



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UFPA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
INDUSTRIAL – PPGEI-UFPA

**EMULAÇÃO DE CARGA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA USANDO INVERSOR**

MARCOS ANDREY DA SILVA LOPES

UFPA/ITEC/PPGEI-UFPA  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará – Brasil  
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UFPA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL –  
PPGEI/UFPA

MARCOS ANDREY DA SILVA LOPES

**EMULAÇÃO DE CARGA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA USANDO INVERSOR**

Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora do PPGEI-UFPA para obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Industrial.

UFPA/ITEC/PPGEI-UFPA  
Campus Universitário do Guamá  
Belém – Pará – Brasil  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

D111e da Silva Lopes, Marcos Andrey.  
EMULÇÃO DE CARGA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA USANDO INVERSOR / Marcos Andrey da Silva  
Lopes. — 2022.  
134 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Industrial, Belém, 2022.

1. variação de carga. 2. bancada experimental. 3.  
simulação de geração. I. Título.

CDD 621.7

---

MARCOS ANDREY DA SILVA LOPES

**EMULAÇÃO DE CARGA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA USANDO INVERSOR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Projetos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Petronio Vieira Junior

Data de Aprovação: 30 de junho de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Petronio Vieira Junior

- Orientador/Presidente  
PPGEI/UFPA

Prof. Dr. Sinfronio Brito Moraes

- Membro Interno  
PPGEI/UFPA

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira

- Membro Externo ao Programa  
PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Walter Barra Junior

- Membro Externo ao Programa  
PPGEE/UFPA

Prof. Dr. Tarcio André dos Santos Barros

- Membro Externo à Instituição  
PPGEM/UNICAMP

## RESUMO

Esta monografia tem por objetivo emular carga variável em uma bancada de simulação de geração eólica e hidráulica usando inversor conectado a uma carga fixa constituída de banco de resistências e indutâncias. A partir da modelagem realizada das turbinas hidráulica e eólica, é possível reproduzir os efeitos causados por variações nas dinâmicas de cada uma das gerações, como exemplo a variação do vento, para a eólica, ou a vazão de água em um distribuidor, para a hidráulica. A bancada de simulação de geração é composta por uma máquina de excitação separada (motor CC), simulando a fonte primária, acionada por um conversor, que está acoplada à um gerador, este alimentando o inversor, que é responsável pela interface com a carga. A partir deste acoplamento do conjunto motor-gerador, é possível, através do inversor, realizar a variação na carga, a fim de simular diversas condições de carga na geração. O inversor é usado como uma estratégia de variação da carga para estudos de resposta dinâmica de sistemas simulados de geração, regulação de tensão e frequência, análise de harmônicos no sistema, dentre muitas situações. Através deste conjunto, foi possível variar a corrente de armadura do gerador pela configuração adequada dos parâmetros do inversor. Para completar o estudo é proposto o método tabela de busca para seleção adequada dos parâmetros do inversor para variação da carga.

**Palavras-chave:** variação de carga, bancada experimental, simulação de geração.

## **ABSTRACT**

This paper aims to emulate variable load on a simulation bench for wind and hydraulic generation using an inverter connected to a fixed load consisting of a bank of resistances and inductances. From the modeling performed on the hydraulic and wind turbines, it is possible to reproduce the effects caused by variations in the dynamics of each generation, such as the variation in wind, for wind, or the flow of water in a distributor, for hydraulic. The generation simulation bench is composed of a separate excitation machine (DC motor), simulating the primary source, driven by a converter, which is coupled to a generator, this one feeding the inverter, which is responsible for the interface with the load. From this coupling of the motor-generator set, it is possible, through the inverter, to carry out the load variation, in order to simulate different load conditions in the generation. The inverter is used as a load variation strategy for dynamic response studies of simulated generation systems, voltage and frequency regulation, harmonic analysis in the system, among many situations. Through this set, it was possible to vary the generator armature current by properly configuring the inverter parameters. To complete the study, the look at table method is proposed for the proper selection of inverter parameters for load variation.

**Key-words:** load variation, experimental bench, generation simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Bancada Dinâmica do LABEP/UFGA.....	8
Figura 2 - Equipamentos presentes na geração hidráulica. Fonte: MOURA,2019.....	13
Figura 3 - Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade. Fonte: (MOURA,2019).....	14
Figura 4 - Diagrama simplificado do conjunto turbina-gerador. Fonte: FILHO(2011) .....	14
Figura 5 - Modelo Dinâmico de Simulação Eólica – Adaptado.....	17
Figura 6 - Modelo simplificado do conjunto. Fonte: ROCHA (2008) .....	18
Figura 7 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina. Fonte: ROCHA (2008).....	19
Figura 8 - Diagrama de blocos para emulação de geração. (ROCHA, 2008. Adaptado). .....	21
Figura 9 - Curva de Potência x Frequência de Carga Indutiva. Fonte (MOURA,2019) .....	24
Figura 10 - Curva Frequência x Potência de um regulador com estatismo. Fonte: (MOURA,2019) .....	26
Figura 11 - Resposta no tempo de um regulador com estatismo. Fonte (MOURA, 2019). .....	27
Figura 12 - Curva de estatismo com metade da carga. Fonte (MOURA,2019) .....	28
Figura 13 - Deslocamento da curva de estatismo. Fonte: (MOURA,2019) .....	28
Figura 14 - Modificação na Potência. Fonte (MOURA,2019) .....	29
Figura 15 - Ações de controle de velocidade da turbina para controle de geração. Fonte (MOURA,2019) .....	30
Figura 16 - Curva de Capabilidade. Fonte: (BERTINETI, 2014) .....	35
Figura 17 - Modelo Esquemático da Bancada Dinâmica.....	37
Figura 18 - Bancada Dinâmica .....	37
Figura 19 - Esquemático de Comando Conversor CTW04 .....	38
Figura 20 - Marcação de desgaste nas escovas.....	39
Figura 21 - Regulador de Tensão.....	43
Figura 22 - Posicionamento dos tirantes.....	44
Figura 23 - Gerador na posição vertical: Com disco de acoplamento (esquerda) e sem disco de acoplamento (direita).....	44
Figura 24 - Gerador com conector olhal .....	45
Figura 25 - Lçando o gerador com auxílio da girafa.....	45
Figura 26 - Passos para remoção completa do rotor .....	46
Figura 27 - Encaixe do extrator de rolamentos (esquerda) e remoção do rolamento (direita) .	48
Figura 28 - Lubrificação do assento do eixo .....	48
Figura 29 - Carga RL alimentada pelo inversor .....	50
Figura 30 - Chapa de identificação dos indutores.....	51
Figura 31 - Osciloscópio utilizado para leitura dos sinais.....	52
Figura 32 - Curva V/F Ajustável do Inversor. Fonte: Autor .....	52
Figura 33 - Variação da Impedância de uma carga RL .....	53
Figura 34 - Curva V/F "Customizada". Fonte: Autor.....	54
Figura 35 - Diagrama de Blocos simplifaco utilizando o método Tabela de Busca .....	55
Figura 36 - Gráfico tensão de saída x frequência, na fase R .....	56
Figura 37 - Gráfico corrente de saída x frequência, na fase R .....	57
Figura 38 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na entrada, fase R. ....	59
Figura 39 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na entrada com o inversor energizado, fase R. ....	59
Figura 40 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na entrada, fase R, com o inversor a 3500RPM .....	60

Figura 41 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na saída U, com o inversor a 3500RPM.....	60
Figura 42 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 25% da carga.....	61
Figura 43 - Formas de onda de tensão e saída na saída U, operando a 25% da carga. ....	62
Figura 44 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 50% da carga.....	62
Figura 45 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, operando a 50% da carga.....	63
Figura 46 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 75% da carga.....	63
Figura 47 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, operando a 75% da carga.....	64
Figura 48 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 100% da carga....	64
Figura 49 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, operando a 100% da carga.....	65
Figura 50 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, em 3530RPM.....	66
Figura 51: (A) Ilustração da Chave Geral presente no Laboratório de Eletrônica de Potência. (B) Ilustração da chave nas posições aberta e fechada que, respectivamente, impede ou permite a alimentação da Bancada. ....	77
Figura 52: Ilustração das Botoeiras de Comando SBG e S1-S4 representando suas posições com relação à sua localização na Bancada conforme a Figura [Figura Geral da Bancada]. ....	78
Figura 53: Ilustração da Botoeira de Comando SBG, sendo (1) o Botão de Ativação “I”, em verde, e (2) o Botão de Desativação “O”, em Vermelho. ....	79
Figura 54: Ilustração de uma Botoeira de Comando sendo (1) o Botão de Ativação “I”, em verde, e (2) o Botão de Desativação “O”, em Vermelho. ....	79
Figura 55: Ilustração das Chaves de Habilitação SE1-SE3, todas desabilitadas e suas posições com relação à sua localização na Bancada conforme a Figura [Figura Geral da Bancada]. ....	80
Figura 56: Ilustração de uma Chave de Habilitação habilitada, indicada por ON, e desabilitada, indicada por OFF.....	80
Figura 57: Localização do display, leds e teclas da HMI.....	81
Figura 58: Funções básicas das teclas presentes na HMI.....	81
Figura 59: Tampa do conversor. ....	82
Figura 60: Fotos e indicações do processo de abertura da tampa.....	83
Figura 61: Foto do Cartão CCW4. ....	83
Figura 62: Portas XC1.....	84
Figura 63: Portas X1 .....	84
Figura 64: Possíveis comportamentos do sinal Ic, no cartão CCW4. ....	88
Figura 65: (A) Ilustração da Chave Geral presente no Laboratório de Eletrônica de Potência. (B) Ilustração da chave nas posições aberta e fechada que, respectivamente, impede ou permite a alimentação da Bancada. ....	99
Figura 66: Ilustração das Botoeiras de Comando SBG e S1-S4 representando suas posições com relação à sua localização na Bancada conforme a Figura [Figura Geral da Bancada]. ....	100
Figura 67: Ilustração de uma Botoeira de Comando sendo (1) o Botão de Ativação “I”, em verde, e (2) o Botão de Desativação “O”, em Vermelho. ....	100
Figura 68: Indicação do processo de abertura da Tampa do Inversor.....	101
Figura 69: Representação do painel HMI do Inversor. ....	102
Figura 70: Placa de identificação do motor WEG utilizado.....	111
Figura 71: Esquema de ligação do conjunto inversor-motor. ....	112
Figura 72: Representação do painel HMI do Inversor. ....	113

