento em elétrica. A quantidade de energia gerada depende:

- Da Velocidade do vento;
- Do diâmetro do rotor;
- Do rendimento de todo o sistema.

Ainda (ROSSI, 2016) diz que a turbina é composta principalmente pelos seguintes subsistemas:

- **Torre** - é o elemento que sustenta o rotor e a nacelle na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica;
- **Rotor** - é o componente que efetua a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. No rotor são fixadas as pás da turbina. Todo o conjunto é conectado a um eixo que transmite a rotação das pás para o gerador, muitas vezes, através de uma caixa multiplicadora;
- **Nacelle** - é o compartimento instalado no alto da torre e que abriga todo o mecanismo do gerador;

- **Caixa de multiplicação (transmissão)** – é o mecanismo que transmite a energia mecânica do eixo do rotor ao eixo do gerador;
- **Gerador** - é o componente que tem função de converter a energia mecânica do eixo em energia elétrica;
- **Mecanismos de controle** - as turbinas eólicas são projetadas para fornecerem potência nominal de acordo com a velocidade do vento prevalecente, ou seja, a velocidade média nominal que ocorre com mais frequência durante um determinado período;
- **Anemômetro** - Mede a intensidade e a velocidade dos ventos, normalmente, de 10 em 10 minutos;
- **Pás do rotor** - Captam o vento e convertem sua potência ao centro do rotor;
- **Biruta (sensor de direção)** - São elas que captam a direção do vento, pois ele deve estar perpendicular à torre para se obter um maior rendimento.

Abaixo a “Fig.(1)” está um exemplo de uma turbina eólica apontando suas componentes:

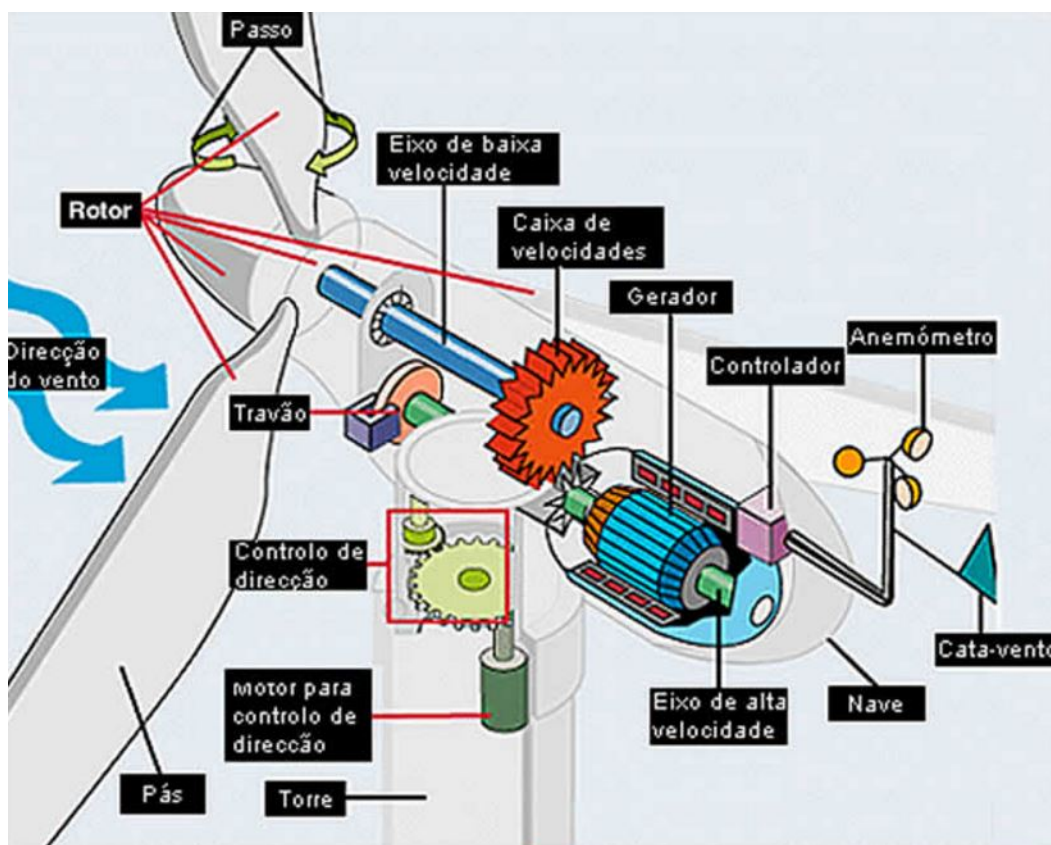


Figura 1 – Exemplo de Turbina Eólica (HOJE, 2014)



As equações de torque e potência mecânica de uma turbina eólica são definidas e demonstradas por (WENZEL, 2007) e estão expostas nas (2.2) e (2.1) respectivamente:

$$P_t = \frac{1}{2}\rho AC_p V^3 \quad (2.1)$$

$$T = \frac{1}{2}\rho AC_t V^3 \pi R^3 \quad (2.2)$$

onde:

- $P_t$  - Potência Mecânica da Turbina;
- $\rho$  - Massa Específica do ar;
- $A$  - Área Varrida;
- $V$  - Velocidade Nominal;
- $C_t$  - Coeficiente de Torque;
- $R$  - Raio da Turbina;
- $T$  - Torque;
- $C_p$  - Coeficiente de Potência.

## 2.2 Motor de Indução Trifásico

O motor de indução de corrente alternada é, de longe, o motor mais utilizado na indústria. Tradicionalmente, tem sido usado em aplicações de velocidade constante e variável que não atendem a processos dinâmicos rápidos. Devido ao recente desenvolvimento de várias novas tecnologias de controle, tais como vetorial e controle direto de torque, esta situação está mudando rapidamente. A razão para isso é o fato de que o motor de indução é muito mais barato e robusto do que o seu concorrente, o motor de corrente contínua, em tais aplicações. (RASHID, 2011)

Para compreender o funcionamento de um Inversor de Frequência é de fundamental importância entender primeiro como funciona um motor de indução. Para começar enunciaremos os princípios físicos básicos da conversão de energia elétrica em energia mecânica. (MASCHERONI, 2010)

### 2.2.1 Princípio de Funcionamento e Composição

O princípio de funcionamento do Motor de Indução trifásico segue a mesma ideia dos outros motores elétricos, que a partir da interação do fluxo magnético, produzido no estator, com a corrente no condutor do rotor, resulta em ma força girante no condutor. Sendo tal força proporcional ao fluxo magnético e à corrente, representada na equação de produto vetorial (2.3). (FITZGERALD CHARLES KINGSLEY JR., 2006)

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Definindo:

- $\vec{F}$  Vetor força
- $i\vec{l}$  Vetor intensidade de Corrente e comprimento do condutor
- $\vec{B}$  Vetor Densidade de Fluxo Magnético

Sendo constituído por chapas de ferro magnético silicioso em formato de coroa circular ranhurada, com ranhuras semifechadas para formar o circuito magnético. O estator pode possuir canais para refrigeração do motor entre as ranhuras.

O circuito elétrico estatórico é constituído por três bobinas afastadas em  $\frac{2\pi}{3}$  raios para alimentação das fases de um sistema trifásico. Os condutores elétricos formam diversas espiras nas bobinas e estão dispostos em duas camadas nas ranhuras. Lembra-se que tanto a parte elétrica e mecânica são isoladas por esmalte isolante e algum material plástico, respectivamente. Para máquinas de maior potência há algumas alterações de materiais. (GUEDES, 1994)

Um exemplo simplificado de estator pode ser encontrado na “Fig.(2)”

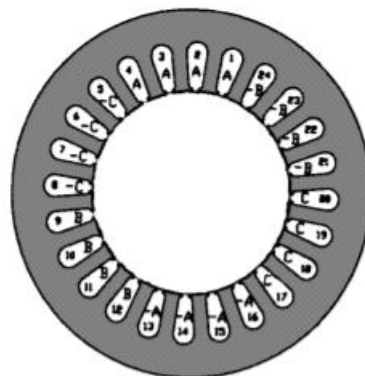


Figura 2 – Desenho de um Estator (GUEDES, 1994)

Também o rotor é constituído do mesmo material e suas chapas magnéticas têm formato de corôa circular que possui ranhuras fechadas perto da periferia externa. O número de ranhuras em ambas as partes são o mesmo para evitar aparecimento de ruído quando em funcionamento. Pode ser do tipo, gaiola de alumínio ou bobinado.

A parte elétrica deste componente é conectada à carcaça, parte fixa, da máquina através de conectores anéis-escova para que seja possível alterar o valor da resistência rotórica durante o seu funcionamento. Um exemplo de rotor é exemplificado na “Fig.(3)”



Figura 3 – Desenho de um Rotor (GUEDES, 1994)

Alimentado por um sistema trifásico, com circuito elétrico do rotor formado por bobina polifásica curto-circuitada, as correntes do mesmo encontram-se a circular no interior de um campo magnético gerado pelo estator que provoca o aparecimento de forças mecânicas sobre os condutores rotóricos que são as partes móveis do motor. Assim permitindo a conversão de energia elétrica em mecânica, que será explicada logo a seguir.

Por fim um exemplo de motor de indução trifásico famoso no mercado incluindo outros componentes não citados mas que não têm grande importância para a parte energética na “Fig.(4)” (GUEDES, 1994)

### 2.2.2 Modelagem Matemática

Para realizar a modelagem matemática um circuito equivalente é definido para facilitar o desenvolvimento dos cálculos e mesmo assim encontrar fórmulas para torque e velocidade utilizando-se da conversão de energia mecânica em elétrica. Com todas as deduções e cálculos matemáticos citados em (FITZGERALD CHARLES KINGSLEY JR., 2006)

Para isso, algumas suposições e afirmações devem ser feitas,

- O enrolamento do rotor possui o mesmo número de polos e fases do estator,
- Supondo que a máquina está ligada em Y, as correntes são sempre valores de linhas e as tensões valores de fase,
- sabe-se que  $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$  e para  $n_2 = 0$  (máquina parada)  $\rightarrow S = 1$

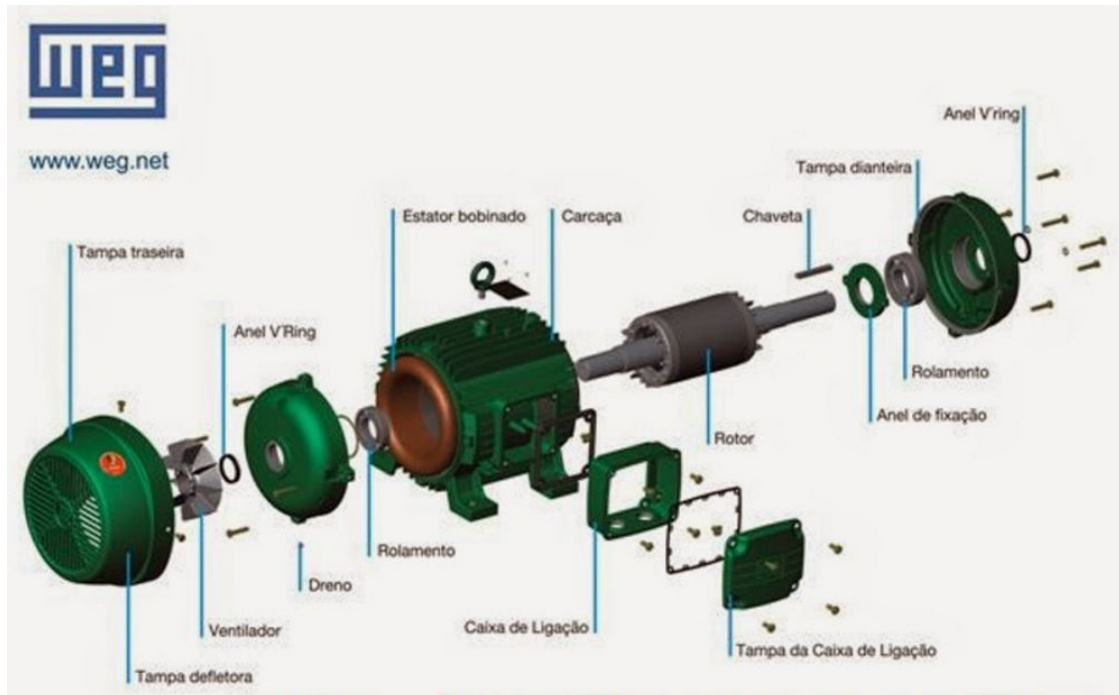


Figura 4 – Exemplo de MIT da empresa WEG (ANDRADE, 2014)

Onde  $S$  é chamado de escorregamento,  $n_1$  a velocidade de giro do campo do estator em relação ao eixo de referência,  $n_2$  a velocidade mecânica do rotor dadas em RPM. O campo girante tem a mesma velocidade que a frequência produzida pelos enrolamentos do motor,

- com  $S = 0$ , velocidade síncrona, não há indução, por consequência a frequência do rotor é nula.

Assumindo também as seguintes variáveis e seus significados:

- $f_1$  Frequência do estator,
- $R_2$  Resistência do circuito do rotor,
- $X_{20}$  Reatância do circuito do rotor na partida,
- $I_2$  Corrente rotórica,
- $v_{20}$  Tensão induzida no estator,

Da “Fig.(5)” que representa o circuito equivalente do rotor, pode-se encontrar a equação para a corrente, representada na (2.4):

$$I_2 = \frac{V_{20}}{\left[\frac{R_2}{S} + X_{20}^2\right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.4)$$

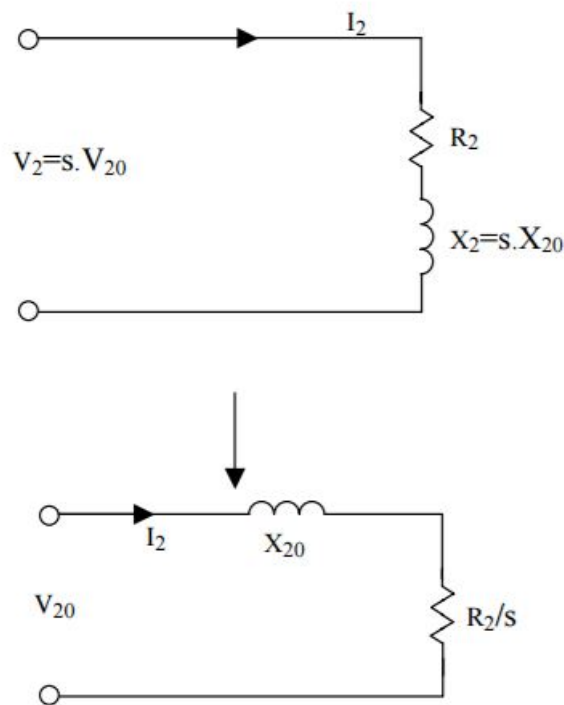


Figura 5 – Circuito equivalente do Rotor (CASTRO, )

A seguir na “Fig.(6)” estão presentes os circuitos equivalentes do rotor e do estator. Aproveitando então que com velocidade zero, ou seja,  $S = 0$  o motor tem o mesmo comportamento de um transformador (estator primário e rotor secundário), obtêm-se o circuito equivalente da “Fig.(7)”

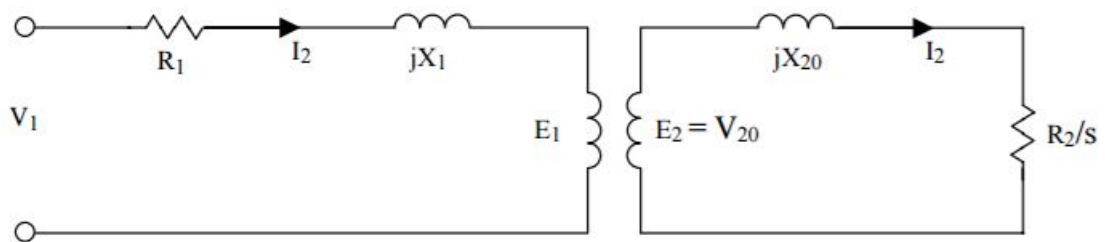


Figura 6 – Circuito equivalente do Rotor e Estator (CASTRO, )

Com isso, as novas variáveis podem ser definidas como:

$$a = \frac{n_1}{n_2}$$

e a equivalente à resistência rotórica é

$$\frac{R_2'}{S} = R_2' + R_2' \cdot \frac{1 - S}{S}$$

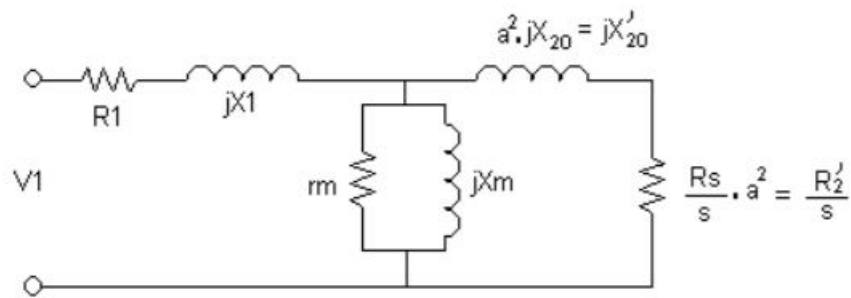


Figura 7 – Circuito Simplificado do Rotor e Estator (CASTRO, )

Para a nova corrente de circuito tem-se:

$$I'_2 = \frac{I_2}{a} \tag{2.5}$$

Assim com o circuito equivalente final, demonstrado na “Fig.(8)” é possível encontrar, a potência elétrica multiplicando a resistência pelo quadrado da corrente, assim como o torque do circuito.