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	8
<b>1.1. Descrição do Problema</b> .....	9
<b>1.2. Objetivos</b> .....	10
<b>1.3. Justificativa</b> .....	11
<b>1.4. Metodologia</b> .....	12
<b>2. Geração Hidráulica e Eólica</b> .....	13
<b>2.1. Modelagem da Geração Hidráulica</b> .....	13
<b>2.2. Modelagem da Geração Eólica</b> .....	17
<b>2.3. Emulação da Geração em Bancada</b> .....	21
<b>2.4. Potência Gerada</b> .....	22
<b>2.5. Controle de Frequência e Velocidade</b> .....	23
<b>2.6. Curva de Capabilidade do Gerador</b> .....	31
<b>2.7. Estado da Arte</b> .....	35
<b>3. Bancada Dinâmica</b> .....	37
<b>3.1. Elementos da Bancada Dinâmica</b> .....	37
<b>3.2. Comando e Proteção</b> .....	38
<b>3.3. Procedimentos de Manutenção</b> .....	39
<b>3.3.1. Motor CC</b> .....	39
<b>3.3.2. Gerador</b> .....	42
<b>4. Arranjo Experimental</b> .....	50
<b>4.1. Condições de Contorno do Sistema</b> .....	50
<b>4.2. Parametrização da Curva V/F “Customizada” do Inversor</b> .....	52
<b>4.3. Utilização do método Tabela de Busca</b> .....	55
<b>5. Resultados e Análises</b> .....	58
<b>6. Considerações Finais</b> .....	68
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	71
<b>8. ANEXOS</b> .....	73

## 1. INTRODUÇÃO

No Laboratório de Eletrônica de Potência (LabEP-UFPa) da Universidade Federal do Pará (UFPa), são realizadas pesquisas no âmbito da geração de energia elétrica. Um dos temas de estudo do LabEP é geração de energia, tanto a hidráulica, como sendo uma das principais fontes de energias alternativas utilizadas no país, bem como a eólica a fotovoltaica, que se encontra em expansão constante.

Para estudo das gerações hidráulica e eólica, o LabEP conta com uma bancada dinâmica de geração de máquinas rotativas, doravante chamada simplesmente de Bancada Dinâmica (BD). Esta bancada, financiada pela Eletronorte, através do projeto intitulado MHCE - Monitoração de Hidrogeradores Através da Corrente Estatórica – é uma ferramenta de ensino e pesquisa. A mesma conta com a utilização de um conversor CA/CC para controle de um motor CC que atua como fonte primária, que está acoplado ao gerador, que por sua vez alimenta um inversor de frequência que alimenta uma carga variável. A Figura 1 ilustra a bancada em questão:



Figura 1 - Bancada Dinâmica do LABEP/UFPa

Além dos estudos e pesquisas desenvolvidos na Bancada Dinâmica, este trabalho também precisou realizar uma revisão das instalações e equipamentos eletromecânicos e

eletrônicos, elaborando novos Procedimentos de Operação Padrão (POPs) para garantir a segurança e verificar os limites de operação do sistema.

Dentre estes estudos necessários para o desenvolvimento da Bancada Dinâmica, destaca-se a emulação de geração, onde são realizadas pesquisas para prover a geração de variação de corrente na carga e assim poder analisar a eficiência da geração nas diversas estratégias de controle, no caso desta monografia, hidráulica e eólica, a fim de simular pontos de operação de funcionamento da geração.

Esta monografia tem como objetivo emular diversos pontos de funcionamento do inversor, de modo a verificar o funcionamento dos equipamentos sob diversos pontos diferentes de operação, e com isto, apresentar o inversor como uma estratégia de variação de carga. Isto é feito analisando-se diversas condições de operação do inversor, e a partir desta análise- determinar a melhor forma de operação para este determinado ponto e realizar o controle de variação da carga a partir de variação de corrente realizada pelo inversor.

### **1.1. Descrição do Problema**

O Governo do Estado do Pará atua no setor energético através de construção de rede de energia através dos recursos do Programa de Investimentos em Obras de Interesse Social – PIS. Neste contexto, existem comunidades isoladas que não podem ser atendidas com rede convencional de energia, uma vez que seria muito oneroso para o Estado a construção da mesma, em virtude da considerável distância de rede a ser construída e licenciamentos ambientais que são exigidos para este tipo de atendimento.

Portanto, muitas destas comunidades, localizadas no interior do Estado, são atendidas por grupo geradores. A busca de requisitos mínimos para contratação de empresas para instalação, operação e manutenção de geração deve ser direcionada para o menor preço. A manutenção é encarecida pela necessidade de profissionais realizando manutenções preventivas.

A manutenção preditiva em grupos geradores desassistidos é possível através de monitoração do estado de funcionamento. Esta monitoração para ser de baixo custo deve ser capaz de medir indiretamente falhas mecânicas (CHEN, 2019) e realizar predição de falhas no gerador, como excentricidade (JUNG, 2019), desbalanceamento ou defeito nos rolamentos.

Tudo isto se deve a não realização de manutenção preditiva, ou seja, baseada no estado de funcionamento dos equipamentos. Utilizando sensores de tensão, mitigando o emprego de sensores dedicados, obtêm-se sinais de variáveis elétricas para realizar a correlação com as falhas mecânicas (MARTÍNEZ, 2019).

Com objetivo de desenvolver estudos de monitoração da geração com máquinas rotativas, a Bancada Dinâmica foi projetada e construída. Esta bancada é capaz de simular geração hidráulica e eólica e é dotada de sensores de monitoração de seu funcionamento. Através de simulação de defeitos em diversos pontos de operação é possível desenvolver pesquisa de predição de falhas na geração de energia.

Uma carga variável, portanto, é essencial para as simulações em diversos pontos de operação, uma vez que, assim, é possível observar as respostas dinâmicas da bancada face às alterações realizadas na carga, permitindo a monitoração de todos os parâmetros elétricos e mecânicos das máquinas e dos equipamentos da bancada. Para isto, existem três formas de variação de carga:

- a) Chaveamento de resistências;
- b) Alteração do fluxo de potência, devolvendo energia para a rede;
- c) Inversor alimentando carga fixa.

A proposta principal desta dissertação é apresentar a variação de carga utilizando o inversor, considerando que a bancada é preparada para emulação de geração, e que esta geração será utilizada para verificação da estratégia de variação de carga utilizando o inversor. Esta variação da carga é realizada através da alteração dos parâmetros do inversor no momento do funcionamento, variando-se a corrente na carga. O equipamento é capaz de variar a carga em operação, alterando a resposta dinâmica da bancada.

## **1.2. Objetivos**

### **OBJETIVO GERAL**

- Desenvolver controle de carga para bancada de geração.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Apresentar os fundamentos da geração hidráulica e eólica

- Apresentar os elementos da bancada dinâmica de geração e supervisão utilizada nesta monografia

- Apresentar os POP's (Procedimento Operacional Padrão) referentes aos equipamentos;

- Utilizar tabela Lookup Table para determinação da corrente de saída na carga a partir da tensão de saída e da rotação da máquina;

### **1.3. Justificativa**

As fontes renováveis de energia estão ganhando cada vez mais espaço e investimentos no setor energético brasileiro. A geração hidráulica já representa grande parte da matriz energética brasileira, e a geração eólica é um mercado em expansão que vem crescendo consideravelmente nos últimos anos. Este crescimento contínuo de ambos justifica a necessidade do emprego de manutenções e verificação de pontos de máxima eficiência a fim de maximizar o funcionamento dos sistemas, desde a vida útil dos mesmos até o melhor ponto de operação.

Seguindo nesta mesma linha, a geração eólica está em expansão constante no mercado energético brasileiro. Portanto uma bancada que seja capaz de apresentar a emulação deste tipo de geração para fins de pesquisa se apresenta como fundamental para avanços nos estudos referentes à este tipo de fonte de energia.

Muito se estuda sobre o comportamento das máquinas operando e realizando-se manutenções preditivas na mesma, ou seja, baseada no estado de funcionamento. A variação da carga é uma forma fundamental de representar a realidade de funcionamento de grandes indústrias, e, por consequência, analisar o funcionamento das máquinas durante o processo.

A bancada dinâmica da UFPA tem plenas condições de realizar supervisão/monitoração dos parâmetros elétricos e mecânicos das máquinas a partir da utilização de sensores para medição e posterior tratamento de dados obtidos para elaboração de técnicas de detecção de falhas. A proposta deste projeto, no entanto, ainda não é a detecção de falhas, mas certamente é um campo que será explorado futuramente.

Para o âmbito profissional, é fundamental a análise de funcionamento de equipamentos mediante variações da carga, para que se tenham respostas dinâmicas cada vez mais rápidas e efetivas.

#### **1.4. Metodologia**

O projeto foi dividido em 3 seções. A primeira seção trata sobre as máquinas primárias para geração de energia elétrica, onde serão demonstradas as fontes primárias existentes de geração de energia, as máquinas rotativas para geração, apresentando modelagem e princípios de funcionamento dos sistemas. Além disso, outro objetivo importante desta primeira seção é descrever a geração para se melhor compreender a implementação da simulação na bancada experimental em questão. A segunda seção trata sobre a bancada dinâmica utilizada neste projeto. Serão apresentados os elementos da bancada, comando e proteção desenvolvido na bancada. Os POP's (Procedimento Operacional Padrão) dos equipamentos, os procedimentos de manutenção das máquinas utilizadas e a emulação das gerações em si, desenvolvidos nesta sessão são apresentados em anexo. A terceira e última seção desta monografia apresenta os resultados experimentais obtidos. Serão descritos os arranjos de ensaio e limites operacionais do sistema, análise dos pontos de operação e verificação de máxima eficiência do sistema, aquisição e tratamento dos sinais obtidos e, por fim, comparação dos resultados obtidos com a simulação computacional realizada anteriormente. Por fim, serão descritos os tópicos a serem ainda desenvolvidos para a conclusão desta dissertação, seguido de cronograma.

## 2. Geração Hidráulica e Eólica

### 2.1. Modelagem da Geração Hidráulica

De acordo com (MOURA,2019), os principais elementos constituintes da geração hidráulica, ou seja, utilizando hidrogeradores, são apresentados na figura 2.

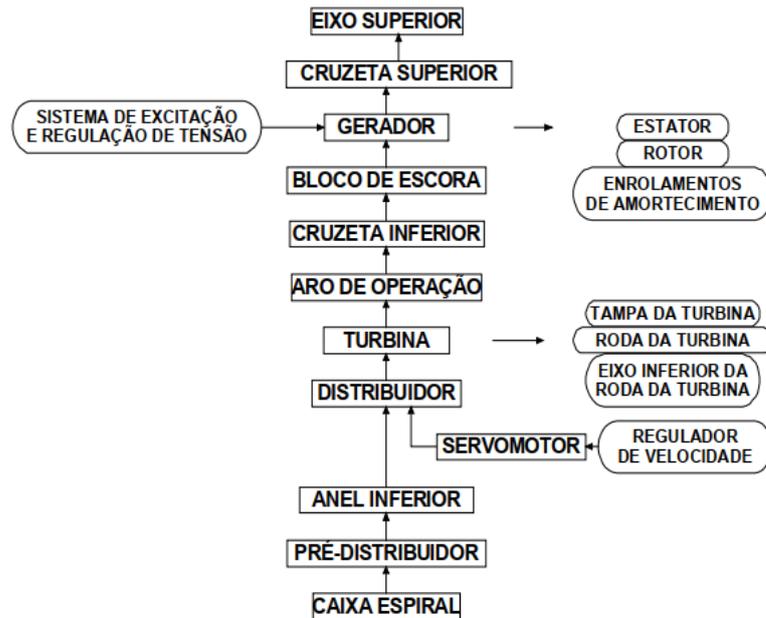


Figura 2

Figura 2 - Equipamentos presentes na geração hidráulica. Fonte: MOURA,2019.

O regulador de velocidade tem como função manter a velocidade da máquina constante, agindo sobre o conjugado motor no sentido de mantê-lo em um valor igual ao conjugado resistente. Em outras palavras, o sistema de regulação de velocidade constitui-se em um conjunto eletro-hidráulico que tem como principal finalidade a regulação da potência ativa, através da alteração instantânea da velocidade da turbina, ou seja, modificando-se a vazão d'água para a mesma. Como o sistema elétrico tem uma frequência basicamente constante, isso faz com que a velocidade da unidade geradora também fique constante, transformando, assim, a variação da velocidade em variação de potência ativa. Outra finalidade do sistema de regulação de velocidade é a de acompanhar automaticamente a variação de potência ativa o mais rápido possível, já que esta variação altera a rotação da turbina. Porém, a rapidez de regulação é limitada, pois a atuação é feita somente depois que a rotação da turbina foi modificada. Além disso, há a inércia de todas as partes mecânicas da unidade. No entanto, esse tempo de resposta do sistema de

regulação de velocidade deve estar dentro de uma faixa aceitável para a operação do sistema elétrico. A Figura 3 ilustra o diagrama de blocos de funcionamento do regulador de velocidade:

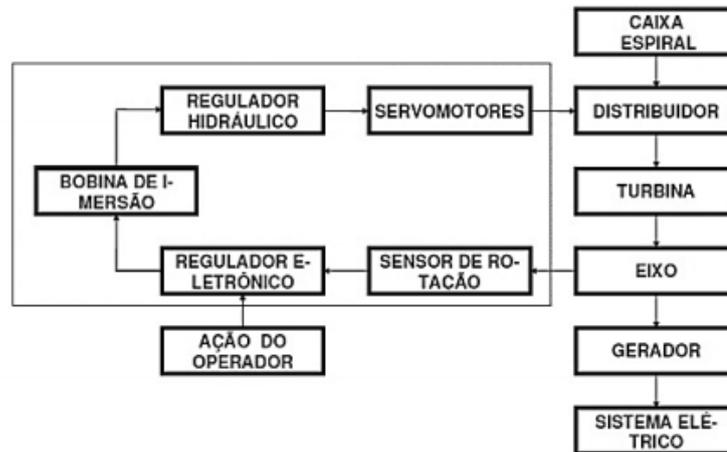


Figura 3 - Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade. Fonte: (MOURA,2019).

Tratando-se da simulação dinâmica do sistema de geração hidráulica em bancada experimental, todos os elementos acima apresentados devem ser modelados e seu comportamento deve ser replicado pelo controle da máquina primária, no caso da Bancada Dinâmica, o motor CC, que, portanto, simula a turbina (T) mostrada na figura 4.

Segundo KUNDUR (2004), em uma unidade hidrogeradora, o torque acionante é resultado da interação entre o torque mecânico desenvolvido pela turbina e o torque desenvolvido pelo gerador no momento em que se há uma variação de carga. A figura 4 abaixo ilustra um simples diagrama de ação de torques nas partes girantes da unidade de geração:

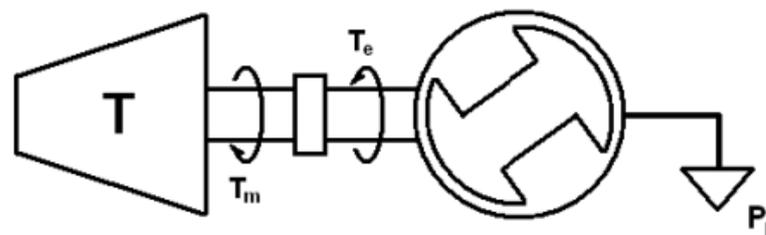


Figura 4 - Diagrama simplificado do conjunto turbina-gerador. Fonte: FILHO(2011)

De forma análoga ao modelo de sistema eólico, para a geração hidráulica, o torque acionante é dado pela equação (1) abaixo:

$$T_a = T_m - T_e \quad (1)$$

Onde

$T_a$  – Torque acionante/acelerante (N.m)

$T_m$  – Torque mecânico (N.m)

$T_e$  – Torque eletromagnético do gerador (N.m)

A equação (2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (2)$$

Onde

J neste caso também representa o momento de inércia do conjunto turbina-gerador;

$\omega_m$  é a velocidade angular mecânica do rotor

T é o tempo em segundos.

A partir disto, (KUNDUR,1994) define a constante de inércia, como sendo:

$$H = \frac{\text{Energia cinética na velocidade nominal}}{\text{Potência Base}} \quad (3)$$

Obtendo-se:

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{m_0}^2}{S_b} \quad (4)$$

Onde

$\omega_{m_0}$  – Velocidade mecânica nominal da turbina.

Ao isolar o momento de inercia da equação e substituindo em (3), e por fim dividindo pelo termo  $\frac{S_b}{\omega_b}$ , chega-se a seguinte equação:

$$2H \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega_m}{\omega_b} \right) = \frac{T_m}{T_b} - \frac{T_e}{T_b} \quad (5)$$

Portanto, a equação (5) descreve a dinâmica das partes rotativas do conjunto turbina-gerador.

Descrevendo em valores por unidade (pu), conclui-se que:

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (6)$$

Onde  $\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{m0}} = \frac{\omega_r/P_f}{\omega_0/P_f} = \frac{\omega_r}{\omega_0}$ , é  $P_f$  o número de polos do gerador e  $\omega_r$  a

frequência angular do gerador.

Para modelagem das turbinas, (KUNDUR,1994) desenvolveu um modelo matemático que ainda é amplamente utilizado, considerando a água e as paredes do conduto forçado incompressíveis, e é representado pelo sistema de equações listados abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{G} = A_t \bar{g} \\ \bar{H} = \left( \frac{\bar{U}}{\bar{G}} \right)^2 \\ \bar{U} = \frac{1}{T_w S} (\bar{H}_0 - \bar{H}) \\ \bar{P}_m = \bar{H} (\bar{U} - \bar{U}_{nl}) \\ \bar{T}_m = \bar{P}_r \frac{\bar{P}_m}{\bar{\omega}} \end{array} \right. \quad (7)$$

De modo que:

$\bar{g}$  é a abertura real do distribuidor;

$\bar{G}$  é a abertura ideal do distribuidor;

$\bar{U}$  é a velocidade da água na turbina;

$\bar{U}_{nl}$  é a velocidade da água com a turbina operando sem carga;

$\bar{H}$  é a altura de queda medida do nível da turbina até a origem da queda (lago);

$\bar{H}_0$  é a altura de queda inicial;

$\bar{P}_m$  é a potência mecânica da turbina;

$\bar{\omega}$  é a velocidade do conjunto turbina-gerador;

$\bar{T}_m$  é o torque mecânico desenvolvido pela turbina;

$A_t$  é o ganho da turbina;

$T_w$  é o tempo de partida da água;

$\bar{P}_r$  é a mudança de base descrita pela relação abaixo:

$$\bar{P}_r = \frac{\text{Potência nominal da turbina}}{\text{Potência base do sistema}} \quad (8)$$

## 2.2. Modelagem da Geração Eólica

Na simulação dinâmica do sistema de geração eólica em bancada experimental, é importante entender a dinâmica de funcionamento das massas girantes para realizar a modelagem das turbinas eólicas.