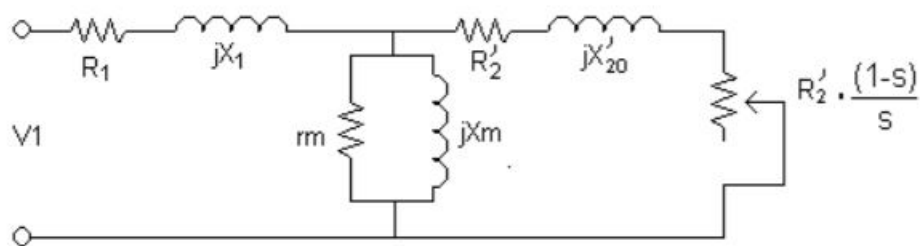


Figura 8 – Circuito Simplificado Completo (CASTRO, )

Abaixo na “Fig.(9)” o diagrama comum de potência de um motor de indução. Para melhor entendimento das potências e equivalentes perdas.

E por fim o torque é definido em (CASTRO, ) pelas eq. (2.6) e eq. (2.7) assim como a velocidade angular pela eq. (2.8)

Equações de Torque:

$$T = \frac{P}{\omega_1(1 - S)} \tag{2.6}$$

$$T = \frac{P_{polos} P_{in}}{2\pi f_1} \tag{2.7}$$

Equação de velocidade Angular:

$$\omega_1 = \frac{4\pi \cdot f_1}{P} \tag{2.8}$$

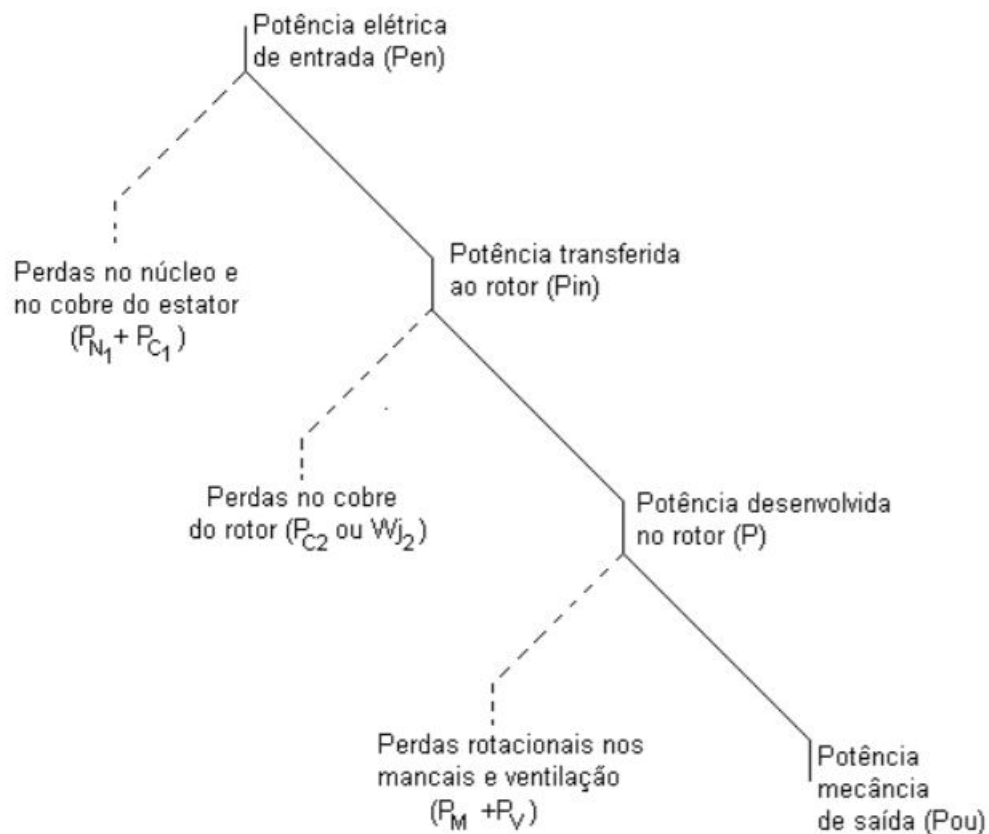


Figura 9 – Diagrama de Potências e Perdas(CASTRO, )

Sendo:

- $T$  o Torque,
- $P$  a Potência Desenvolvida no Rotor,
- $\omega_1$  A velocidade Angular,
- $p_{polos}$  O número de Polos,
- $P_{in}$  Potência de Entrada.

## 2.3 Inversor de Frequência

Os Inversores de Frequência são usados tanto em indústrias de processos quanto em manufaturas, tais como linhas de montagem, automobilísticas, bebidas e alimentícias, papel e celulose e petroquímicas. Existem várias empresas que fabricam inversores de frequências, que apresentam características e funcionamento semelhantes, mas que podem variar de acordo com a faixa de atuação, tanto da frequência quanto da potência. Alguns

exemplos de empresas fabricantes são: Weg, Mitsubishi Electric, Siemens, Hitachi, Fuji Electric, General Electrics, dentre várias outras.(RASHID, 1993)

O CFW-11 é o inversor utilizado em questão. Escolhido pois é robusto e tem capacidade suficiente para atender à demanda do projeto. Capaz de energizar o motor utilizado, comunicar com uma interface externa e realizar a leitura de alguns dados importantes para uma futura análise.

Estes dispositivos são teoricamente divididos em quatro blocos, que são explicados em (RASHID, 1993) e explicitados a seguir:

### 2.3.1 Princípios de Funcionamento

A função do inversor de frequência é ajustar a velocidade de um motor elétrico mantendo seu torque (conjugado).

A “Fig.(10)” mostra a separação explícita dos 4 principais blocos internos de um inversor de frequência. São eles:

- **CPU:** A Unidade Central de Processamento pode ser formada por um microprocessador ou um microcontrolador, dependendo do fabricante. Através da memória integrada e da capacidade de processamento, é neste bloco que todos os parâmetros e dados do sistema são armazenados. Também realiza-se a função mais importante do dispositivo que é: gerar pulsos de disparo através de uma lógica de controle para os transistores IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada).
- **IHM:** A Interface Homem Máquina é um dispositivo que possibilita a visualização e parametrização do inversor através de um visor e teclas. Um exemplo típico de IHM está na “Fig.(11)”
- **Interfaces:** Representam outras possibilidades de comando do inversor. Podendo ser controlado por entradas e saídas analógicas e digitais, com parâmetros de programação que definem quais entradas ou saídas são válidas e quais suas funções.
- **Etapa de Potência:** Este ultimo bloco é constituído de um circuito retificador que através do barramento DC alimenta o inversor, módulo IGBT.

### 2.3.2 Parâmetros

Além da correta instalação do inversor de frequência CFW-11, com melhores informações presentes no manual do fabricante, é preciso informar, definir o que e como ele irá trabalhar. O processo chamado de parametrização pode ser feito através da IHM ou



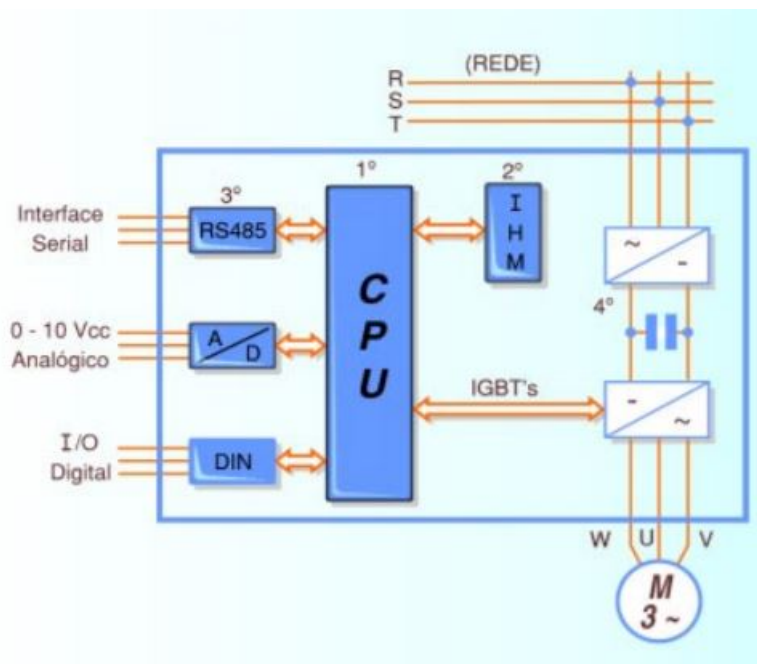


Figura 10 – Diagrama de Blocos internos do Inversor de Frequência(RASHID, 1993)



Figura 11 – Exemplo de um IHM típico(RASHID, 1993)

por outra interface, variando de um fabricante para outro mas a maior parte deles possui interface USB e Serial. (CAPELLI, 2002)

Também é explicado em (CAPELLI, 2002) que, é preciso tornar os parâmetros acessíveis além da visualização, caso já não esteja nesta configuração de fábrica. Feito isto o inversor está pronto para receber novos valores de parametrização.

Ainda o mesmo autor diz que os parâmetros são agrupados pelas seguintes características: parâmetros de leitura, parâmetros de regulação, parâmetros de configuração, parâmetro de motor e (MASCHERONI, 2010) adiciona um outro grupo denominado parâmetro das funções especiais. Todos os grupos sendo melhor explicados abaixo com in-

formações oriundas das fontes acima citadas. Lembrando que são dados alguns exemplos, mas muitos outros completam os grupos de parâmetros, possíveis de serem encontrados em (MASCHERONI, 2010)

#### 2.3.2.1 parâmetros de Leitura

Estas são variáveis que podem ser visualizadas através do visor ou de outro meio que esteja se comunicando com o aparelho, porém, não podem ser alteradas pelo usuário. Exemplos:

- **P002:** Velocidade do Motor. Indica o valor da velocidade real, em rpm;
- **P005:** Frequência de saída do inversor, em hertz (Hz).

#### 2.3.2.2 Parâmetros de regulação

As funções do inversor dependem de alguns ajustes na sua programação para que ocorra de acordo com o esperado. Para isto existem os parâmetros de regulação, sendo dois deles exemplificados abaixo:

- **P100:** Tempo de aceleração. Define o tempo para acelerar linearmente de 0 até a velocidade máxima ;
- **P133:** Referência Mínima, Define o valor mínimo de velocidade na saída quando o inversor é habilitado. .

#### 2.3.2.3 Parâmetros de configuração

Como o nome já diz, este grupo define as configurações, características e funções a serem executadas. Alguns exemplos abaixo:

- **P202:** Tipo de controle. Define o modo de controle do inversor;
- **P220:** Define como é feita a seleção entre a situação local e a situação remota.

#### 2.3.2.4 Parâmetros de motor

Já estes parâmetros são usados para informar ao inversor as características nominais do motor a ser conectado ao mesmo. Por exemplo:

- **P400:** Tensão nominal do motor;
- **P405:** Fator de potência nominal do motor.

### 2.3.2.5 Parâmetros das funções especiais

Inclui os parâmetros relacionados com ciclo automático, regulador PID e regulador de velocidade

### 2.3.3 Tipos de Controle

O inversor excita o motor com tensão, corrente e frequência variáveis, através das quais, consegue-se o controle da velocidade do motor . Os valores aplicados ao motor seguem uma estratégia de controle, a qual depende da decisão tomada e dos ajustes dos parâmetros do inversor. A escolha do tipo de controle é em função das exigências estáticas e dinâmicas de torque e velocidade da carga acionada e pode ser feita alterando parâmetros destinados a ajustar os valores enviados pelo inversor de acordo com o que se espera obter.

([CONTROLS, 2012](#)) cita modos de controle e principais características específicos para o equipamento utilizado:

- **V/f:** controle escalar; modo mais simples de controle por tensão/frequência imposta; regulação de velocidade em malha aberta ou com compensação de escorregamento (programável).
- **VVW:** Voltage Vector WEG; controle estático de velocidade mais preciso que o V/f; realiza um ajuste automático às variações de rede, e também as alterações de carga, porém com resposta dinâmica não muito rápida.
- **Vetorial sensorless:** controle orientado pelo campo; sem sensor de velocidade no motor; apto para acionar motor padrão; controle de velocidade na faixa de 1:100; precisão estática de 0.5 (%) da velocidade nominal; controle dinâmico.
- **Vetorial com encoder:** necessita encoder no motor e módulo de interface para encoder no inversor (ENC1 ou ENC2); controle da velocidade até 0 rpm; precisão estática de 0.01 (%) da velocidade nominal; alta performance estática e dinâmica do controle de velocidade e torque.
- **Vetorial com encoder para motor PMSM:** necessita de *encoder* incremental no motor e do módulo de interface para o encoder no inversor (ENC1, ENC2 ou PLC11).
- **Vetorial sensorless para motor PMSM:** sem sensor de velocidade no motor; controle de velocidade na faixa 1:100.

A seguir são apresentadas algumas diferenças e características dos tipos de controle encontrados no inversor de frequência WEG CFW-11, citados acima.

Vale ressaltar também que para todas as estratégias os dados do motor requeridos para seu bom funcionamento são conhecidos e ajustados nos parâmetros correspondentes do inversor, permitindo que sejam realizados corretamente os cálculos e as transformações.

### 2.3.3.1 Controle Escalar

Trata-se de um controle simples baseado em uma curva V/F constante que relaciona a frequência e a tensão de saída. O inversor funciona como uma fonte de tensão gerando valores de frequência e tensão de acordo com esta curva. É possível o ajuste desta curva, para motores padrão 50 Hz ou 60 Hz ou especiais, através da curva V/f ajustável.

Por se tratar de um controle simplificado, apesar de não ser tão preciso, tem as vantagens de ser rápido e simples, necessitar de pouco ajuste de parâmetros, sendo que do padrão de fábrica não é preciso ajustar quase nada. Também sendo recomendado para as seguintes aplicações:

- Acionamento de vários motores com o mesmo inversor (acionamento multimotor);
- Corrente nominal do motor é menor que 1/3 da corrente nominal do inversor;
- Para propósito de testes, o inversor é ligado sem motor ou com um motor pequeno sem carga.

Graficamente é possível perceber no diagrama da “Fig.(12)” o fluxo de sinais para ajuste do controle, sendo possível, a partir dos valores de corrente de saída  $I_s$ , ajustar alguns parâmetros do inversor para que a velocidade e frequência se comportem da maneira esperada.