O rotor da turbina é diretamente acoplado ao eixo do gerador, ou através de uma caixa multiplicadora de velocidade. Segundo ROCHA (2008), o modelo utilizado para representar o comportamento dinâmico do sistema de geração eólica é o representado na figura 5:

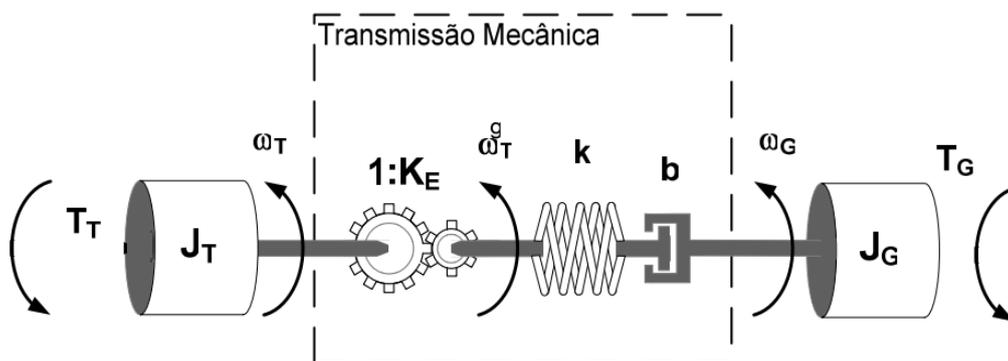


Figura 5 - Modelo Dinâmico de Simulação Eólica – Adaptado

De modo que:

$J_T$  – Momento de inércia da turbina eólica;

$J_G$  – Momento de inércia do gerador;

$k$  – Rigidez do eixo de acoplamento;

$b$  – Amortecimento do eixo de acoplamento;

$K_E$  – Relação de transformação da caixa de engrenagens.

Este modelo é composto por duas massas conectadas, uma representando a turbina completa e outra representando o rotor do gerador, ambos com seus momentos de inércia. Esta conexão é realizada a partir de um eixo com rigidez e amortecimento devidamente

modelados. Além disso, possui uma caixa de engrenagens que é utilizada para acoplar o lado de baixa velocidade da turbina ao lado de alta velocidade do gerador.

Segundo PARVARESH (2020), para modelos de aerogeradores não lineares com rotação variável, é possível desprezar a dinâmica do eixo, obtendo o modelo simplificado seguindo a relação:

$$\omega_T^g = \omega_G \quad (9)$$

Deste modo, o sistema apresentaria apenas uma massa e inércia equivalentes, conforme representado na figura 6:

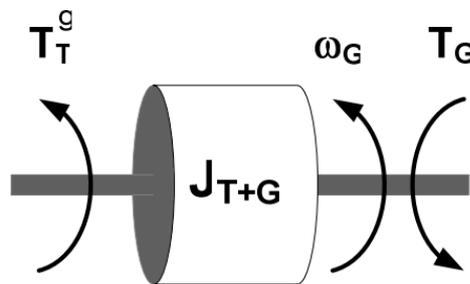


Figura 6 - Modelo simplificado do conjunto. Fonte: ROCHA (2008)

Onde

$J_{T+G}$  - Momento de inércia do sistema simplificado;

$T_T$  - Torque da turbina;

$T_G$  - Torque do gerador.

A equação (10) é apresentada seguir e resume a modelagem proposta:

$$\begin{cases} T_T^g = K_E^{-1} \cdot T_T \\ \omega_G = K_E \cdot \omega_T \\ J_{T+G} = J_G + K_E^{-2} \cdot J_T \end{cases} \quad (10)$$

A seguir serão apresentadas as equações determinantes para cálculos de potência e torque do sistema eólico. Em virtude disto, a figura 7 apresenta o diagrama de forças e velocidades atuantes sobre as pás das turbinas:

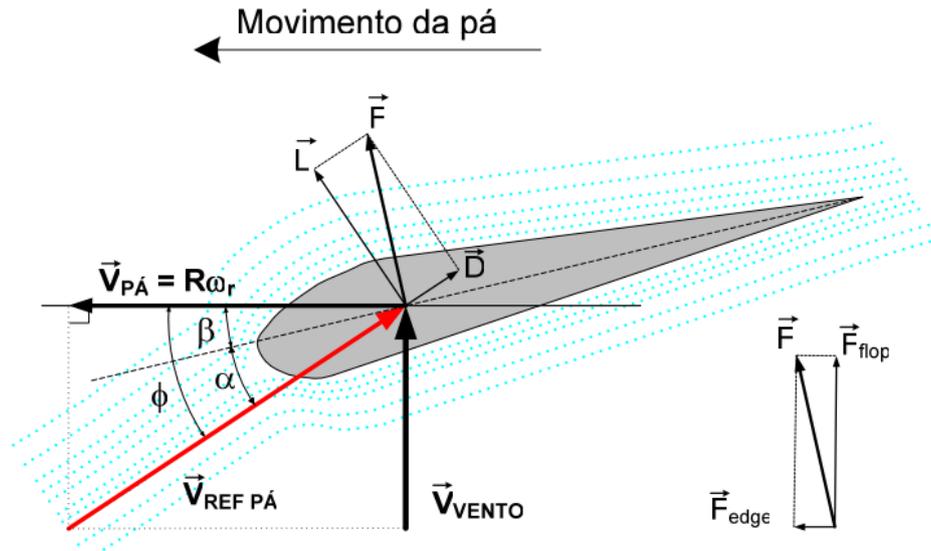


Figura 7 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina. Fonte: ROCHA (2008)

Considerando ainda o modelo para aerogeradores não lineares, RAJENDRAN (2014) apresenta a seguinte equação para cálculo de potência aerodinâmica vista do rotor:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (11)$$

Onde:

$P_a$  – Potência aerodinâmica;

$\rho$  – Densidade do ar;

$R$  – Raio do rotor;

$C_p$  – Coeficiente de potência.

A partir da equação (1.3), é possível destacar que a potência aerodinâmica é diretamente proporcional ao cubo da velocidade do vento. O coeficiente de potência  $C_p$  é definido em função do ângulo de inclinação da lâmina ( $\beta$ ) e da taxa de velocidade do vento ( $\lambda$ ), definida pela relação entre a velocidade do vento e a velocidade das pontas das pás do aerogerador. A equação (12) determina  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (12)$$

Ainda segundo RAJEDRAN (2014), a velocidade do vento é de natureza estocástica em relação ao tempo. Em virtude disto, a taxa de velocidade  $\lambda$  é afetada, variando por consequência o coeficiente de potência.

Portanto, a relação entre o torque aerodinâmico da turbina  $T_T$  e a potência aerodinâmica segue a equação (13):

$$P_a = T_T \omega_r \quad (13)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (14)$$

Onde  $C_q$  é o coeficiente de torque, definido como:

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (15)$$

Que foi substituído em (14), resultando em:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2 \quad (16)$$

Para modelagem do sistema, ROCHA (2008) apresenta três alternativas a serem seguidas:

#### 1.1. Mesma Inércia

O sistema simulado apresentaria a mesma inércia do sistema real, vista pelo eixo do gerador. No entanto, ROCHA (2008) informa que apesar da massa do sistema ser de uma grandeza elevada, a relação vista na equação (10) mostra que a inércia da turbina é reduzida numa proporção inversa ao quadrado da relação de transformação da caixa de engrenagens. Segundo ROCHA (2008), a maior desvantagem deste sistema é o fato de se ter que utilizar volantes de inércia para cada turbina que se queira simular.

#### 1.2. Mesmo Torque

Ainda segundo ROCHA (2008), para este caso, a turbina simulada é controlada de modo que se possua o mesmo torque que uma turbina real possuiria para uma determinada velocidade do vento e do eixo na turbina.

Deste modo, obtêm-se a simulação das condições de regime permanente do sistema, mas não leva em conta o regime transitório.

#### 1.3. Mesma Variação de Velocidade

Este é o sistema optado para simulação, uma vez que a bancada experimental será capaz de reproduzir a variação da velocidade no eixo da máquina, fazendo com que assim

seja possível representar tanto as condições de regime permanente e de regime transitório do sistema.

### 2.3. Emulação da Geração em Bancada

Além disso, para efeito comparativo com a bancada, temos a figura 8 abaixo, que ilustra o diagrama de blocos da bancada para emulação de geração e supervisão:

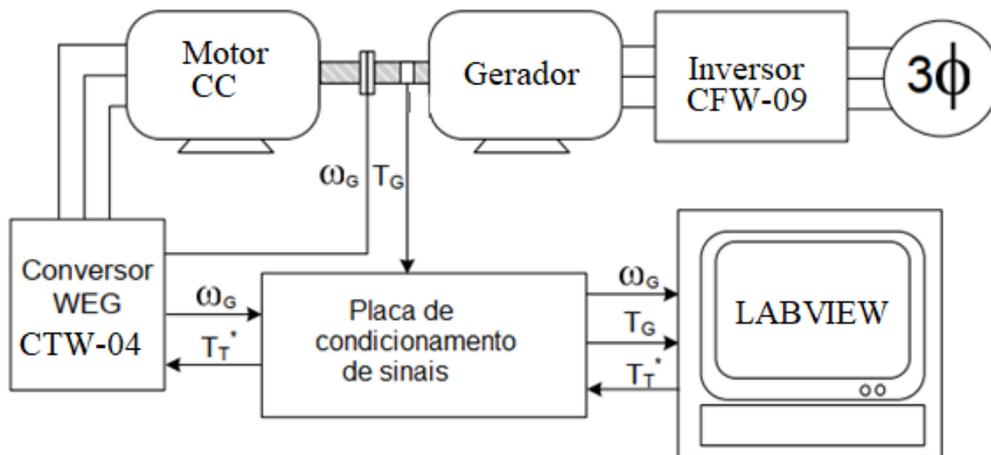


Figura 8 - Diagrama de blocos para emulação de geração. (ROCHA, 2008. Adaptado).

De modo que:

Motor CC – Máquina de excitação separada, neste caso representa a fonte acionante, sendo acionada pelo conversor CTW-04;

Gerador – Máquina de indução do gerador de polos salientes, que está acoplada ao eixo da máquina CC, a fim de alimentar o funcionamento do inversor, que, por sua vez, alimentará uma carga variável.

A ideia central da emulação na bancada, como já informado, é a variação da corrente na carga, utilizando o inversor CFW 09 como estratégia para esta variação, a partir do acionamento do motor CC controlado pelo conversor CTW-04. E, uma ideia já pensada para supervisão das variáveis da bancada, é a utilização de uma placa de condicionamento de sinais, fazendo com que se torne possível a leitura destes sinais em um supervisor totalmente ambientado no software LabView, da National Instruments. Para este projeto, não será explorado a ideia do supervisor, sendo uma sugestão de trabalhos futuros.

## 2.4. Potência Gerada

### Potência Hidráulica

A geração hidrelétrica está associada à vazão do rio (Q), isto é, à quantidade de água disponível em um determinado período de tempo e à altura de sua queda (H). A vazão é calculada dividindo-se o volume de água que passa pelas turbinas por unidade de tempo.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (17)$$

A altura de queda é a diferença entre o nível de água na barragem (a montante) e o nível de água na saída das turbinas (a jusante). A energia potencial de um corpo de massa M, caindo de uma certa altura h, é expressa como:

$$E = Mgh \text{ (Joules)} \quad (18)$$

Onde g é a aceleração devido à gravidade.

Ao nível do mar, o valor de g é 9,81 m/s<sup>2</sup>. Observa-se que, embora o valor de g diminua acima do nível do mar, porque a variação é relativamente pequena, para fins práticos, um valor de 9,81 m/s<sup>2</sup> é comumente usado, independentemente da elevação da central. Além disso, a unidade básica de energia é joules. A massa de água é sua densidade (ρ) vezes seu volume (V), ou M = ρV. Assim E = (ρV) g h [Joules]. Agora, dividindo ambos os lados da equação pelo tempo (t):

$$\frac{E}{t} = \frac{\rho V}{t} gh \text{ (W)} \quad (19)$$

Nota-se que a energia dividida pelo tempo (E/t) é a potência P, em watts (W), e o volume ao longo do tempo (V/t) é a vazão de água (Q) ou fluxo em m<sup>3</sup>/s. Assim, substituindo E/t por P e V/t por Q, a equação de potência torna-se:

$$P = 9.81\rho Qgh \text{ (W)} \quad (20)$$

Observa-se que ρg = γ, que é o peso unitário da água = 9,81 kN/m<sup>3</sup>. De acordo com os princípios da termodinâmica, quando a energia é alterada de uma forma para outra, haverá algumas perdas com base na eficiência do processo de conversão ou equipamento. Assim, o potencial hidráulico é dado por:

$$P = 9.81Qh\eta \text{ (W)} \quad (21)$$

Onde  $\eta$  é o rendimento, que na prática é cerca de 0.75 a 0.80, pois existem as perdas envolvidas na transformação de energia.

### **Potência Eólica**

A energia cinética de uma massa de ar  $m$  movendo em uma velocidade  $v$  é dada por:

$$E_{cinética} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (22)$$

A potência de uma massa de ar movendo-se com uma velocidade através de uma área  $A$  é a energia por unidade de tempo:

$$P = \frac{E_{cinética}}{t} = \frac{1}{2} \frac{m}{t} v^3 \quad (23)$$

Mas a taxa de fluxo da massa através da área  $A(m^2)$  é calculado como o produto da densidade do ar  $\rho = \frac{kg}{m^3}$  pela área e pela velocidade  $v = \frac{m}{s}$

$$\frac{m}{t} = \rho Av \quad (24)$$

Logo,

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 (W) \quad (25)$$

## **2.5. Controle de Frequência e Velocidade**

### **Controle de Potência Ativa - Frequência Para Geração Hidráulica**

A frequência elétrica dos sistemas de potência deve ser mantida o mais estável possível, sendo sua constância um critério de qualidade do fornecimento da energia. Restrições à operação com subfrequência podem ser listadas como:

- a) O bom funcionamento de diversos equipamentos elétricos (motores, relógios elétricos) depende essencialmente da frequência elétrica da rede.
- b) Aumento da fadiga das unidades geradoras e perda de vida útil.

De uma maneira geral, as cargas nas várias barras do sistema de potência variam com a frequência e com a tensão. Podemos observar esse fato considerando uma carga RL. A potência absorvida por essa carga é calculada como:

$$S = P + jQ = |V|^2 / Z^* \quad (26)$$

No entanto,  $Z = R + j2\pi fL$ , portanto, ambas as potências ativa e reativa podem ser calculadas a partir:

$$P = \frac{|V|^2 R}{R^2 + (2\pi fL)^2} \quad (27)$$

$$Q = \frac{|V|^2 (2\pi fL)}{R^2 + (2\pi fL)^2}$$

Comprovando que ambas aumentam com o quadrado da tensão.

Considerando um motor de indução de 50 HP, com rendimento de 0.85 e fator de potência de 0.80, com uma tensão aplicada de 480 V, as seguintes curvas de potência ativa e reativa em função da frequência foram obtidas (GOLDEMBERG,1991), conforme mostra a Figura 9:

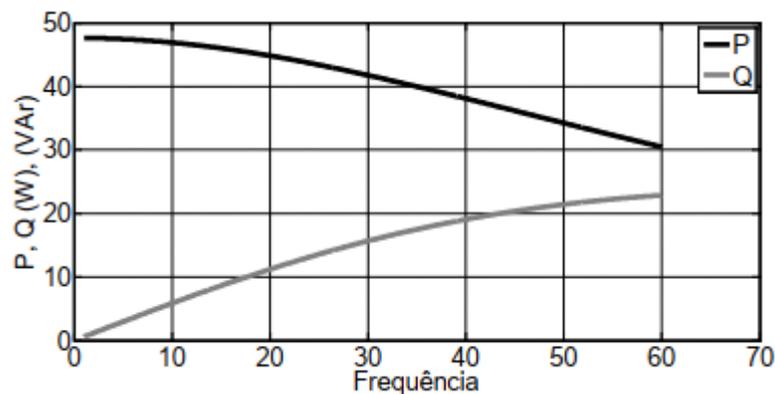


Figura 9 - Curva de Potência x Frequência de Carga Indutiva. Fonte (MOURA,2019)

O gráfico mostra que a potência ativa da carga diminui, enquanto a potência reativa da carga aumenta com o aumento da frequência.

Em um sistema de potência, a maioria das cargas são compostas e têm dependência com a frequência e a tensão, mas a relação funcional não pode ser obtida analiticamente (GOLDEMBERG,1990). Essa relação deve ser obtida de forma empírica, estimada ou medida. Além da variação da frequência influenciar as potências ativas e reativas da carga, em um sistema de potência onde existem vários geradores em paralelo, há necessidade de se manter todas as máquinas em sincronismo, pois qualquer tendência de desvio da frequência, por parte de qualquer máquina, implicaria em alterações de sua potência e, em caso extremo, acarretaria a perda de estabilidade e do sincronismo, comprometendo todo o sistema. A constância da frequência é normalmente mantida nos limites de  $\pm 0.05\text{Hz}$ .

A frequência elétrica numa máquina síncrona está diretamente ligada à rotação da mesma. Em vista disso, uma regulação de frequência implica, simplesmente, em uma regulação de velocidade da turbina. A rotação de uma turbina se mantém constante quando há um equilíbrio entre o conjugado motor desenvolvido pela turbina e o seu conjugado resistente, imposto pela carga que a mesma aciona. Uma diferença entre os conjugados motor e resistente provoca uma alteração na velocidade da máquina. Se o conjugado motor é maior do que o conjugado resistente, a velocidade aumenta. No entanto, se o conjugado motor é menor do que o resistente, a velocidade diminui. Quando se produz uma variação da carga imposta à turbina, isto é, quando se modifica o conjugado resistente que atua sobre a mesma, conforme se trate de um aumento ou diminuição deste conjugado, a turbina reduzirá ou aumentará sua velocidade de rotação. É preciso, então, adaptar o trabalho motor ao resistente, e isso se consegue graduando convenientemente a entrada d'água na turbina, para que, aumentando ou diminuindo a vazão (considerando que a altura de queda não tenha sofrido modificação), se disponha em cada momento da potência requerida. Como já explicado anteriormente, o dispositivo que regula a entrada d'água na turbina denomina-se "distribuidor". Ele fica situado entre a roda da turbina e a carcaça, sendo composto de pás diretrizes móveis.