### 2.3.3.2 Controle VVW

O modo de controle VVW (Voltage Vector WEG) está entre o controle escalar de velocidade e frequência e o controle vetorial *sensorless* (sem sensor externo). O diagrama da “Fig.(13)” permite observar a maior robustez neste método na hora de calcular as variáveis de controle.

A principal vantagem em relação à estratégia escalar é a melhor regulação de velocidade com maior capacidade de torque em baixas rotações, como em frequências inferiores a 5 Hz, permitindo uma melhora no desempenho do acionamento em regime permanente, tornando o mais sensível. Com relação ao controle vetorial *sensorless* tem-se uma maior simplicidade e facilidade de ajuste.

O controle VVW utiliza a medição da corrente estatórica  $I_0$ , o valor da resistência estatórica, que são lidas a partir de parâmetros específicos, e os dados de placa do motor

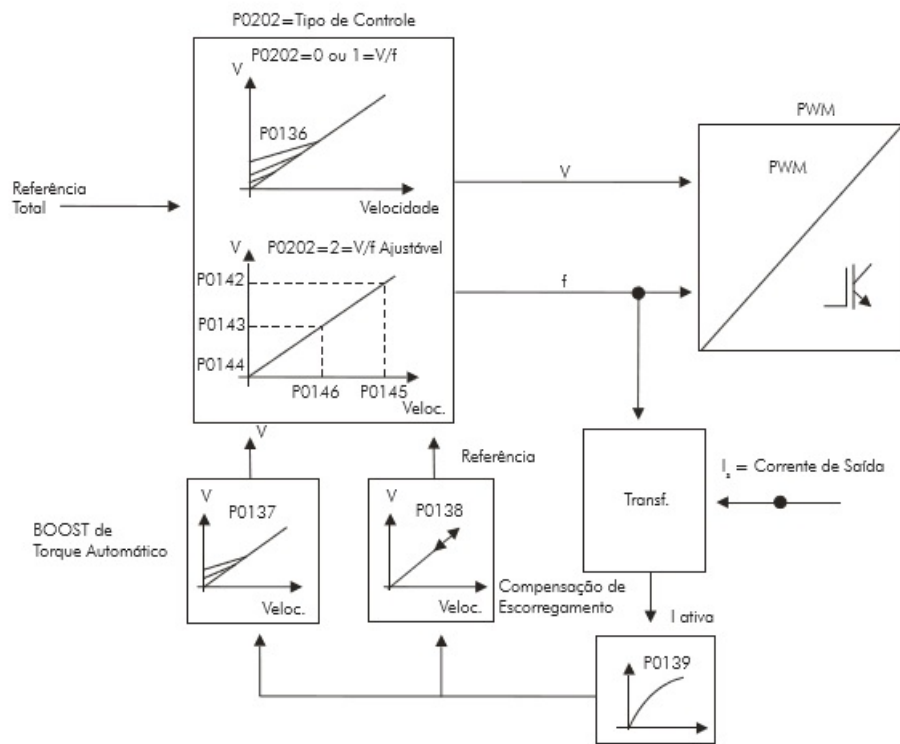


Figura 12 – Diagrama de Controle V/F (CONTROLS, 2012)

de indução para fazer automaticamente a estimação de torque, a compensação da tensão de saída e, conseqüentemente, a compensação do escorregamento.

### 2.3.3.3 Controle Vetorial

O controle Vetorial apesar de ser mais complexo é mais preciso e conseqüentemente mais eficiente para aplicações que requerem maior certeza nos resultados. Fazendo a separação da corrente do motor em duas componentes, vetores, é possível obter-se o chamado desacoplamento que permite controlar o fluxo e torque do motor de forma independente. Sendo as duas componentes da corrente,  $I_d$  a corrente direta e  $I_q$  a corrente de quadratura.

Em resumo, esta estratégia mede as correntes, as separa em componentes e as transforma para o referencial estático, facilitando o controle, permitindo uma realimentação negativa de corrente. Utiliza dos valores desejados para na malha fechada de controle comparar os valores reais para ajuste da saída.

Ambos, sem sensor e com encoder são tipos de controle mais robustos e são recomendados para a maioria das aplicações, pois permitem alta precisão no controle da velocidade, torque de partida e apresentam uma resposta rápida ao sistema. Apresentam maior resistência quanto à variações súbitas da rede de alimentação evitando desligamentos desnecessários por algum tipo de falha.

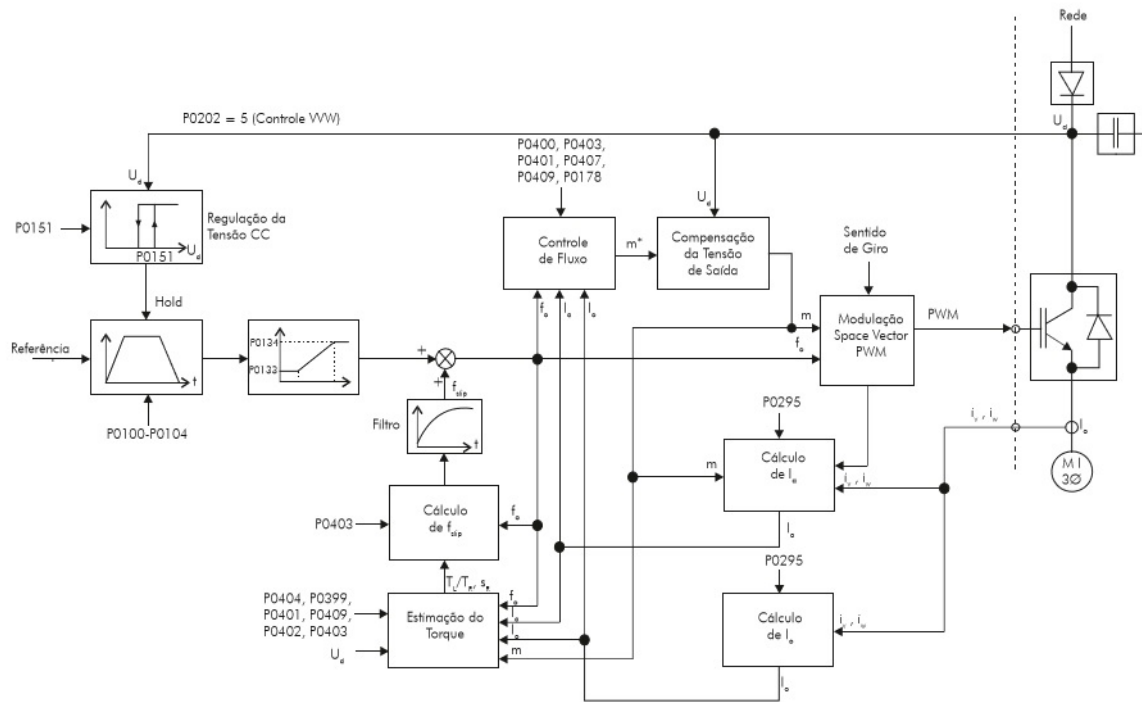


Figura 13 – Diagrama de Controle VVW (CONTROLS, 2012)

Sem sensor a precisão é de 0.5(%) e possui um algoritmo que estima a velocidade, enquanto com o encoder cai para 0.01(%) que também permite o controle de torque a zero rotações por minuto e os valores de velocidade são medidos diretamente pelo encoder. Para uso desta segunda opção é necessário acessório externo para interface com encoder ENC-01.

Neste controle as variáveis que podem ser manipulados são a corrente de torque ( de magnetização) e a corrente de excitação. Característico por ser de malha fechada e se ajustar através da velocidade medida e outros parâmetros como, ganhos integrais e proporcionais de corrente, velocidade, fluxo e saída. No ANEXO B está presente também uma lista com alguns parâmetros de função vetorial no inversor.

Na “Fig.(14)” o diagrama de fluxo de informação, de definição dos parâmetros, de cálculos e transformações podem ser observados e compreendidos, com a malha fechada e realimentação negativa para comparação do que foi enviado e o valor real.

Este tipo de controle permite o ajuste da velocidade do motor através do ajuste do torque. O inversor trabalha com referências de torque em porcentagem. Regidos por (2.9) que está relacionada à (2.10) deduzida por (WENZEL, 2007), que é nada mais que a mesma fórmula dada na (2.7) porém, com variáveis diferenciadas pela dedução.

$$T = \frac{P0401 \times P0169/100}{P0410^2 - (P0401 \times P0178/100)^2} \quad (2.9)$$

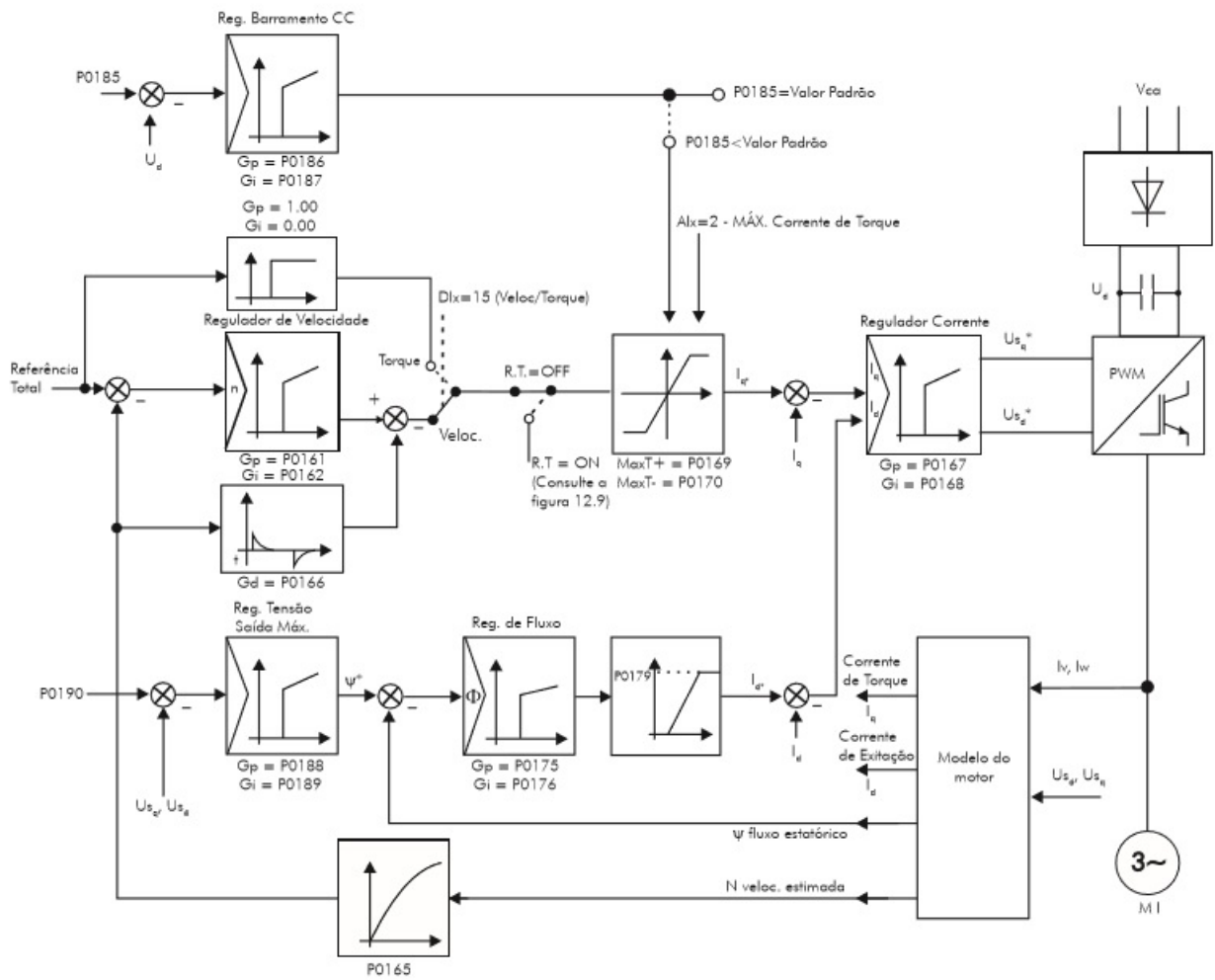


Figura 14 – Diagrama de Controle Vetorial Sem Sensor (CONTROLS, 2012)

Em que:

- $P0401$  é a corrente nominal do motor,
- $P0169$  corresponde a corrente máxima de torque,
- $P0178$  representa o fluxo nominal,

$$T = \frac{V_{th}^2 \times Re/s}{[(X_{th})^2 + (R_{th} + Re/s)^2]} \quad (2.10)$$

Com:

- $V_{th}$  a tensão equivalente de Thevenin do Circuito simplificado,
- $Re$  a resistência equivalente do circuito,

- $R_{th}$  a resistência de Thevenin,
- $X_{th}$  Impedância de Thevenin,
- $s$  o domínio da transformada de Laplace.

## 2.4 Comunicação Serial

O conceito de comunicação serial é simples. A porta serial envia e recebe bytes de informação de um bit de cada vez. Isto é, mais lenta do que a comunicação em paralelo, o que permite a transmissão de um byte todo de uma só vez; No entanto, é mais simples e pode ser utilizada ao longo de distâncias mais longas. Por exemplo, as especificações IEEE 488 para o tipo de comunicação paralela que o cabeamento entre o equipamento pode ser não mais do que 20 metros totais, não mais que 2 metros entre dois dispositivos; de série pode estender-se a um total aproximado de 1200 metros. (ENGINEERS, 2016) As características de comunicação serial mais importantes são: taxa de transmissão, bits de dados, bits de parada e paridade definidas em (ENGINEERS, 2016) :

### Características:

- **Taxa de transmissão** é uma medição de velocidade para a comunicação. Ela indica o número de bits transferidos por segundo. Por exemplo, 300 de transmissão é de 300 bits por segundo. Quando nos referimos a um ciclo de relógio, no contexto da serial, significa a velocidade de transmissão. Por exemplo, se o protocolo exige uma taxa de transmissão de 4800, então, o relógio funciona a 4800bps. Isto significa que a porta serial tem amostragem da linha de dados a 4800 Hz.
- **Os bits de dados** são uma medida dos bits reais de uma transmissão. Quando o computador envia um pacote de informações, a quantidade de dados reais podem não ser um total de 8 bits. Os valores padrão para os pacotes de dados são 5, 7 e 8 bits. O ajuste escolhido depende da informação que você está transferindo. Por exemplo, ASCII padrão tem valores entre 0 e 127 (7 bits). ASCII estendido usa 0 a 255 (8 bits). Se os dados que estão sendo transferidos é de texto simples (ASCII padrão), então o envio de 7 bits de dados por pacote é suficiente para a comunicação. Um pacote refere-se a uma única transferência de bytes, incluindo start / stop bits, bits de dados e paridade. Uma vez que o número real de bits depende do protocolo selecionado, o termo pacote é usado para cobrir todos os casos.
- **Bits de parada** são usados para sinalizar o fim da comunicação para um único pacote. Os valores típicos são 1, 1,5 e 2 bits. Estes dados são cronometrados



através das linhas e cada dispositivo tem o seu próprio relógio, é possível que os dois dispositivos fiquem um pouco fora de sincronia. Portanto, os bits de parada não apenas indicam o fim da transmissão, mas também dão os computadores alguma margem de erro nas velocidades de relógio. O quanto mais bits são usados para bits de parada, quanto maior é a condescendência em sincronizar os relógios diferentes, porém, mais lenta a taxa de transmissão de dados.

- **A paridade** é uma forma simples de verificação de erro que é usado na comunicação serial. Existem quatro tipos de Paridade: par, ímpar, marcados, e espaçadas. A opção de utilizar sem paridade está também disponível. Para paridade par e ímpar, a porta série irá definir o bit de paridade (o último bit após os bits de dados) a um valor para assegurar que a transmissão tem um número par ou ímpar de bits de lógica alta. Por exemplo, se os dados fossem 011, em seguida, paridade par, o bit de paridade seria 0 de forma a manter o número de bits de lógica alta pares. Se a paridade fosse ímpar, então o bit de paridade seria de 1, resultando em 3 bits altos lógicos. Paridade de marcadas e espaçadas não verificam os bits de dados, mas simplesmente define o bit de paridade alto para a paridade marcada ou baixo para a paridade espaçadas. Isso permite o dispositivo de recepção saber o estado de um bit que o dispositivo determine se o ruído está corrompendo os dados.

Diversas tecnologias utilizam comunicação serial para transferência de dados, incluindo as interfaces RS232 e RS485. (LTDA., 2010)

### 2.4.1 RS-485

RS-485, é um padrão que define as características elétricas dos condutores e receptores para utilização em sistemas com comunicação serial.(STAFF, 1998)

A “Fig. (15)” mostra o módulo de comunicação comumente utilizado.

A ligação com o módulo RS-485 para USB é feita com um cabo blindado de terra comum e configuração DB-9 presente na “Fig. (16)” onde pode-se observar a distribuição física dos pinos e localizar quais são utilizados na ligação do adaptador.

Na outra ponta da comunicação está o adaptador RS-485 para USB, que tem a função de converter a configuração serial para USB, tornando assim possível a interação com computadores e conseqüentemente com o programa a ser utilizado, LabVIEW.

RS-485 somente especifica características elétricas do gerador e do receptor. Ele não especifica nem recomenda nenhum protocolo de comunicações, apenas o nível físico. Outras normas definem os protocolos de comunicação através de uma RS-485.(SOLTERO MANNY; ZHANG, 2002) Neste sentido, além da interface, é necessário identificar também

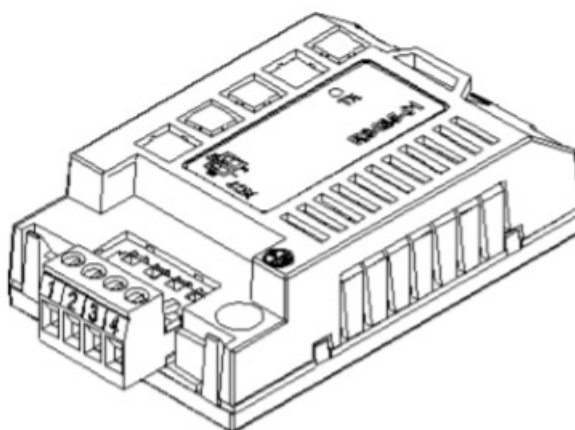


Figura 15 – Módulo de Comunicação RS-485 (LTDA., 2010)



Figura 16 – Conector DB-9 Macho (RODRIGUEZ, 2011)

o protocolo utilizado para comunicação. Dentre os diversos protocolos existentes, um protocolo muito utilizado na indústria é o protocolo Modbus-RTU. (LTDA., 2010)

#### 2.4.2 Protocolo MODBUS

(MODBUS.ORG, 2002) define MODBUS como um protocolo de mensagens de camada de aplicação, que fornece comunicação cliente / servidor entre dispositivos conectados em diferentes tipos de nós ou redes. Hoje, o suporte para a estrutura simples e elegante de MODBUS continua a crescer. MODBUS é um protocolo de serviços pedido/resposta especificados por códigos de função.

Na especificação do protocolo estão definidos dois modos de transmissão: ASCII e RTU. Os modos definem a forma como são transmitidos os bytes da mensagem. Não é possível utilizar os dois modos de transmissão na mesma rede. O inversor de frequência CFW-11 utiliza somente o modo RTU para a transmissão de telegramas. Os bytes são transmitidos no formato hexadecimal, e sua configuração depende da programação feita através do P0311, em que os P's representam os parâmetros alterados no inversor cujas

funcionalidades são alterar funções e valores do aparelho para operar da forma desejada.

O protocolo MODBUS define uma unidade de dados de protocolo simples (PDU) independente das camadas de comunicação subjacentes. O mapeamento do protocolo MODBUS em nós ou de redes específicas pode introduzir alguns campos adicionais na aplicação da unidade de dados (ADU).

A unidade de dados de aplicação MODBUS é construída pelo cliente que inicia uma transação MODBUS. A função indica ao servidor que tipo de ação a ser executada. O protocolo de aplicação MODBUS estabelece a forma de um pedido iniciado por um cliente.

O campo do código de função de uma unidade de dados MODBUS é codificado em um byte. Os códigos válidos estão no intervalo de 1 a 255 decimal (o intervalo de 128 - 255 é reservado e usado para exceções). Quando uma mensagem é enviada de um cliente para um dispositivo de servidor o campo de código de função informa ao servidor que tipo de ação a ser executada. O código de função "0" não é válido.

Códigos de Sub função são adicionados a alguns códigos de função para definir várias ações. O campo de dados de mensagens enviadas de um cliente para dispositivo servidor contém informações adicionais que o servidor usa para tomar as medidas definidas pelo código de função. Isso pode incluir itens como endereços discretos e registrar, a quantidade de itens a serem tratados e a contagem de *bytes* de dados reais no campo.

Se um erro relacionado com a função MODBUS solicitada ocorre, o campo resposta de um servidor para um cliente contém um código de exceção que o aplicativo de servidor pode usar para determinar a próxima ação a ser tomada.

Por exemplo, um cliente pode ler os estados ON/OFF de um grupo de saídas discretas ou entradas ou ele pode ler/escrever o conteúdo de um grupo de registros de dados.

Quando o servidor responde ao cliente, ele usa o campo do código de função para indicar tanto uma resposta normal (livre de erros), ou que algum tipo de erro (chamada de uma resposta de exceção). Para uma resposta normal, o servidor simplesmente ecoa ao servidor o código de função original.

Nas figuras “Fig. (17)” “Fig. (18)” é possível observar o fluxo de demanda e resposta entre o mestre-escravo (cliente-servidor) apresentado acima. Iniciando com o pedido de início pelo cliente, enviando o código da função e a informação requerida. A ação requerida é realizada pelo servidor e a resposta enviada ao cliente com a devida função e informação identificadas. Caso um erro seja encontrado pelo servidor, um código de exceção é emitido e enviado de volta ao cliente para assim tomar decisão de o que fazer em seguida.

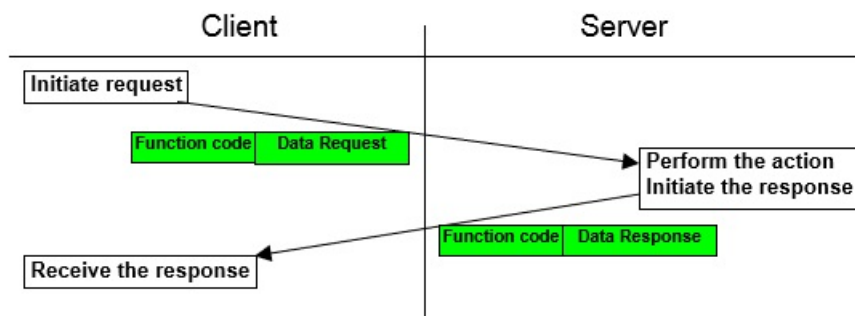


Figura 17 – Fluxo de dados sem erro (MODBUS.ORG, 2002)

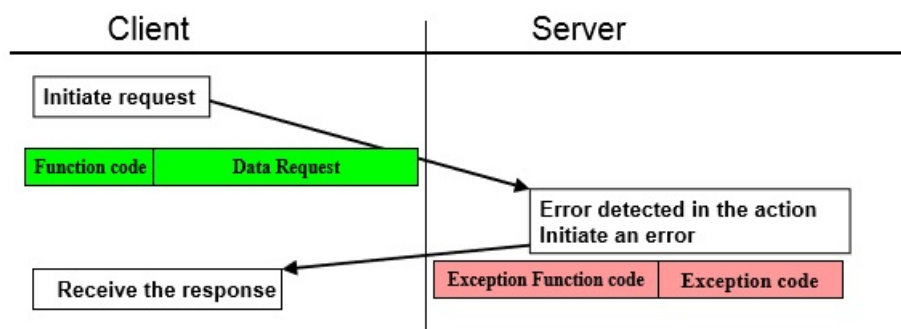


Figura 18 – Fluxo de dados com erro (MODBUS.ORG, 2002)

O tamanho da PDU MODBUS é limitado pelo tamanho restrição herdada da primeira implementação MODBUS em rede Serial Line (máx. RS485 ADU = 256 bytes).

O diagrama de estado na “Fig. (19)” descreve o processamento genérico de uma transação MODBUS no lado do servidor.(MODBUS.ORG, 2002)

Para maior conhecimento sobre o Protocolo MODBUS, mais detalhes e informações, as seguintes referências, que foram utilizadas para expor esta breve explicação, podem ser consultadas como base de estudo: (MODBUS.ORG, 2002) e (INSTRUMENTS, 2015)

### 2.4.3 LabVIEW

O LabVIEW é uma plataforma de sistema-modelo e ambiente de desenvolvimento para a linguagem de programação visual da National Instruments que possui compatibilidade com vários dispositivos de aquisição de dados e microcontroladores, utiliza determinados *Drivers* (arquivos de reconhecimento) e protocolos de comunicação para envio e recebimento de informações.

A linguagem gráfica é chamada de "G"; não deve ser confundida com o código G . Originalmente lançado para o Apple Macintosh em 1986, o LabVIEW é comumente usado

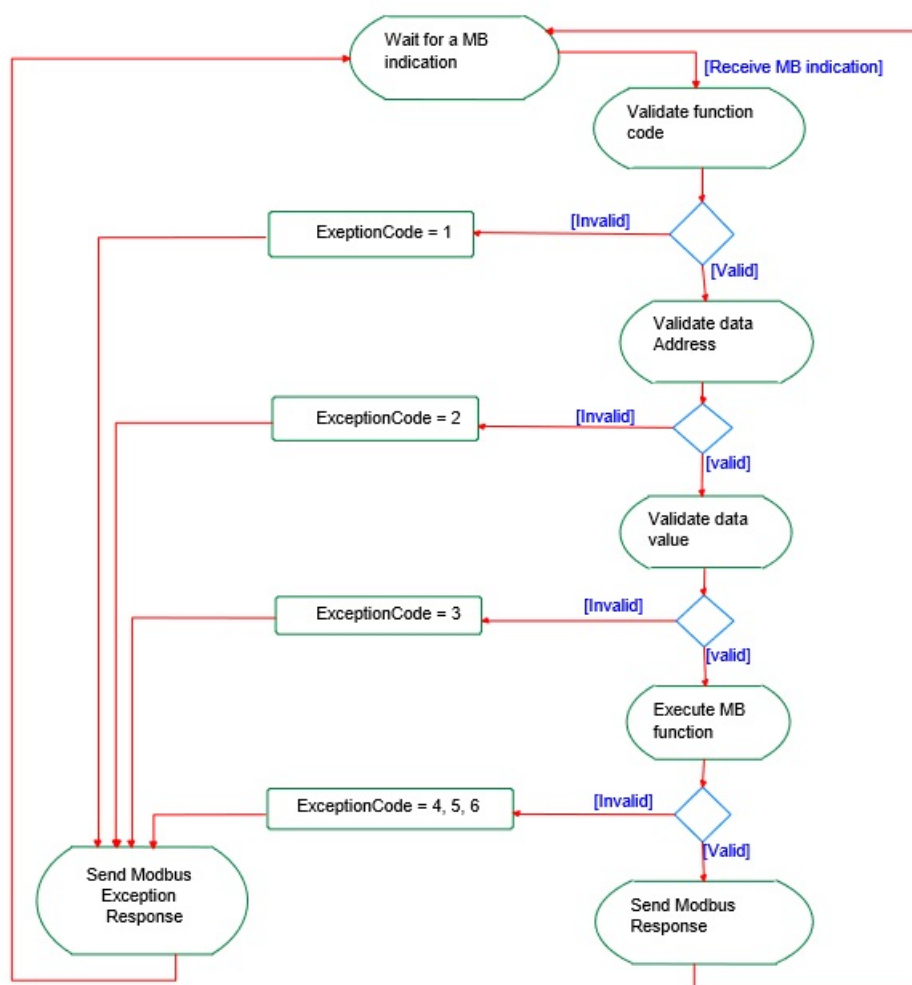


Figura 19 – Diagrama de estados (MODBUS.ORG, 2002)



Figura 20 – Logotipo do Programa LabVIEW (N.I., 2016)

para a aquisição de dados , controle de instrumento e automação industrial suportado por uma variedade de sistemas operacionais. (N.I., 2016)

A linguagem de programação utilizada no LabVIEW, denominado G, é uma linguagem de programação de fluxo de dados. A execução é determinada pela estrutura de um diagrama de blocos gráfica (o código-fonte) em que o programador conecta diferentes funções-nós desenhando fios. Estes fios propagam variáveis e qualquer nó pode executar, logo que estejam disponíveis todos os seus dados de entrada. Uma vez que este pode ser o caso de vários nós simultaneamente, G pode executar inerentemente em paralelo. Hardware de multi-processamento é explorado automaticamente pelo planejador embutido, que multiplexa vários segmentos do sistema operacional sobre os nós prontos para

execução. O instrumento virtual (VI) é o conjunto da interface gráfica e o diagrama de blocos que irá resultar no programa executável. (N.I., 2016)

LabVIEW inclui amplo suporte para interface com dispositivos, instrumentos, câmeras e outros dispositivos. Os usuários da interface de hardware tanto através de comandos de nó direto (USB, GPIB, Serial) ou usando de alto nível, específicas do dispositivo, drivers que fornecem nós de funções nativas para controlar o dispositivo. (N.I., 2016)

A biblioteca MODBUS é um conjunto livre. Há *download* de instrumentos virtuais (VIS) que fornecem comunicação Modbus de qualquer padrão Ethernet ou serial. A biblioteca Modbus para LabVIEW implementa o protocolo Modbus em software e oferece funcionalidade de mestre e escravo. (INSTRUMENTS, 2015)

Visto que os componentes disponibilizados nesta biblioteca já são intuitivos, uma explanação detalhada sobre as funções e outras propriedades do protocolo podem ser dispensadas quanto ao escopo teórico requerido nesta dissertação. Para maiores dúvidas sobre formatação ou função de determinados blocos desta biblioteca basta utilizar a aba de Ajuda do próprio Software LabVIEW. Demais informações relevantes sobre sintaxe ou outro assunto pertinente serão apresentadas mais a diante.

## Parte III

# COMPOSIÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DA BANCADA

## 3 Composição e Especificação da Bancada

Neste capítulo são apresentados os componentes da bancada experimental, algumas de suas especificações e outras informações relevantes. Sendo a maioria destes materiais já especificados no trabalho, ([SILVEIRA, 2016](#)).

### 3.1 Motor de Indução Trifásico (MIT)

Motor da fabricante WEG, tem como função reproduzir as características mecânicas da turbina eólica. Com as especificações detalhadas apresentadas na Tabela (1) abaixo:

Motor de Indução trifásico	
Marca	WEG
Linha do produto	2258/M
Frequência	60Hz
Número de polos	8
Potência	30 cv (22kW)
Rotação nominal	885 RPM
Escorregamento	1.67 %
Tensão nominal	380/660 V
Corrente nominal	45/25,9 A
Corrente à vazio	20,8/12 A
Conjugado nominal	238 Nm
Momento de inércia	0,84722 kgm <sup>2</sup>
Carga	50% / 75% / 100%
Fator de potência	0,65 / 0,76 / 0,81
Rendimento	91,7 / 91,9 / 91,7

Tabela 1 – Especificações do MIT ([SILVEIRA, 2016](#))

### 3.2 Inversor de Frequência

WEG CFW 11 é o inversor de frequência que compõe a bancada para realizar a excitação do MIT. O modelo CFW 11 é do tipo 0058 T4054Z de corrente nominal de 58,5 A, a uma tensão trifásica de alimentação de 380 V a 440 V e tensão de saída trifásica de 380 V. Tendo como referência um motor ligado no formato delta e com especificações mostradas na tabela (2) abaixo:

Abaixo a “Fig.(3.2)” que mostra o dispositivo utilizado neste projeto.