Os reguladores de velocidade atuam sobre os mecanismos de fechamento e abertura do distribuidor, através dos servomotores, movidos a óleo sob pressão, obtido com um sistema de bombeamento.

A função básica da regulação primária (ou controle primário de velocidade) é controlar a potência mecânica da turbina acoplada ao rotor do gerador, por meio de um regulador de velocidade, para a manter o equilíbrio entre geração e carga. A resposta do gerador depende da característica de estatismo do regulador de velocidade, de modo que o gerador deve ter condições de aumentar ou reduzir sua geração (GOLDEMBERG, 1992).

Para o provimento deste serviço, a resposta está associada à reserva girante do sistema, disponível no intervalo de 10 a 20 segundos. A reserva de operação, ou de potência operativa, consiste de reserva girante e reserva não girante. A reserva girante corresponde à diferença entre a potência total efetiva das unidades geradoras que já se encontram sincronizadas ao sistema e a demanda total do sistema num dado momento. A reserva não girante é a parcela da reserva de operação de unidades geradoras que não estão em funcionamento, mas podem ser sincronizadas à rede e ter sua potência despachada dentro de um período de tempo especificado.

## Tipos de reguladores

Antigamente, um trabalho de regulação adequado para as necessidades, a cada momento, poderia ser executado apenas por um regulador simples. Entretanto, os sistemas de energia foram se expandindo. Primeiro, era uma simples máquina alimentando uma carga. Depois, um número de unidades geradoras ligadas em conjunto. Atualmente, os sistemas de potência operam de forma interligada através de várias linhas de transmissão e são necessários reguladores de velocidade sofisticados.

### Regulador isócrono

Os primeiros reguladores das unidades geradoras funcionavam para manter a velocidade e, conseqüentemente, a frequência constante. Esses reguladores são denominados isócronos, pois eles só admitem como situação aceitável aquela caracterizada por frequência de referência igual à frequência nominal. Assim, eles não são mais usados nos sistemas de potência modernos.

### Regulador com estatismo ou regulação permanente

Fisicamente, estatismo significa quantos por cento da frequência nominal, a frequência diminui, a partir da frequência em vazio, quando a potência do grupo gerador passa de zero à potência nominal. A curva característica deste regulador é mostrada na figura 10:

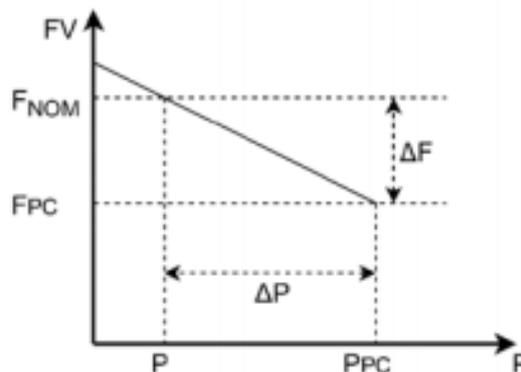


Figura 10 - Curva Frequência x Potência de um regulador com estatismo. Fonte: (MOURA,2019)

Onde:

FV é a frequência da unidade geradora em vazio;

FNOM é a frequência nominal;

FPC é a frequência à plena carga.

Assim, representando o estatismo pela letra R, vem:

$$R = \frac{\Delta F}{\Delta P} \quad (28)$$

É importante destacar que a característica da operação apresenta pontos definidos com relação aos valores de frequência e potência, de modo que o funcionamento do grupo gerador fica estável para valores de frequência diferentes da frequência nominal de operação.

Em algumas máquinas, o estatismo pode ser ajustado desde 0 % a 5 %. Em outras máquinas, o mesmo pode variar de 0 % a 10 %.

Quando vários geradores estão operando em paralelo, os geradores mais “sensíveis” às variações de carga são os que estão com o estatismo mais baixo. Ou seja, quanto maior o estatismo, mais “insensível” o gerador será com relação às variações de carga no sistema de potência. A resposta no tempo de um regulador de velocidade com estatismo, para uma variação de carga  $\Delta P$ , está mostrada na figura 11:

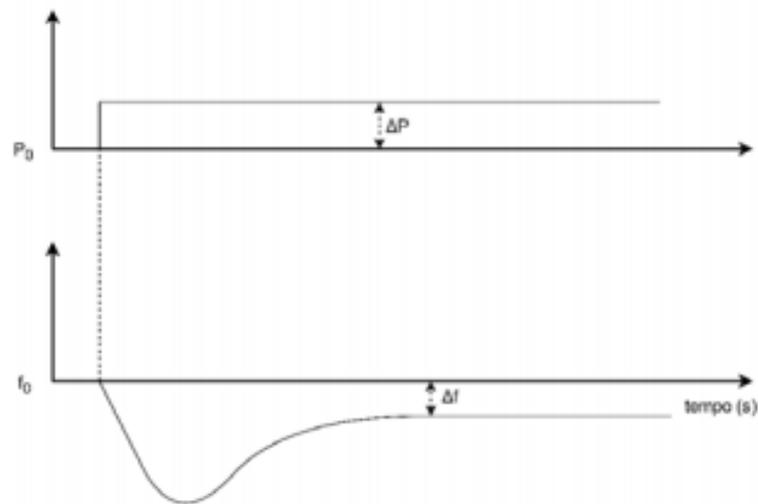


Figura 11 - Resposta no tempo de um regulador com estatismo. Fonte (MOURA, 2019).

Observa-se, na figura 11, que a unidade aumenta a geração para atender à variação de carga  $\Delta P$ , mantendo o equilíbrio geração-carga, mas não restabelecendo a frequência no valor inicial.

### Dispositivo de Ajuste de Velocidade

O dispositivo de regulação ou de controle de velocidade, ou variador de velocidade, é responsável pela chamada regulação secundária ou suplementar. A regulação secundária é feita por um equipamento eletrônico chamado controlador de frequência, cuja filosofia de operação é a frequência constante (*flat frequency*) (FF). Se

um gerador estiver operando isolado com metade da sua carga nominal, a frequência, de acordo com a figura 12, será de 59,5 Hz:

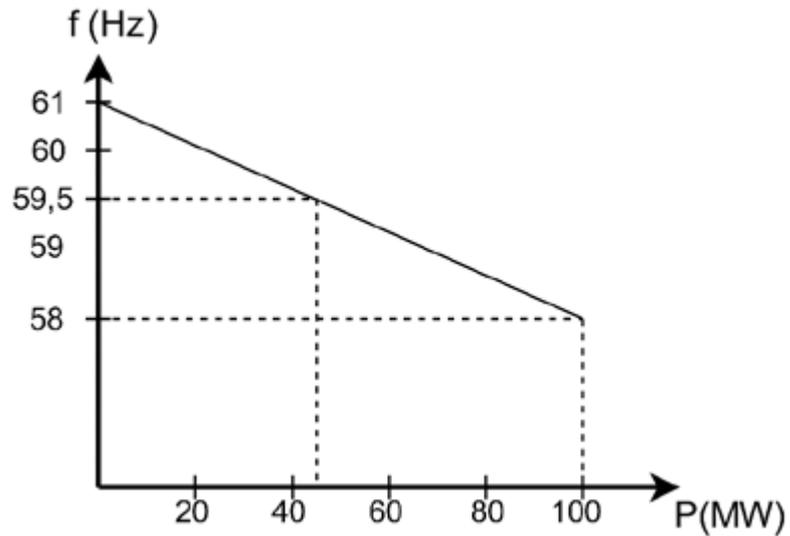


Figura 12 - Curva de estatismo com metade da carga. Fonte (MOURA,2019)

Mas a frequência normal da rede é de 60 Hz. Para atingir esse valor, é necessário que o controle de velocidade atue, de modo que a curva característica do estatismo do gerador desloque-se paralelamente à curva da figura 1.86, de maneira que, para a carga de 50 MW, a frequência volte a ser de 60 Hz, como mostra a figura 13:

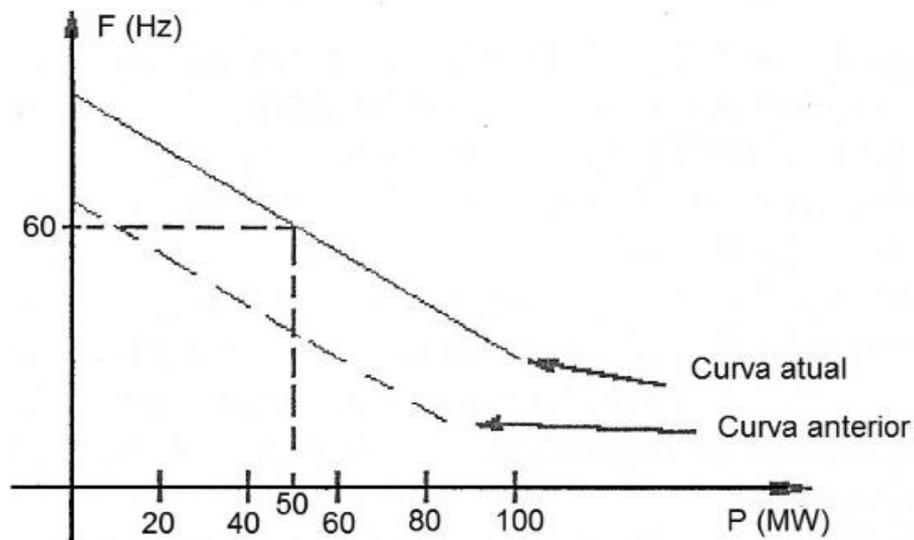


Figura 13 - Deslocamento da curva de estatismo. Fonte: (MOURA,2019)

O deslocamento da curva de estatismo, mantendo a sua inclinação, é obtida no regulador por meio de um pequeno motor chamado “motor de sincronização”. Esse motor é comandado por uma chave com duas posições, “mais rápido” e “mais lento”, localizada na mesa de comando ou no próprio painel do regulador, ou ainda, nos dois locais.

Quando o gerador está ligado em paralelo com uma rede muito grande, o efeito do variador de velocidade não é o mesmo descrito anteriormente, desde que a frequência do gerador é imposta pela rede. A regulação secundária continua com sua função de deslocar o nível da curva característica do estatismo, mas, nesse caso, a frequência permanece constante, enquanto que a potência fornecida é modificada, conforme a Figura 14:

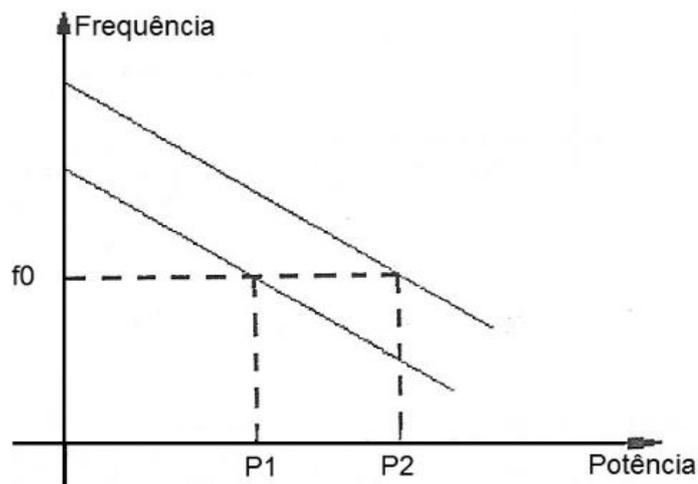


Figura 14 - Modificação na Potência. Fonte (MOURA,2019)

### **Controle de Potência Mecânica e Velocidade da Geração Eólica**

O princípio de funcionamento de turbinas eólicas é baseado em dois processos bem conhecidos.

1. A conversão de energia cinética do ar em movimento em energia mecânica. Uso da aerodinâmica das pás do rotor.

2. A conversão eletromecânica de energia por meio de um gerador que é transmitida à rede elétrica. As turbinas eólicas podem ser classificadas pelo seu controle de potência mecânica em:

#### **1) Controle Stall**

Stall passivo – quando a velocidade do vento supera a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor “descola” da superfície da pá, aumentando a força de arrasto. Devido a tal fenômeno, o sistema atua como um freio aerodinâmico, controlando a potência produzida pela turbina. Para evitar que o estol ocorra em todas as posições da pá ao mesmo tempo, o que reduziria drasticamente a potência do rotor, as pás possuem uma torção longitudinal que leva a um suave desenvolvimento do estol. Sob todas as condições de velocidade do vento superior à nominal, o fluxo em torno dos perfis das pás é, pelo menos parcialmente, deslocado da superfície, produzindo sustentações menores e forças de arrasto mais elevadas.

Stall ativo – baseia-se na alteração do eixo das pás (como no pitch), porém de forma a provocar “stall”. Acontece quando o ângulo de passo é reduzido e, conseqüentemente, o ângulo de ataque é aumentado para que a pá entre na região post-stall (apresenta efeitos turbulentos). O ângulo de trabalho tem um limite de aproximadamente  $-5^\circ$ . A ação de controle dos atuadores é menor em stall ativo do que em ângulo de passo.

## 2. Controle pitch

No controle por ângulo de passo, o ângulo varia de  $0^\circ$  até aproximadamente  $35^\circ$ , podendo atingir  $90^\circ$  para frenagem aerodinâmica. A figura 15 ilustra o efeito dos diferentes controles em termos da característica de produção de potência. A manutenção da potência em seu valor nominal à medida que aumenta a velocidade do vento se deve à movimentação das pás, o que resulta em uma redução no parâmetro  $C_p$ . Em velocidades muito elevadas o sistema é desligado para evitar danos.

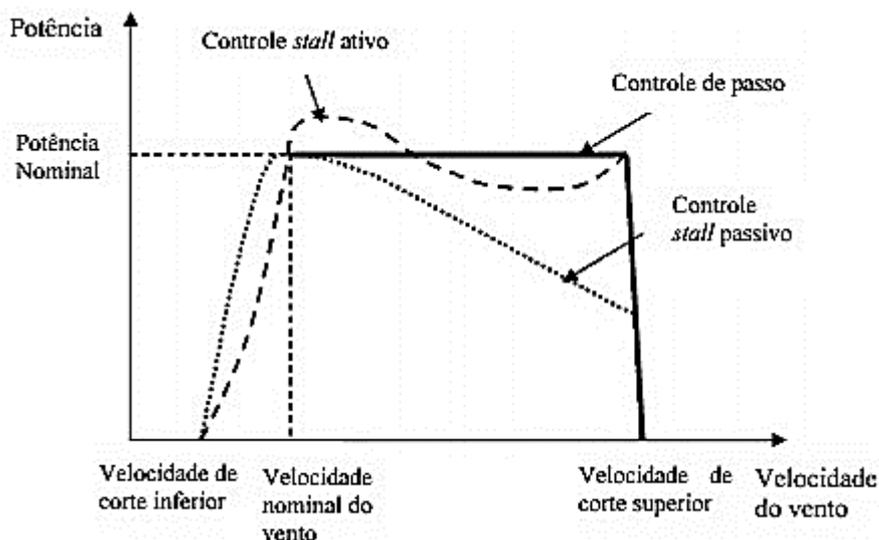


Figura 15 - Ações de controle de velocidade da turbina para controle de geração. Fonte (MOURA,2019)

As turbinas são divididas pelo seu controle de velocidade em:

1. Velocidade fixa (Tipo 1): usa gerador de indução com rotor em gaiola e turbina com regulação stall, stall ativo e pitch. Os fabricantes desse tipo de turbina são: Suzlon, Vestas, Siemens, Nordex, Ecotécnica e Made. As principais vantagens dessas turbinas são: simplicidade, robustez e baixo custo. As desvantagens são: funcionamento a velocidade constante e carga mecânica elevada para a maioria dos regimes de ventos.

2. Velocidade variável limitada (Tipo 2): usa gerador de indução com rotor bobinado e resistência de rotor controlada e controle de pitch. Os fabricantes desse tipo de turbina são: Suzlon, Vestas e Gamesa. As principais vantagens dessas turbinas são:

melhoria da eficiência do sistema através do aumento da gama de variação de velocidade. As desvantagens são: gama de variação da velocidade reduzida e dissipação da potência extraída do rotor na resistência variável.

3. Velocidade variável (conversor variável) (Tipo 3): conhecido como gerador de indução com dupla alimentação. Usa gerador de indução com rotor bobinado e conversor de frequência com processamento parcial de potência de 20 % a 30 % da potência nominal do gerador, no circuito do rotor. O conversor realiza a conversão da potência reativa e uma conexão suave à rede. Os fabricantes desse tipo de turbina são: Suzlon, Vestas e Gamesa, Nordex, GE e Ecotécnica. As principais vantagens são: aumento da eficiência, melhoria da qualidade de energia produzida, controle da potência ativa e reativa, atrativo do ponto de vista econômico. As desvantagens são: sistema de proteção do conversor (crowbar) contra correntes elevadas de defeito no rotor Utilização de anéis coletores para transferir a potência do rotor para o conversor.

4. Velocidade variável completa (Tipo 4): usa gerador síncrono com conversor de potência com potência projetada para a potência nominal da máquina ou gerador síncrono de ímãs permanentes e controle de pitch. Os fabricantes são: Enercon, GE, Siemens, Made, Leitner e Jeumont. As principais vantagens dessas turbinas são: aumento da eficiência, melhora da qualidade de energia produzida, melhora do controle da potência ativa e reativa, ausência de anéis coletores e possível ausência da caixa de velocidade. As desvantagens são: custo elevado e perdas no conversor.

5. Uma máquina síncrona diretamente conectada à rede (Tipo 5): conversor de torque mecânico entre o eixo de baixa velocidade do rotor e o eixo de alta velocidade do gerador controla a velocidade síncrona.

## **2.6. Curva de Capabilidade do Gerador**

A curva de capabilidade é associada com os limites físicos dos dispositivos do gerador síncrono. Esses limites definem a região de operação do gerador, considerando a análise em regime permanente. Os principais limites da curva de capabilidade são: limite térmico dos enrolamentos de campo, limite da potência da máquina primária, limite térmico dos enrolamentos do estator, limites de estabilidade permanente teórico e prático e limite mínimo da corrente de excitação. Para calcular esses limites, precisamos das equações de potência gerada. Temos:

$$a = \frac{|E_{fd}||V_1|}{X_d} \quad (29)$$

$$b = \frac{|V_1|^2}{2} \left( \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right)$$

$$c = \frac{|V_1|^2}{2} \left( \frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right)$$

Portanto,

$$\begin{aligned} P_G &= a \sin \beta + b \sin 2\beta \quad W/fase \\ Q_G &= a \cos \beta + b \cos 2\beta - c \quad Var/fase \end{aligned} \quad (30)$$

Os limites térmicos dos enrolamentos de campo, potência da máquina primária e térmico dos enrolamentos do estator definem a operação do gerador na região de sobre-excitação, ou seja, na região de geração de reativos. Os geradores das centrais hidroelétricas, normalmente, atuam nessa condição de operação.