Inversor de Frequência	
Marca	WEG
Modelo	CFW 11 0058 T4054Z
Frequência de alimentação	50/60Hz
Tensão de alimentação	380-440 V
Tensão de saída	380 V
Rendimento típico	maior ou igual a 97%
Fator de potência típico	0,94

Tabela 2 – Especificações do Inversor de Frequência (SILVEIRA, 2016)



Figura 21 – Inversor de Frequência da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016)

### 3.3 Gerador Síncrono de Imãs Permanentes (PMSG)

PMSG 400 STK 2M de 800rpm é o gerador síncrono de imãs permanentes empregado nesta aplicação, pois possui inúmeras referências de utilização em centrais eólicas industriais. Com rotor vazado tem ligação direta ao eixo da turbina eólica. Para este projeto o PMSG é acoplado ao eixo do motor, que simula o torque realizado pela turbina eólica. A Tabela (3) a seguir exhibe as especificações do gerador.

Abaixo a “Fig.(22)” mostra o PMSG utilizado.

Gerador Síncrono de Imãs Permanentes	
Marca	Alxion
Modelo	400TK2M
Velocidade nominal	800 RPM
Potência nominal	17874 W
Torque nominal de entrada	234 Nm
Rendimento	92 %
Corrente nominal	42 A
Tensão nominal	253 V
Número de pares de polos	12
Resistência por fase	0,15 $\Omega$
Indutância por fase	1,24 mH
Tensão a vazio	305 V
Momento de inércia	163 $gm^2$
Peso	91,7 / 91,9 / 33Kg
Area de seção do cabo	4x10 $mm^2$
Diâmetro do cado	16,7 mm

Tabela 3 – Especificações do PMSG (SILVEIRA, 2016)



Figura 22 – Gerador PMSG da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016)

### 3.4 Conversor Back-to-Back

SKS 88F (B6CI) 2P 61 V12 é o modelo do conversor de frequência *back-to-back* fabricado pela Semikron que é ligado na saída do PMSG, tendo como intuito adequar os sinais de tensão gerados para a rede elétrica. É composto por um retificador, um barramento CC e um inversor.

A Tabela 4 apresenta as especificações e a “Fig.(23)” é a imagem do conversor

utilizado para este trabalho.

<i>Conversor Back-to-Back</i>			
Marca	Semikron		
Modelo	SKS 88F (B6CI) 2P 61V12		
Corrente Nominal ( $I_{rms}$ )	$T_{amb} = 40$	Sem sobrecarga	88 A
	$FSW = 5\text{kHz}$	150 % de sobrecarga (60 s a cada 10 min)	64 A
	$V_{out} = 500\text{ V}$ $V_{cc} = 750\text{ V}$ $\cos\Theta = 0.85$	200 % de sobrecarga (10 s a cada 10 min)	53 A
Frequência de Chaveamento Máxima ( $I_{rmsmax}$ )	20 kHz		
Tensão Máxima de Saída AC ( $V_{outmax}$ )	500 V		
Tensão Máxima do Barramento CC ( $V_{dcmax}$ )	900 V		
Tensão de Isolamento	2500 V		
Potência Total	1140 W		
Capacitância ( $C$ )	6 $\mu\text{ F}$		

Tabela 4 – Especificação do conversor de frequência *Back-to-Back* (SILVEIRA, 2016)



Figura 23 – Conversor *Back-to-Back* da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016)

### 3.5 Filtros Indutivos

A “Fig.(24)” apresenta os indutores empregados em cada fase. O emprego destes indutores permite aplicar um efeito *boost* na tensão do barramento CC. Já a Tabela 6 mostra as especificações dos indutores



Figura 24 – Filtros Indutivos da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016)

Indutores	
Empresa	Tecnotrafo
Indutância	4mH
Corrente	40 A
Tensão	220 V
Frequência	6 kHz
Núcleo	Grão Orientado (G.O)

Tabela 5 – Especificações dos Indutores (SILVEIRA, 2016)

### 3.6 Pré-Carga

Um elevado pico de corrente durante o acionamento da bancada eólica é resultado do carregamento dos capacitores do barramento CC e o uso dos filtros indutivos ligados em série, podendo danificar os aparelhos ligados neste sistema. Um circuito chaveado de resistores em paralelo com indutores é acoplado. É empregado no acionamento do sistema com a finalidade de limitar a corrente de carga dos capacitores. Quando chega ao regime permanente, as chaves da pré-carga se abrem, permitindo a operação normal da bancada eólica. A “Fig.(25)” mostra os resistores de pré-carga utilizados no projeto e localizados no quadro elétrico.



Figura 25 – Resistores de Pré-carga da Bancada Eólica (SILVEIRA, 2016)

### 3.7 Módulo RS-485

O módulo para comunicação RS485 possui um conector plug-in de 4 vias (XC7), visto à esquerda da “Fig.(15)” com a seguinte pinagem listada na Tabela 6:

Pino	Nome	Função
1	A-Line (-)	RxD/TxD negativo
2	B-Line (+)	RxD/TxD positivo
3	GND	0V isolado do circuito RS485
4	Ground	Terra (blindagem)

Tabela 6 – Pinagem do conector de 4 vias para RS485 (LTDA., 2010)

A seguir algumas características relevantes, citadas no manual (LTDA., 2010) do Inversor de Frequência utilizado:

- Item WEG: 10051957.
- Composto pelo módulo de comunicação RS485, bula de montagem e parafuso de fixação.
- Interface segue o padrão EIA-485.
- Interface isolada galvanicamente e com sinal diferencial, conferindo maior robustez contra interferência eletromagnética.
- Comprimento máximo do barramento de 1000 metros.

### 3.8 Adaptador Serial-USB

O adaptador utilizado, mostrado na “Fig. (26)” tem uma sequência de ligações para o adaptador serial DB9, expostas na Tabela 7 para comunicação de dois fios.

Pino	Nome
1	D (-)
2	D (+)
3	-
4	-
5	Ground

Tabela 7 – Pinagem do conector DB9 para o Adaptador Serial-USB (SIIG, 2015)



Figura 26 – Adaptador Serial/USB (SIIG, 2015)

Uma configuração relevante também especificada por (SIIG, 2015) é que suas chaves seletoras devem estar: a primeira ligada e a segunda desligada para definir a comunicação dois fios.

Parte IV

DESENVOLVIMENTO DO CONTROLE VIA  
LABVIEW

## 4 Desenvolvimento do Controle Vetorial

Atendendo ao objetivo de desenvolver uma interface de fácil uso para possibilitar o controle do motor de indução, este capítulo mostrará os avanços na realização deste projeto, alguns resultados já obtidos e o que se espera alcançar no futuro.

### 4.1 Procedimentos

Para se alcançar o objetivo final é preciso desenvolver uma metodologia sequencial, na qual o processo é gradativo e ditado pelos avanços experimentais que vêm logo após um aprendizado teórico.

#### 4.1.1 Configuração e Programação do Inversor de Frequência

O inversor de frequência deve ser configurado previamente para atender a aplicação em que irá ser utilizado. Para isto a instalação, energização e configuração são de extrema importância para que o mesmo funcione como esperado. As ações tomadas e listadas abaixo podem ser encontradas em ([CONTROLS, 2012](#)) e imagens mais detalhadas dos parâmetros no ANEXO B.

- As ligações elétricas entre, o inversor e a rede, e o motor e o inversor devem ser observadas e realizadas corretamente em acordo com o manual de ambos.
- Uma alimentação de 380V ou valor maior deve ser aplicada ao inversor visto que o motor a ser utilizado na bancada tem como tensão nominal 380V. Energia mínima necessária para colocar o motor em funcionamento.
- Após a parte física bem estruturada, deve-se atentar para a programação do inversor. O primeiro passo é habilitar o uso de todos os parâmetros, via HMI, através do parâmetro de senha P0000. Este parâmetro quando configurado com o valor de 5 permite o acesso, não só de leitura, do usuário a todos os parâmetros do inversor.
- Feito isto, o parâmetro P0317, responsável por realizar o *Start-up* Orientado, deve receber o valor 1 para que se inicie este processo. Para isso apresenta-se uma sequência lógica de alguns parâmetros básicos para o correto funcionamento do inversor. Como padrões básicos a serem configurados temos: linguagem, tensão da rede, tipo de controle, entre outros. Para a bancada, deve-se escolher o tipo de controle como Vetorial *Sensorless* e a aplicação como uso normal.



- Ainda no *Start-up* Orientado o P0408 deve ser configurado em 2, para que se realize um auto-ajuste sem girar o motor. Pegando assim alguns dados do motor através do envio de sinais ao mesmo. Do parâmetro P0409 a P0412 a aquisição de seus valores é através deste processo. Alguns outros dados do motor devem ser introduzidos ao sistema observando a placa fixada ou mesmo o manual do MIT.
- Alguns outros parâmetros necessários para o controle vetorial precisam ser configurados, porém, isto será via serial pela interface desenvolvida. Um último parâmetro importante é o P0160 que deve receber o valor de 1 para saturar em 10% a velocidade do motor em relação à velocidade nominal.

Para tornar possível o real controle através da comunicação serial é necessário que os parâmetros P220 e P221 sejam definidos com os valores 6 e 9, respectivamente, transferindo os comandos da HMI para uma interface serial. Os valores para este parâmetro podem ser observados também no ANEXO B.

Um diagrama de ações é apresentado na “Fig.(27)” com uma representação mais intuitiva de o que é preciso fazer para colocar o inversor em funcionamento.

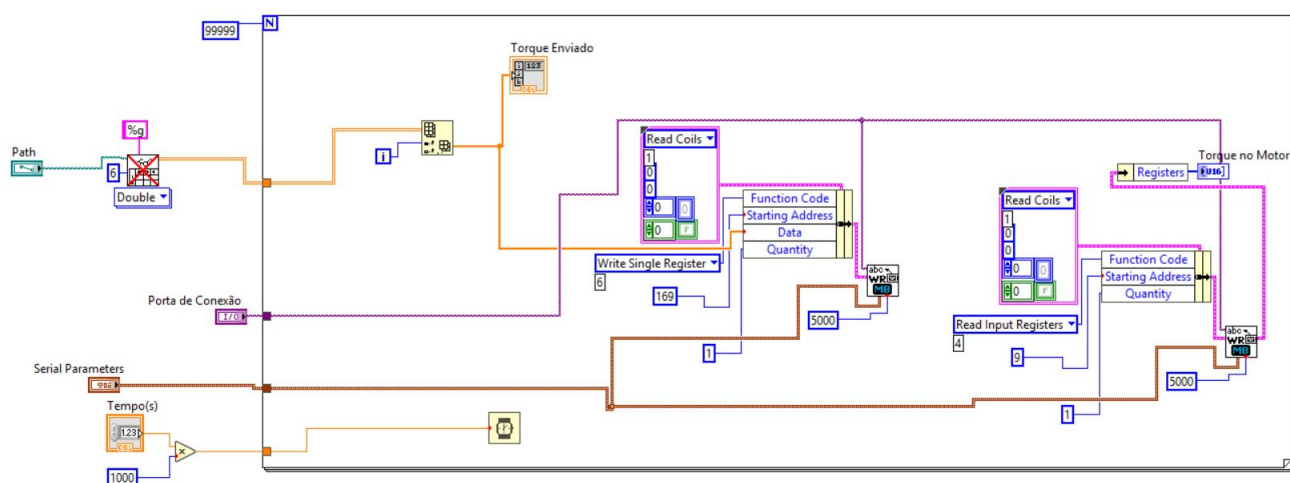


Figura 27 – Diagrama de Referências a partir de Arquivo

#### 4.1.2 Procedimentos Computacionais para Desenvolvimento da Interface LabVIEW

Uma sequência de atividades ligadas à programação são realizadas para que a plataforma de controle realize corretamente sua função. Abaixo estão alguns passos obedidos e realizados:

- Instalação do ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas NI LabVIEW 2016 com licença estudantil. *Download* direto do site da National Instruments.
- Já com o programa instalado foi necessário acessar a página web da fabricante do inversor (WEG) para adquirir, gratuitamente, os arquivos de sistema (drivers) para que o computador consiga reconhecer o dispositivo corretamente via módulo RS-485.
- Antes mesmo de usar o LabVIEW, o SuperDrive G2 12.1.0 disponível no site da WEG foi utilizado para confirmar a correta comunicação entre os dispositivos. Neste aplicativo foi possível observar o inversor conectado ao computador e então fazer a leitura e escrita de alguns parâmetros, assim como enviar referências de velocidade
- Confirmada a correta comunicação com o computador, o próximo passo é se certificar que a biblioteca MODBUS no LabVIEW consegue também se comunicar com o inversor. Para isto uma VI (Virtual Instrument), que é o diagrama de blocos e a interface que formarão o executável, de exemplo de inicialização é utilizada. A interface e diagrama de blocos apresentados no ANEXO A “Fig.(36)” e “Fig.(37)”  
. O inversor no LabVIEW é chamado de VISA (Virtual Instrument Software Architecture) que é o padrão da NI.
- Após estabelecido o bom funcionamento dos processos anteriores, a escrita e leitura de dados são o objetivo. Desenvolvendo então, com ajuda do menu Help da biblioteca MODBUS, uma VI para leitura de um parâmetro de leitura genérico e outra para escrita em um parâmetro de escrita, também genérico. Observa-se simultaneamente a atualização de valores destes parâmetros via HMI no decorrer dos testes.
- Uma VI intermediária foi utilizada para testes do envio de velocidades sequenciais. Com a leitura e escrita consolidadas, os próximos passos são referentes ao controle vetorial com envio de referências para controle do torque.
- O programa apresentado na primeira etapa tinha como referência o trabalho (XAVIER, 2012): uma sequência de referências de velocidades introduzidas ao diagrama de blocos como perfis de vento, de valores definidos e separados em 3 casos. Porém o próximo passo deste trabalho visa receber referências de torque a partir de um arquivo pré definido.
- Com a VI recebendo referências de um arquivo e enviando ao parâmetro P0169, o controle do torque do MIT pode ser realizado. Com a interface apresentada em “Fig.(28)”

### 4.1.3 Desenvolvimento LabVIEW

A biblioteca MODBUS é acompanhada por vários exemplos e algumas VIs já prontas, com todo o cálculo e a lógica para realizar a comunicação entre o servo e o mestre de forma correta. A VI base para desenvolvimento deste trabalho tem seu exemplo no ANEXO C “Fig.(44)” e “.

A VI MB *Master Serial Query* é a base para o funcionamento. Com seus componentes auxiliares que definem a função a ser executada, o endereço (parâmetro), o valor a ser introduzido no parâmetro, quantidade de parâmetros, entre outras propriedades deste protocolo não apresentadas, como, erro de entrada, erro de saída.

Esta VI já pronta, possui seus blocos lógicos para leitura, escrita e decodificação dos dados a serem enviados e recebidos. Alguns destes blocos dependem também de outras VIs para funcionar.

A porta em que está conectada o inversor, o parâmetro de comunicação, RTU (*Remote Terminal Unit*) ou ASCII são informações necessárias e recebidas do usuário. Com isso, a conexão é estabilizada e todo o controle pode ser realizado de forma remota, pelo computador. Sendo definidos pela Porta de Conexão e os Parâmetros Seriais. Após a definição da máquina que irá ser definitivamente acoplada à bancada, estes blocos podem ser configurados no diagrama e retirados da interface do programa.

O ponto em que se espera alcançar é o controle vetorial do M.I.T., realizando o controle do torque ao enviar referências recebidas a partir de um arquivo pré definido e com espaçamento temporal determinado pelo usuário.

Então após uma correta configuração do inversor de frequência, alguns parâmetros essenciais para a comunicação e controle do mesmo através da porta serial são introduzidos no programa desenvolvido. Assim como uma lógica para receber referências de torque de um arquivo. Também é importante ressaltar que o tempo de duração de cada valor enviado pode ser alterado pelo usuário.

Estes parâmetros de configuração, alguns com redundância, visto que já foram configurados anteriormente, são introduzidos juntamente com outros importantes para o controle vetorial e para ajustar o funcionamento do inversor à aplicação. Sendo alguns destes parâmetros apresentados na interface, para poderem ser alterados junto ao bloco de recebimento das referências de torque.

O diagrama de recebimento de dados de um arquivo é composto por um caminho, que é a definição da localização e reconhecimento do arquivo, que deve estar no formato (.csv) que é um arquivo de tabela com decimais separados por vírgula. Também por uma conversão de variável para tornar possível que o módulo MODBUS leia o valor que se

deseja executar. O tempo de execução de cada referência é definido pelo usuário.

Quanto à leitura, apesar de o sistema não possuir um *encoder*, o controle é de malha fechada. Então, alguns blocos de leitura de parâmetros relevantes estão presentes também na interface.

O torque enviado é recebido pelo parâmetro P169 que define a corrente máxima de torque, para o sentido horário. Caso seja escolhido o sentido anti-horário o parâmetro utilizado é o P170.

Como redundância de segurança, um botão adicional permite parar ou girar o motor, alterando o modo de magnetização, definido pelo parâmetro P0181. Também como segurança o parâmetro P0313 foi configurado com o valor 2, que indica ao inversor desabilitar todas as funções, caso haja erro na comunicação.

LEDs indicando funcionamento e estado de comunicação também são apresentados na interface.

Interessante para esta aplicação e adicionada ao diagrama, a Curva S é um artifício utilizado para suavizar as curvas de subida e descida de velocidade do motor. Esse parâmetro permite que as rampas de aceleração e desaceleração tenham um perfil não-linear, similar a um "s" (CONTROLS, 2012).

Importante também para poder controlar o motor de forma correta e remota, foi a adição de um botão responsável por girar e parar o M.I.T. Este e outros pontos apresentados são observados na interface “Fig.(28)” abaixo.

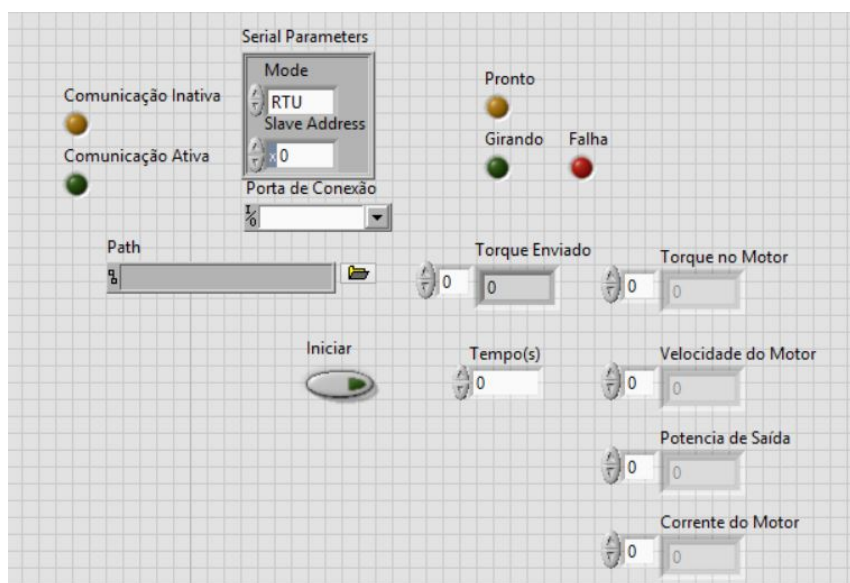


Figura 28 – Interface de Controle Vetorial

Ainda a se tratar da configuração de parâmetros importantes, uma V.I auxiliar foi

desenvolvida, caso se suspeite de alguma alteração no inversor. A qual pode ser executada antes de executar o programa de controle. Com interface simples e intuitiva, que pode ser utilizada para ajustar algo caso se acha necessário. Mostrada na “Fig.(29)”

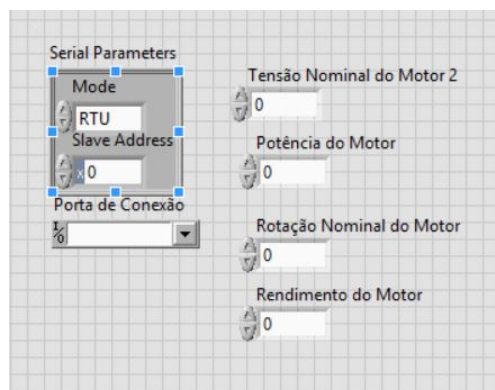


Figura 29 – Interface para Configuração Auxiliar

O diagrama de recebimento de dados de um arquivo é composto por um caminho, que é a definição da localização e reconhecimento do arquivo, que deve estar no formato (.csv) que é nada mais que um arquivo de tabela com decimais separados por virgula. Também por uma conversão de variável para tornar possível que o módulo MODBUS leia o valor que se deseja executar. Por fim o bloco de leitura de torque direto do motor foi adicionado, o parâmetro P0009, responsável pela exibição deste valor. Outros parâmetros de leitura foram adicionados para maior conhecimento da variação de parâmetros no momento do teste.

É possível transformar estes diagramas em um programa executável, visando facilitar o uso.

Por fim, um ponto interessante que não foi citado, é que nos diagramas de configuração, poderia se utilizar somente um bloco MODBUS em *loop* e os valores dos parâmetros, assim como os valores de entrada ou leitura, em um vetor de posições equivalentes. Um problema que poderia ser enfrentado seria a não equivalência entre os parâmetros e os valores a serem configurados. Então de forma didática e segura, optou-se por enviar diferentes configurações com seus respectivos blocos. O diagrama de bloco da V.I de configuração e de interface podem ser observados no APÊNDICE A.

No APÊNDICE B está detalhada a função e importância de cada parâmetro utilizado, os de configuração e os de leitura. Assim como a sequência de execução do programa.

## 4.2 Resultados Obtidos

Vários testes foram realizados via comunicação Serial.

No início foi preciso uma reorganização dos fios que ligavam o adaptador DB9 pois estavam em ordem errônea para enviar e receber os dados corretamente. Após isto e a correta configuração do computador, o *SuperDrive* conseguiu receber corretamente os dados presentes no inversor e escrever outros dados.

Com esta comunicação consolidada os exemplos da biblioteca MODBUS foram utilizados e dados foram enviados e recebidos com sucesso.

Por a bancada não estar em funcionamento no LQEE (Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica), não se realizaram testes na mesma. Porém, com a ajuda do técnico Carlos do laboratório de Conversão de Energia, foi possível realizar testes com um outro motor.

Com auxílio do *SuperDrive* os parâmetros tomados pela Auto-Estimativa foram corretamente observados e apresentados na “Fig.(30)” . São estes valores de parâmetros físicos do motor.

84	Conf. F/A Sensor 4	0	7	130	130	1: Falha/AL/Cabo	1: Falha/AL/Cabo		
85	Temper. F/A Sensor 4	-20	200	130	130			PC	
86	Tipo do Sensor PTC5	0	1	1	1	1: PTC Triplo	1: PTC Triplo		
87	Conf. F/A Sensor 5	0	7	130	130	1: Falha/AL/Cabo	1: Falha/AL/Cabo		
88	Temper. F/A Sensor 5	-20	200	130	130			PC	
89	Temperatura Sensor 1	-20	200	0	0			PC	
90	Temperatura Sensor 2	-20	200	0	0			PC	
91	Temperatura Sensor 3	-20	200	0	0			PC	
92	Temperatura Sensor 4	-20	200	0	0			PC	
93	Temperatura Sensor 5	-20	200	0	0			PC	
94	Temperatura Sensor 1	-20	200	0	0			PC	
95	Temperatura Sensor 2	-20	200	0	0			PC	
96	Temperatura Sensor 3	-20	200	0	0			PC	
97	Temperatura Sensor 4	-20	200	0	0			PC	
98	Temperatura Sensor 5	-20	200	0	0			PC	
99	Compens. Escor.Regem.	0	1	1	1	1: Ativa	1: Ativa		
100	Fator Serviço Motor	1	1.5	1	1				
101	Rendimento Nom. Motor	50	99.9	67	71	%			Alterado
102	Tensão Nominal Motor	0	690	440	380	V			Alterado
103	Corrente Nom. Motor	0	76.1	58.5	1.3	A			Alterado
104	Rotação Nom. Motor	0	18000	1750	3400	rpm			Alterado
105	Freqüência Nom. Motor	0	300	60	60	Hz			
106	Potência Nom. Motor	0	58	4: 1.5 CV	2: 0.75 CV				Alterado
107	Número Pulsos Encoder	100	9999	1024	1024	ppr			
108	Ventilação do Motor	0	3	0: Autoventilado	0: Autoventilado				
109	Fator Pot. Nom. Motor	0.5	0.99	0.68	0.55				Alterado
110	Resistência Estator	0	9.999	0	9.987	ohm			Alterado
111	Corrente Magnetização	0	73.1	19.3	0	A			Alterado
112	Indutância Dispersão	0	99.99	0	0	mH			Alterado
113	Constante Tr	0	9.999	0	0.051	s			Alterado
114	Constante Tm	0	99.99	0	0.04	s			Alterado
115	Número de Pólos	2	24	6	32639				Alterado
116	Indutância Lq	0	100	0	0	mH			
117	Indutância Ld	0	100	0	0	mH			
118	Constante Ke	0	400	100	100				
119	Ganho Prop. Iq	0	1.99	0.8	0.8				
120	Ganho Integral Iq	0	1.999	0.005	0.08				Alterado
121	Ganho Prop. Id	0	1.99	0.3	0.3				
122	Ganho Integral Id	0	1.999	0.005	0.005				
123	Ganho Proporc. PID	0	7.999	1	1				
124	Ganho Integral PID	0	7.999	0.043	65.407				Alterado
125	Ganho Diferencial PID	0	3.499	0	0				
126	Tempo de Rampa do PID	0	999	3	3	s			
127	Sel. Realimentação PID	0	3	1: AIZ (P0236)	1: AIZ (P0236)				
128	Seiboint PID pelo HMI	0	100	0	0	%			
129	Tipo de Ação PID	0	1	0: Direto	0: Direto				
130	Fator de Escala VP	1	9999	1000	255				Alterado
131	Forma de Indicação VP	0	3	1: wxy.z	1: wxy.z				
132	Unidade Eng. VP 1	32	127	37	37				
133	Unidade Eng. VP 2	32	127	32	32				
134	Unidade Eng. VP 3	32	127	32	32				

Figura 30 – Parâmetros Obtidos pela Auto-Estimativa

Primeiramente em funcionamento a modo de controle escalar, obteve-se sucesso. Enviando referências de velocidade, ao invés de torque, utilizando da curva S para suavizar as mudanças de velocidade e aplicando a frenagem ótima.

A interface LabVIEW em funcionamento é apresentada na “Fig.(31)”

Um dos erros observados nos testes foi o de instabilidade na conexão entre o computador e o inversor. Quanto menor a rotação do inversor, mais difícil estabelecer a conexão. Este problema foi observado no início dos testes e após um tempo se estabilizou.

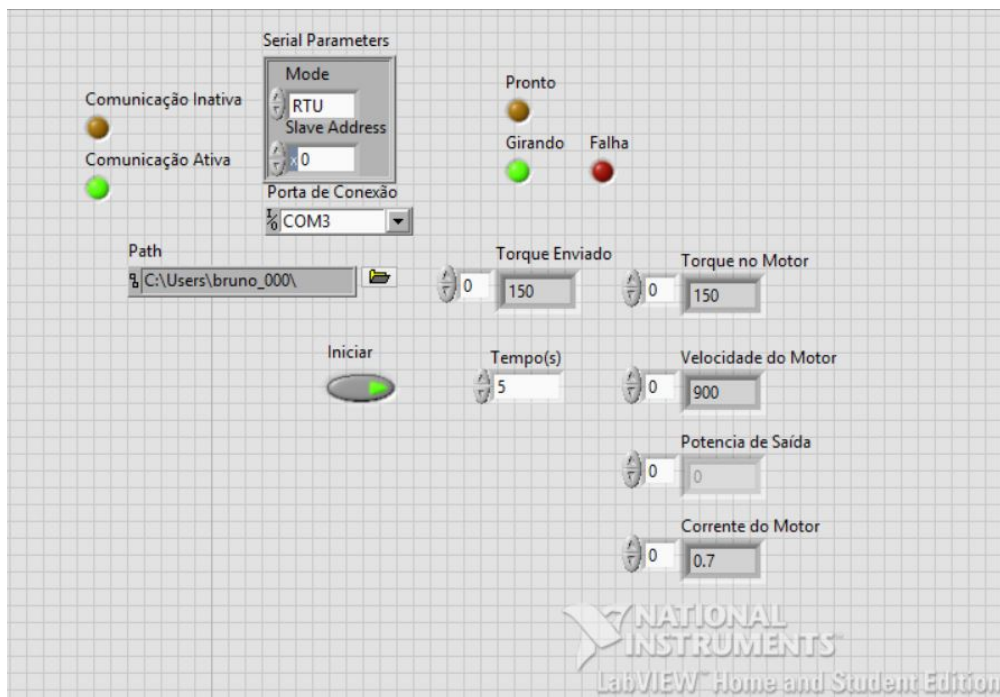


Figura 31 – Interface em Funcionamento

Porém nos últimos testes voltaram a se repetir. Tal pode ser observado na “Fig.(32)”

```
6/27/17 1:46:26 PM : Conexão com o drive perdida
6/27/17 1:46:27 PM : Conexão com o drive reestabelecida
6/27/17 1:46:27 PM : Conexão com o drive perdida
6/27/17 1:46:28 PM : Conexão com o drive reestabelecida
6/27/17 1:46:28 PM : Conexão com o drive perdida
```

Figura 32 – Erro de Conexão

Quanto ao controle vetorial, houve alguma incompatibilidade de parâmetros que não permitiu o inversor operar em tal configuração. Ao entrar no modo de configuração, o mesmo não permite voltar ao modo de operação caso algum parâmetro esteja interferindo no funcionamento de outros.

A “Fig.(33)” mostra a linha do manual em que corresponde ao provável erro. Apesar de estes parâmetros estarem corretamente configurados e terem sido revisados, ainda assim não foi possível operar em controle vetorial.

35) P0202 programado para 3 (Sensorless) ou 4 (Encoder) e P0297 = 0 (1.25 kHz).

Figura 33 – Provável Erro

Parte V

CONCLUSÃO



## 5 Conclusão

O desenvolvimento de um software para controle de motores de indução trifásicos é sempre atual e encontra relevância em diversas aplicações, principalmente para bancadas em laboratório, seja para estudo, desenvolvimento ou pesquisa.

No trabalho em apreço, o desenvolvimento foi em função de mapear e permitir a análise quantitativa e qualitativa da produção de energia gerada a partir de uma turbina eólica em um espaço reduzido, algo que ajuda a compreender o funcionamento de tal dispositivo, através de outro, mais compacto e acessível.

Para alcançar o objetivo final, a escolha recaiu em começar com a verificação da comunicação, testes a controle escalar para só então avançar e realizar o controle vetorial do motor via serial. No início algumas interferências acarretaram a instabilidade da comunicação impossibilitando o avanço.

Após alguns ajustes este problema foi resolvido, o que possibilitou o envio de referências de velocidade e leitura de parâmetros do motor.

Assim, uma parte significativa do desenvolvimento necessário para chegar ao objetivo final foi consolidada, passando então para o último passo que era a configuração do inversor para controle vetorial, porém, por uma incompatibilidade de parâmetros, que não pôde ser identificada, o inversor não permitiu que se trabalhasse no regime de controle vetorial.

No início do trabalho, não havia ainda a bancada de testes pronta nem a disponibilidade de um motor para uso no experimento, dessa forma, só era possível observar a comunicação e o envio de referências, não era possível aferir o funcionamento do sistema completo.

Foi possível realizar alguns testes no laboratório de conversão de energia. Nestes testes observou-se o correto envio de velocidade para o motor, assim como o uso da curva S e da frenagem ótima, porém, uma instabilidade na conexão não permitiu a retirada de gráficos.

Na busca de conhecimento para solucionar a problemática proposta, uma vasta literatura estava a disposição. Primeiro deve-se ressaltar que este trabalho é uma das atividades propostas para continuação do trabalho do (SILVEIRA, 2016). Outros trabalhos consultados contribuíram bastante para se alcançara melhor solução. No arcabouço teórico, livros sobre motores e sobre controle foram de grande valia para a pesquisa. Manuais do inversor de frequência da WEG e a assistência técnica da empresa foram muito úteis para solucionar impasses encontrados no caminho. Ainda falando da WEG, o software

*SuperDrive* possibilitou verificações de grande ajuda e o início do controle do motor. Por fim quanto à parte de programação, a página *web* da *National Instruments* possibilitou a instalação dos *drivers* e programas necessários, assim como ajudou na programação de alguns blocos importantes.

Uma maior disponibilidade para trabalhar na bancada, onde será instalado este sistema é essencial para uma excelência na continuidade do trabalho. É possível afirmar que, partindo da união do acompanhamento especializado e considerável conhecimento do dispositivo com que se está trabalhando, toda problemática imposta deverá ser solucionada de forma mais factível.

Também, há a possibilidade de melhorar a interface desenvolvida incluindo outros parâmetros de leitura que sejam relevantes, com a adequação da configuração, com vistas a melhorar o desempenho do inversor no dispor da sua função.

Este trabalho possibilitou o efetivo controle de um motor de indução trifásico, acoplado a um gerador em bancada, localizada no laboratório de qualidade de energia da Universidade de Brasília. Este equipamento permitirá aos alunos e professores realizarem testes para análise da qualidade de energia produzida em turbinas eólicas quanto às mudanças da velocidade do vento. Além disso, será possível, para os usuários, diversas análises e estudos que poderão ser introduzidos e realizados via este sistema, não só quanto à produção de energia mas sobre todo o sistema mecânico e elétrico que estão disponíveis no mesmo.

## 5.1 Atividades Futuras

- Corrigir a incompatibilidade de parâmetros para realizar controle vetorial;
- Buscar a melhor forma de disponibilizar as referências de torque para envio;
- Melhorar a interface desenvolvida para melhor atender a aplicação;
- Definir o tempo de teste e realizar testes controlando o motor da bancada.

# Referências

- ANDRADE, D. Partes e características de um motor de indução trifásico. São João del Rei - MG, 2014. Disponível em: <<http://zondatec.blogspot.com.br/2014/04/caracteristicas-do-motor-de-inducao.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 27.
- BRASIL, B. Como o nordeste virou principal polo da energia eólica no brasil. 2015. Disponível em: <<http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/4092-como-o-nordeste-virou-principal-polo-da-energia-e%25C3%25B3lica-no-brasil.html>>. Citado na página 18.
- CAPELLI, A. *Inversores de Frequência*. 2. ed. São Paulo: Editora Saber, 2002. Citado na página 32.
- CARVALHO, P. *Geração Eólica*. Imprensa Universitária, Fortaleza, CE, 2003. Citado na página 19.
- CASTRO, A. C. de. Motor de indução trifásico (mit). CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DA BAHIA. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/professores/castro/MIT.pdf>>. Citado 4 vezes nas páginas 8, 28, 29 e 30.
- CONTROLS, W. D. . *Manual de Programação*. Jaraguá do Sul, SC, 2012. Citado 11 vezes nas páginas 8, 9, 34, 36, 37, 38, 55, 59, 73, 77 e 78.
- ENGINEERS, N. I. *RS-232, RS-422, RS-485 Serial Communication General Concepts*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/11390/en/>>. Citado na página 39.
- FITZGERALD CHARLES KINGSLEY JR., S. D. U. A. E. *Máquinas Elétricas*. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2006. 923 p. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- FTHENAKIS, V. H. C. Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2009. v. 13, p. 1465–1474. Citado na página 18.
- GUEDES, M. V. Motor de indução trifásico - seleção e aplicação. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994. Disponível em: <[http://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/MI\\_sel&aplic.pdf](http://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/MI_sel&aplic.pdf)>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 25 e 26.
- HOJE, R. I. O que é um gerador eólico? 2014. Disponível em: <<http://www.industriahoje.com.br/o-que-e-um-gerador-eolico>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 23.
- HURLEY, B. How much wind energy is there? – brian hurley – wind site evaluation ltd. Claverton Group, 2009. Disponível em: <<http://www.claverton-energy.com/how-much-wind-energy-is-there-brian-hurley-wind-site-evaluation-ltd.html>>. Citado na página 18.
- INSTRUMENTS, N. Modbus biblioteca para labview. 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview>>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.

- LTDA., W. D. . C. A. *Manual da Comunicação Serial RS232 / RS485*. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 8, 10, 40, 41 e 52.
- MASCHERONI, M. E. M. L. e. E. D. G. M. E. J. M. *Guia de Aplicação - Inversores de Frequência*. 2. ed. Jaraguá do Sul, Santa Catarina, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 24, 32 e 33.
- MODBUS.ORG. Modbus application protocol specification. In: . [S.l.: s.n.], 2002. Citado 4 vezes nas páginas 8, 41, 43 e 44.
- N.I. Labview. 2016. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview>>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 44 e 45.
- OLIVEIRA, A. de. *Energia Eólica*. [s.n.], 2012. Disponível em: <[http://www.suapesquisa.com/o\\_que\\_e/energia\\_eolica.htm](http://www.suapesquisa.com/o_que_e/energia_eolica.htm)>. Citado na página 22.
- PLATT, R. Wind power delivers too much to ignore. 2013. Citado na página 18.
- PLATT REG; FITCH-ROY, O.; GARDNER, P. Beyond the bluster why wind power is an effective technology. Institute for Public Policy Research., 2012. Citado na página 18.
- RASHID, M. H. *Power Electronics – Circuits, devices and applications*. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993. Citado 3 vezes nas páginas 8, 31 e 32.
- RASHID, P. M. H. *DEVICES, CIRCUITS, AND APPLICATIONS*. 3. ed. University of West Florida: Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier, 2011. 923 p. Citado na página 24.
- RODRIGUEZ, J. S. Cable serie con conectores db 9 hembra, para la conexion y transmision de datos entre dos pc's. 2011. Disponível em: <<https://juleninforma.wordpress.com/2011/10/02/prueba-de-desplegable-por-meses/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 41.
- ROSSI, C. P. d. O. P. H. J. Perguntas frequentes sobre energia eólica. PUC-RS, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <<http://www.pucrs.br/ce-eolica/faq.php?q=10#10>>. Citado na página 22.
- SIIG. Usb to ts-422/485 serial adapter. In: *User Manual*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 4 vezes nas páginas 8, 10, 52 e 53.
- SILVEIRA, J. P. C. Avaliação de distorções harmônicas e inter-harmônicas em um sistema de conversão de energia eólica por meio de simulações computacionais e ensaios laboratoriais. In: *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica*. Brasília - DF: [s.n.], 2016. p. 54–62. Citado 8 vezes nas páginas 8, 10, 47, 48, 49, 50, 51 e 64.
- SOLTERO MANNY; ZHANG, J. C. C. Z. K. K. C. K. T. Rs-422 and rs-485 standards overview and system configurations, application report. Dallas, Texas, 2002. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>>. Citado na página 40.
- STAFF, C. M. D. St-103: The dynamics of ac termination. California Micro Devices Corp., 1998. Citado na página 40.
- WENZEL, G. M. Projeto aerodinâmico de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal. In: *Trabalho de Conclusão de Curso*. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: [s.n.], 2007. p. 28–36. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 37.

---

XAVIER, G. L. Avaliação de desempenho da estratégia de representação laboratorial de turbinas eólicas utilizando motores de indução controlados. In: *Programa de Pós-Graduação*. Universidade Federal de Uberlândia: [s.n.], 2012. Citado na página 57.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Diagramas

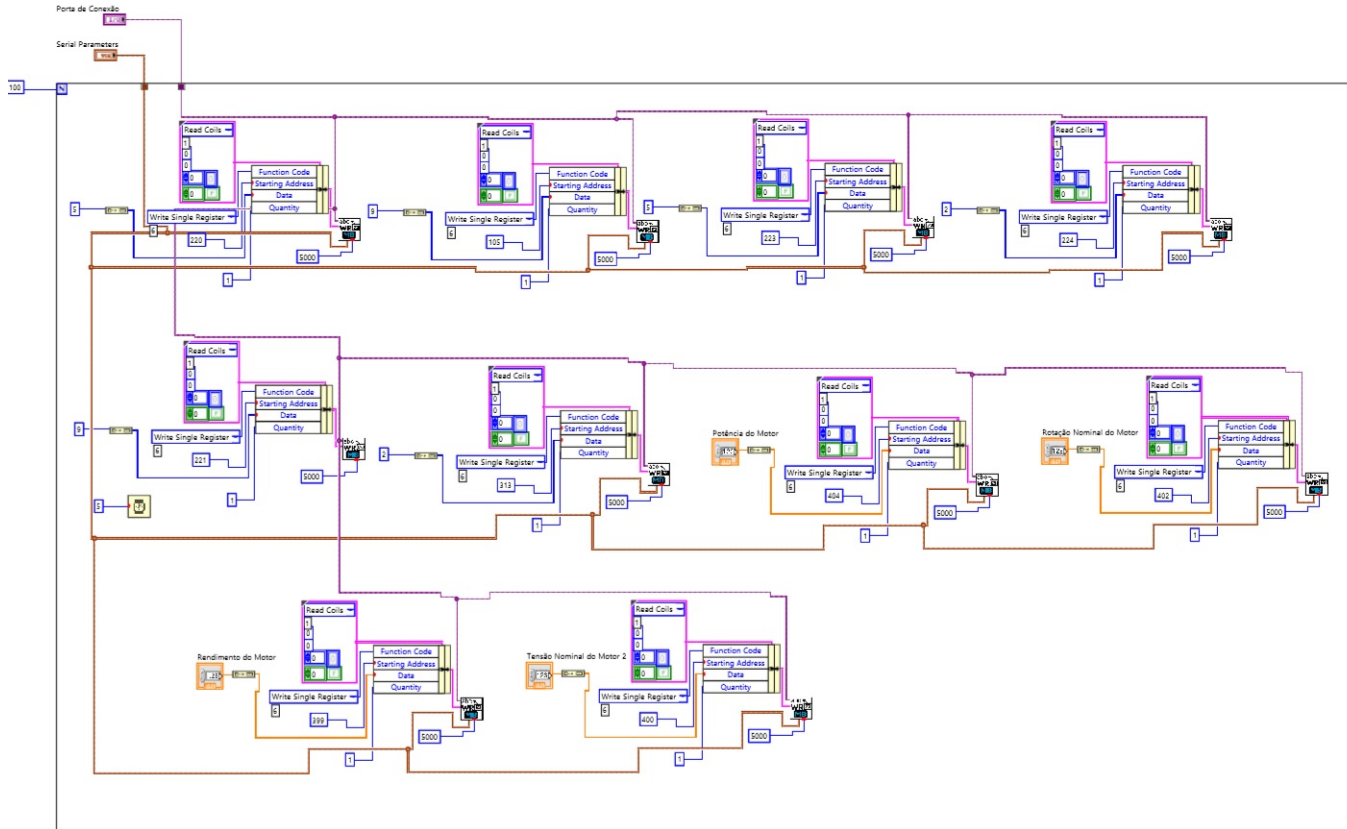


Figura 34 – Diagrama de Configuração Auxiliar

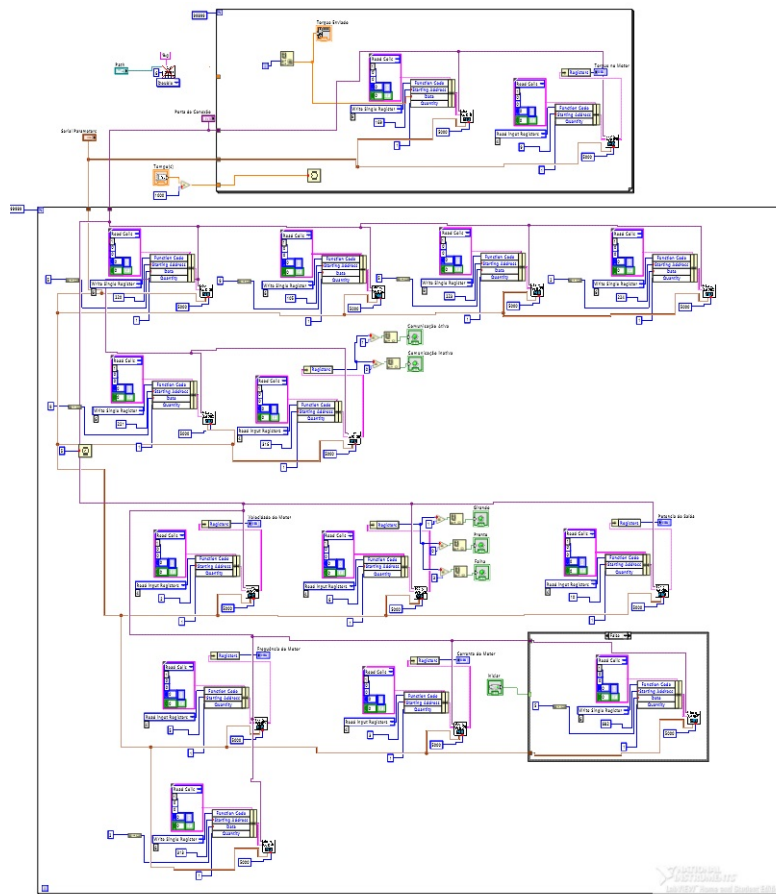


Figura 35 – Diagrama de Controle



# APÊNDICE B – Detalhamento dos Diagramas

Para melhor compreensão do funcionamento dos diagramas desenvolvidos, este tutorial é separado em duas partes. A primeira visa explicar sobre as estruturas de repetição e o porquê das escolhas que foram feitas. Para finalizar, através de tópicos, serão explanados os parâmetros do inversor utilizados, junto de sua funcionalidade na aplicação.

Nota-se que por completo, o diagrama de configuração auxiliar não requer explicação. Visto que além de ser intuitivo, não é necessário caso se realize os passos ditados no desenvolvimento deste trabalho.

## B.1 Estruturas de Repetição

O diagrama é separado em duas principais estruturas de repetição, chamadas *For*, que executa repetidamente tudo que estiver dentro do bloco N vezes. Para executar corretamente deve-se definir o valor de N, para que o programa defina quantas vezes será executado aquele bloco. Há também a possibilidade de definir a parada. Não é preciso que se obedeça todas N execuções. Um botão ou condição definida interna ou externamente pode ser ligada à parada.

Cada repetição ocorre dentro de um ciclo de comunicação entre o computador e o inversor. Com esta condição é preciso adicionar um temporizador, em milissegundos, para que se espere um determinado tempo entre uma iteração e a próxima. A primeira estrutura recebe um temporizador multiplicado por mil, para facilitar ao usuário a decisão em segundos de quanto tempo deseja que cada referência permaneça sendo executada no inversor. Já a segunda possui um atraso muito pequeno, visto que são parâmetros de configuração e de leitura. Alguns destes parâmetros não precisam ser enviados repetidamente durante toda a execução, porém, alguns testes foram percebidos que podem estar dessincronizados, inversor e computador, e resultar numa não recepção do valor do parâmetro desejado. Então, após perceber que o envio repetido não interfere em fatores relevantes, foi tomada a decisão de enviar, com menor frequência, estes parâmetros durante toda a execução da interface.

Para enviar referências de torque no caso do controle vetorial e velocidade no modo escalar, o primeiro bloco recebe valores de um arquivo .csv (valores separados por vírgula) e converte estes valores em *Double* que é um formato compatível para a estrutura

MODBUS. Estes dados entram nos bits de informação (data). A indexação do vetor recebido é realizada e junto ao envio para o inversor é acoplado também a um elemento de leitura, que mostra na interface os valores que estão sendo recebidos para que se possa comparar com os valores reais.

A porta de conexão e o parâmetro serial são definidos também pelo usuário na interface. Isto é algo temporário, pois à bancada deve ser designado um computador fixo, com isso estes parâmetros não deverão ser definidos a cada execução.

Os dois elementos presentes no primeiro bloco são para escrita e leitura de torque.

Configurações devem ser feitas para que o controle via Serial/USB seja realizado e para que o inversor se adeque ao motor e à aplicação. Estas e leitura de valores estimados do motor, como: frequência, velocidade, corrente e outros, são introduzidos na segunda estrutura. Elementos de comparação são utilizados para auxiliar na leitura de estados do inversor, algo importante para acompanhar seu funcionamento.

Uma estrutura de caso também é introduzida para permitir o controle de girar/parar o motor. Estrutura de caso, recebe um valor verdadeiro ou falso que para verdadeiro realiza uma ação e para falso outra.

## B.2 Parâmetros

As definições de todos os parâmetros apresentados abaixo estão em acordo com dados apresentados pelo fabricante em ([CONTROLS, 2012](#))

### B.2.1 Parâmetros de Leitura

P0002: Velocidade do Motor (0 a 18000rpm) - Mostra a velocidade real do motor em rpm com um filtro de 0.5s, podendo a unidade ser modificada por P0209, P0210, P0211, assim como a escala pelos P0208, P0212.

P0003: Corrente do Motor (0.0 a 4500.0 A) - Indica a corrente de saída do motor em Amperes.

P0005: Frequência do Motor (0.0 a 1020.0 Hz) - Em Hertz, apresenta o valor da frequência do motor.

P0006: Estado do Inversor (0 a 7) - O inversor possui 8 possíveis estados.

- *Ready*: O inversor está pronto para execução.
- *Run*: Indica que o inversor está habilitado.

- Subtensão: Significa que o inversor não está recebendo tensão suficiente para operar o motor.
- Falha: Inversor em estado de falha.
- Auto-Ajuste: A rotina de auto-ajuste está sendo executada.
- Configuração: Pode haver uma incompatibilidade de parâmetros ou o inversor está em rotina de *start-up* orientado.
- Frenagem CC: Para parada do motor está sendo aplicada a frenagem CC.
- STO: Parada de segurança ativada.

Alguns destes estados são utilizados na interface para indicar o que está ocorrendo no momento dos testes.

P0009: Torque no Motor (-1000.0 a 1000.0%) - Indica o torque desenvolvido no motor através de uma relação entre as correntes.

P0010: Potência de Saída (0.0 a 6553.5 kW) - Indicação da potência de saída a partir de  $P0010 = 1.732 \times P0003 \times P0007 \times P0011$ . Tal calculo é realizado automaticamente pelo inversor e o valor de saída ajustado a cada iteração.

## B.2.2 Rampas

P0104: Rampa S: (0 a 2) - Permite que as rampas de subida e descida tenham um comportamento não linear semelhante a um S. sendo 0 inativa, 1 50% e 2 100% de ajuste.

P0105: Seleção 1a/2a Rampa (0 a 7) - Define a fonte de seleção entre a primeira e segunda rampa. As duas diferenciadas pelo tempo de subida e descida definidos nos parâmetros P0100, P0101, P0102, P0103. O valor 3 define a fonte como Serial/USB

## B.2.3 Controle Vetorial

P0169: Máx. Corrente Torque positiva (0.0 a 350.0 %) - Este parâmetro limita a corrente do motor que produz torque positivo. para o caso de rotação no sentido anti-horário é utilizado o parâmetro P0170. Tal limitação ocorre em porcentagem, quanto a corrente nominal P0401.

## B.2.4 Comando local ou Remoto

P0220: Seleção Fonte LOC/REM (0 a 14) - Define quem seleciona se o inversor obedece comandos locais ou remotos. O valor 2 padrão define este comando por local. O que deve ser utilizado por segurança.

P0222: Seleção da Referência de velocidade - Situação REMOTO (0 a 14) - Define a origem para a referência de velocidade, que no caso da aplicação quando operando em controle escalar deve ser serial/USB (valor 9)

P0223: Seleção Giro LOC (0 a 16) - Na HMI é possível definir o sentido do giro do motor. Não utilizado durante a execução de testes, mas importante caso se deseje colocar o motor para girar no sentido anti-horário.

P0224: Seleção Gira/Para LOC (0 a 6) - O valor 2 define serial/USB como a fonte de seleção para giro do motor.

## B.2.5 Comunicação

P0313: Ação p/ Erro Comunic. (0 a 5) - Este parâmetro define a ação a ser tomada em caso de erro de comunicação. Por redundância na segurança é definido o valor 2 que desabilita geral.

P0316: Estado Interf. Serial (0 a 2) - Somente para leitura, são 3 os estados em que este parâmetro pode assumir para o estado de comunicação: inativo (0), ativo (1), Erro no *watchdog* (2).

P0682: Controle Serial/USB (Bit 0 a 15) - Define a palavra de envio para controle do motor. Cada Bit possui uma funcionalidade particular. Necessário para girar ou parar o motor.

Valor 1 habilita a funcionalidade agregada ao Bit e 0 desabilita.

- Bit 0: Habilita rampa.
- Bit 1: Habilita geral.
- Bit 2: Girar horário.
- Bit 3: Habilita Jog.
- Bit 4: Controle Remoto.
- Bit 5: Segunda rampa.
- Bit 6: Reservado.

- Bit 7: *Reset* de falha.
- Bit 8 a 15: Reservados.

P0683: Ref. Vel. Serial/USB (-32768 a 32767 ) - Utilizado no caso de controle escalar para enviar referências de velocidade. Para controle vetorial o P0160 deve ser adicionado à interface para saturar a referência de velocidade em 10% da nominal. A palavra escrita é em 13 Bits, com conversão:

$$Ref = \frac{vel \times 8192}{1800} \quad (B.1)$$

Onde:

- Ref: Referência em 13 Bits.
- vel: Velocidade que se deseja enviar.

# Anexos

# ANEXO A – VI de inicialização

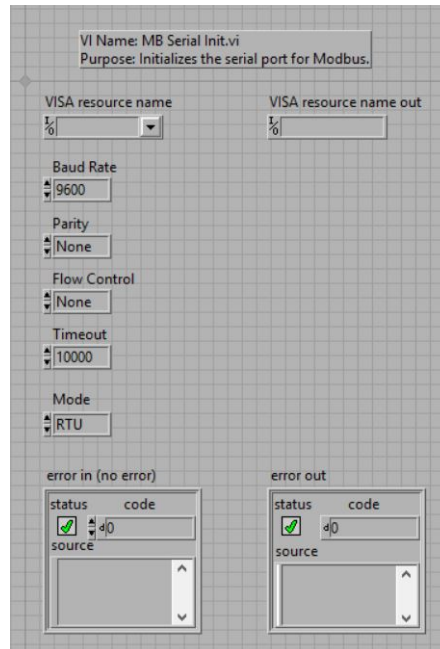


Figura 36 – Interface do Exemplo MODBUS Init.vi

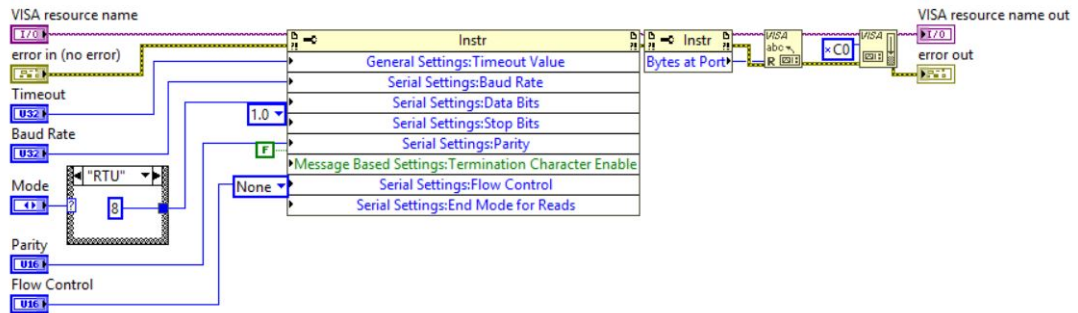


Figura 37 – Diagrama de Blocos do Exemplo MODBUS Init.vi

## ANEXO B – Parâmetros

Parâmetro	Descrição	Faixa de valores	Padrão	Ajuste do usuário	Propriedades	Grupos	Pág
P0220	Seleção Fonte LOC/REM	0 = Sempre LOC 1 = Sempre REM 2 = Tecla LR (LOC) 3 = Tecla LR (REM) 4 = DIx 5 = Serial/USB LOC 6 = Serial/USB REM 7 = Anybus-CC LOC 8 = Anybus-CC REM 9 = CO/ DN/ DP LOC 10 = CO/ DN/ DP REM 11 = SoftPLC LOC 12 = SoftPLC REM 13 = PLC11 LOC 14 = PLC11 REM	2 = Tecla LR (LOC)		CFG	31, 32, 33, 110	13-2

Figura 38 – Linha explicativa do parâmetro P0220 ([CONTROLS, 2012](#))

P0221	Sel. Referência LOC	0 = HMI 1 = AI1 2 = AI2 3 = AI3 4 = AI4 5 = Soma AIs > 0 6 = Soma AIs 7 = E.P. 8 = Multispeed 9 = Serial/USB 10 = Anybus-CC 11 = CANop/DNet/DP 12 = SoftPLC 13 = PLC11	0 = HMI		CFG	31, 36, 37, 38, 110	13-29
-------	---------------------	---	---------	--	-----	---------------------	-------

Figura 39 – Linha explicativa do parâmetro P0221 ([CONTROLS, 2012](#))

P0683	Ref. Vel. Serial/USB	-32768 a 32767		-			RO
-------	----------------------	----------------	--	---	--	--	----

Figura 40 – Linha explicativa do parâmetro P0683 ([CONTROLS, 2012](#))



<b>P0202</b>	Tipo de Controle	0 = V/f 60Hz 1 = V/f 50Hz 2 = V/f Ajustável 3 = Sensorless 4 = Encoder 5 = VVW 6 = PM com Encoder 7 = PM Sensorless	0 = V/f 60 Hz		CFG
--------------	------------------	--	---------------	--	-----

Figura 41 – Linha explicativa do parâmetro P0202 (CONTROLS, 2012)

<b>P0160</b>	Configuração Reg. Veloc.	0 = Normal 1 = Saturado	0 = Normal		CFG, PM e Vetorial	90	11-16
<b>P0161</b>	Ganho Prop. Veloc.	0.0 a 63.9	7.0		PM e Vetorial	90	11-16
<b>P0162</b>	Ganho Integral Veloc.	0.000 a 9.999	0.005		PM e Vetorial	90	11-16
<b>P0163</b>	Offset Referência LOC	-999 a 999	0		PM e Vetorial	90	11-17
<b>P0164</b>	Offset Referência REM	-999 a 999	0		PM e Vetorial	90	11-17
<b>P0165</b>	Filtro de Velocidade	0.012 a 1.000 s	0.012 s		PM e Vetorial	90	11-18
<b>P0166</b>	Ganho Difer. Veloc.	0.00 a 7.99	0.00		PM e Vetorial	90	11-18
<b>P0167</b>	Ganho Prop. Corrente	0.00 a 1.99	0.50		Vetorial	91	11-19
<b>P0168</b>	Ganho Integ. Corrente	0.000 a 1.999	0.010		Vetorial	91	11-19

Figura 42 – Parâmetros relacionados ao controle do torque (CONTROLS, 2012)

<b>P0169</b>	Máx. Corrente Torque +	0.0 a 350.0 %	125.0 %		PM e Vetorial	95	11-29 e 21-10
<b>P0170</b>	Máx. Corrente Torque -	0.0 a 350.0 %	125.0 %		PM e Vetorial	95	11-29 e 21-10
<b>P0171</b>	Corr. Torque + na Nmáx	0.0 a 350.0 %	125.0 %		Vetorial	95	11-30
<b>P0172</b>	Corr. Torque - na Nmáx	0.0 a 350.0 %	125.0 %		Vetorial	95	11-30
<b>P0173</b>	Tipo Curva Torque Máx	0 = Rampa 1 = Degrau	0 = Rampa		Vetorial	95	11-30
<b>P0175</b>	Ganho Propor. Fluxo	0.0 a 31.9	2.0		Vetorial	92	11-20
<b>P0176</b>	Ganho Integral Fluxo	0.000 a 9.999	0.020		Vetorial	92	11-20
<b>P0178</b>	Fluxo Nominal	0 a 120 %	100 %		Vetorial	92	11-21
<b>P0179</b>	Fluxo Máximo	0 a 120 %	120 %		Vetorial	92	11-21
<b>P0181</b>	Modo de Magnetização	0 = Habilita Geral 1 = Gira/Para	0 = Habilita Geral		CFG e Encoder	92	11-21

Figura 43 – Parâmetros relacionados ao controle vetorial (CONTROLS, 2012)

# ANEXO C – VI Referência

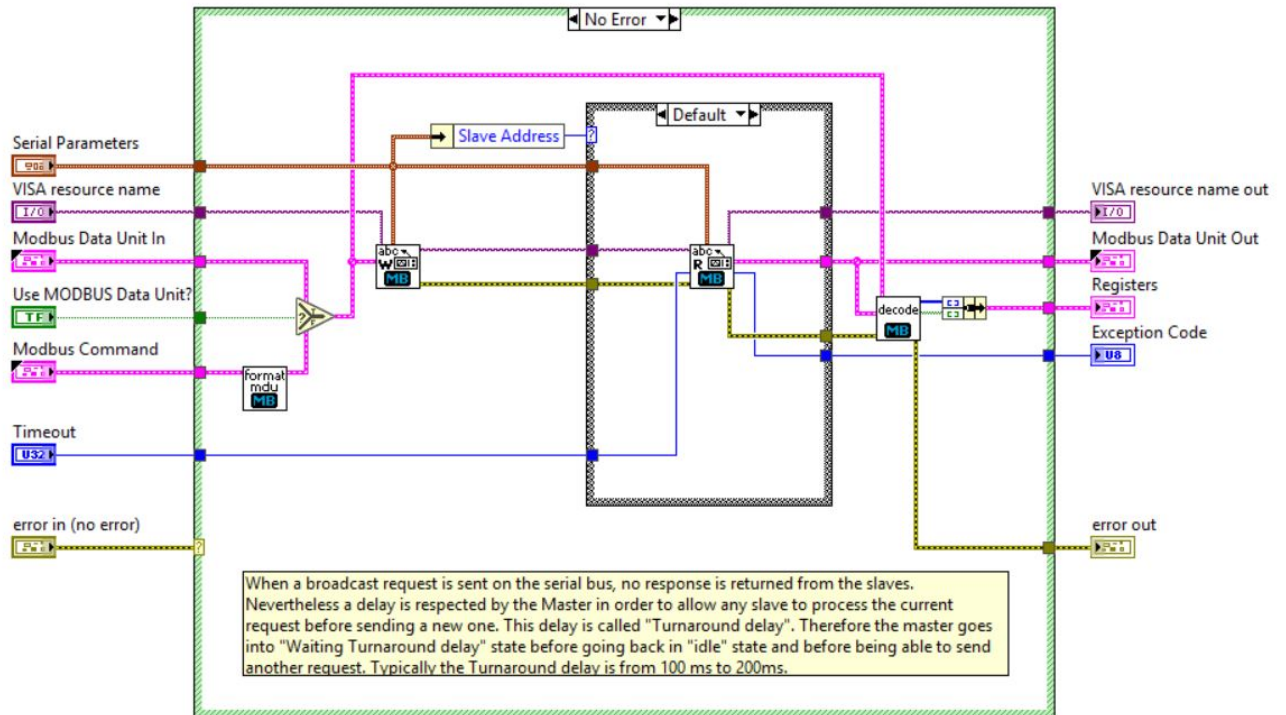


Figura 44 – Diagrama de Blocos do ExemploMB Serial Master Query.vi