#### **Limite térmico dos enrolamentos de campo**

O limite térmico dos enrolamentos de campo é determinado pela corrente máxima que os enrolamentos do rotor podem suportar sem que ocorra danos a eles. Como a corrente de campo máxima é proporcional à tensão induzida, esse limite é definido como o lugar geométrico da tensão induzida máxima. Temos:

$$\begin{aligned} S_G^2 &= P_G^2 + Q_G^2 = (a \sin \beta + b \sin 2\beta)^2 + (a \cos \beta + b \cos 2\beta - c)^2 \\ &= a^2 + b^2 + 2abc \cos \beta - 2acc \cos \beta - 2bcc \cos 2\beta + c^2 \end{aligned} \quad (31)$$

Realizando-se manipulações algébricas, temos:

$$S_G^2 = P_G^2 + Q_G^2 = a^2 + (b + c)^2 + 2abc \cos \beta - 2c(ac \cos \beta + bc \cos 2\beta) \quad (32)$$

Utilizando a expressão:

$$Q_{aux} = Q_G + b + c \quad (33)$$

E multiplicando por 2c a expressão, temos:

$$P_G^2 + (Q_{aux} - (b + c))^2 = a^2 + (b + c)^2 + 2abc \cos \beta - 2cQ_{aux} \quad (34)$$

Desenvolvendo a soma dos quadrados e reunindo os termos, temos:

$$P_G^2 + Q_{aux}^2 = a^2 + 2bQ_{aux} + 2abc \cos \beta \quad (35)$$

Definindo:

$$W^2 = P_G^2 + Q_{aux}^2 \quad (36)$$

Onde:

$$\begin{aligned} P_G &= W \sin \beta \\ Q_G &= W \cos \beta \end{aligned} \quad (37)$$

Substituindo as equações, temos:

$$W^2 = a^2 + 2bW \cos \beta + 2abc \cos \beta \quad (38)$$

E a raiz é:

$$W = a + 2c \cos \beta \quad (39)$$

A equação (12) é conhecida como Limaçon (ou caracol) de Pascal e representa o limite térmico da corrente de campo.

### **Limite da potência mecânica da máquina primária**

A potência mecânica máxima é representada no plano P-Q com uma reta paralela ao eixo Q, que passa pelo ponto:

$$P_{mecMAX} = kS_{nominal} \quad (40)$$

Onde k é uma constante.

### **Limite térmico dos enrolamentos do estator**

O limite térmico dos enrolamentos do estator é determinado pela corrente máxima que os enrolamentos do estator podem suportar e é o lugar geométrico para a corrente do estator máxima constante, de acordo com a equação abaixo:

$$(V_1 I_{aMAX}^*)^2 = P_G^2 + Q_G^2 \quad (41)$$

Para a operação do gerador na região de subexcitação, ou seja, o gerador consumindo reativos, devem ser determinados os limites de estabilidade de regime permanente teórico e prático.

### **Limite de estabilidade teórico e prático**

Utilizando a identidade  $\cos 2\beta + 2b(\cos \beta)^2 - 1$ , temos:

$$Q_G = a \cos \beta + 2b (\cos \beta)^2 - b - c \quad (42)$$

Separando o valor de  $\cos \beta$ :

$$\cos\beta = -\frac{a}{4b} \pm \sqrt{\frac{a^2}{16b^2} + \frac{Q_G + b + c}{2b}}$$

Utilizando as relações anteriormente trabalhadas:

$$P_G^2 + (Q_G + b + c)^2 = \frac{a^2}{2} + 2b(Q_G + b + c) \pm 2ab\sqrt{\frac{a^2}{16b^2} + \frac{Q_G + b + c}{2b}} \quad (43)$$

Desenvolvendo a expressão:

$$P_G^2 = \frac{a^2}{2} + b^2 - (Q_G + c)^2 \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} + 2a^2b(Q_G + c) + 2a^2b^2} \quad (44)$$

Substituindo  $Q_{aux1} = Q_G + c$ , Para encontrar uma expressão para a potência ativa máxima em função da potência reativa, deriva-se a equação de  $P_G$  acima em função de  $Q_{aux1}$  e iguala-se a zero, temos:

$$-2Q_{aux1} \pm \frac{1}{2} \left( \frac{a^4}{4} + 2a^2bQ_{aux1} + 2a^2b^2 \right)^{-\frac{1}{2}} 2a^2b = 0 \quad (45)$$

Separando no primeiro membro o termo da raiz quadrada e substituindo a equação 44, temos:

$$\pm \left( \frac{a^4}{4} + 2a^2bQ_G + c \right)^{-\frac{1}{2}} = \pm \frac{a^2b}{2(Q_G + c)} \quad (46)$$

Substituindo na equação 43, temos:

$$P_{Gmax}^2 = \frac{a^2}{2} + b^2 - (Q_G + c)^2 \pm \frac{a^2b}{2(Q_G + c)} \quad (47)$$

$$P_{Gmax} = \sqrt{\frac{\left(\frac{a^2}{2} + b\right) 2(Q_G + c) - 2(Q_G + c)^3 + a^2b}{2(Q_G + c)}}$$

Para calcular o limite prático é comum deixar uma margem de estabilidade disponível:

$$P_{Limite\ Práico} = P_{Limite\ Teórico} - k1(P_{nominal}) \quad (48)$$

Onde k1 varia entre 0.1 a 0.2

## Limite mínimo da corrente de excitação

O lugar geométrico no plano P – Q corresponde à corrente de excitação zero, que pode ser construído diretamente quando o Limaçon de Pascal possui excitação zero, ou seja, quando  $E_{fd} = 0$ . Na prática, a corrente de campo dos geradores é reduzida até um valor mínimo de 5 % da corrente nominal. O lugar geométrico corresponde à circunferência de raio b e traçado entre os limites mínimo e máximo de QG, de acordo com a equação abaixo:

$$b_2 = P_G^2 + Q_G^2 \quad (49)$$

Com os limites definidos, a curva de capacidade pode ser traçada, conforme a figura 16:

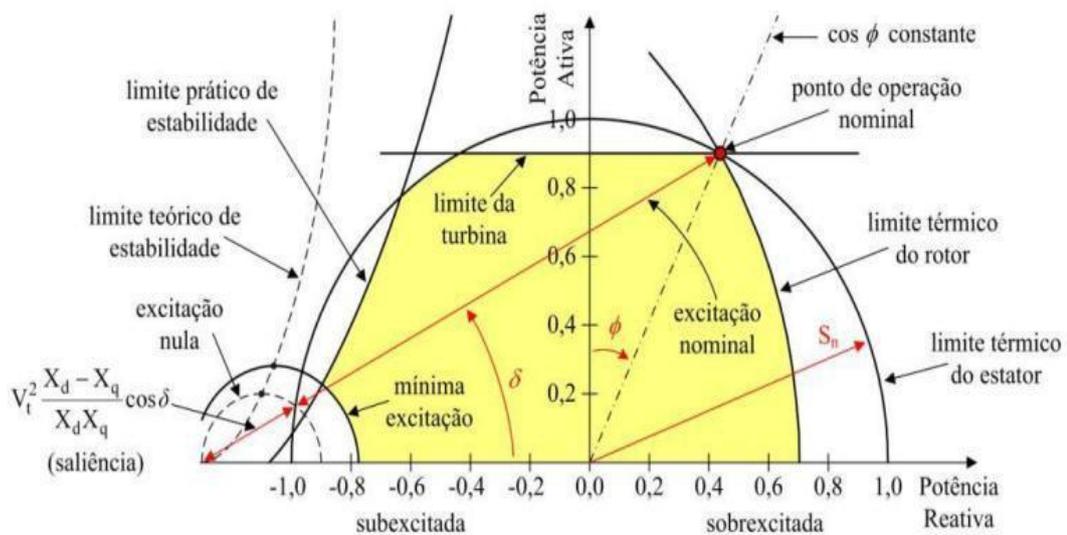


Figura 16 - Curva de Capacidade. Fonte: (BERTINETI, 2014)

## 2.7. Estado da Arte

Nos últimos anos, estudos sobre bancadas experimentais foram realizados por diferentes grupos de pesquisa. (FILHO ,2011) desenvolveu subsistemas eletrônicos e computacionais para acionamento, automação e controle, resultando em uma plataforma didática, a partir da modelagem de um sistema de geração de 10kVA, composto por uma máquina CC acoplada à um gerador síncrono e transformadores, ambientado no Laboratório de Engenharia Elétrica da UFPA.

Outro estudo foi realizado por (JUNIOR, 2015), onde o mesmo desenvolveu em bancada experimental, um sistema multiconversor baseado em microrrede com barramento em corrente contínua e conversores estáticos CC-CC e CC-CA com a utilização de três conversores estáticos, onde dois são de topologia tipo *buck* e o outro é um inversor trifásico. Para este caso, um conversor alimenta o barramento de corrente contínua com tensão controlada, sendo este responsável por fornecer tensão para o segundo conversor, onde é realizada uma estratégia de controle de tensão a fim de se manter a potência constante. O inversor também é alimentado através do barramento CC, podendo ser conectado à rede elétrica, permitindo a realização dos estudos com sistemas interligados à geração distribuída.

Outro projeto, desenvolvido por (ROCHA,2008), apresentou uma bancada experimental composta por uma máquina de indução trifásica do tipo gaiola de esquilo, acionada por um conversor comercial sendo controlada por um microcomputador em tempo real, a fim de emular o funcionamento de uma turbina eólica. (ROCHA,2008) reproduziu os efeitos causados por variações na dinâmica do vento, fenômenos aerodinâmicos, mecanismos de controle de passo das pás e características do sistema de transmissão.

Enquanto que (MORAES, 2011) desenvolveu e implantou um sistema com estratégias de controle digital para regulação automática de tensão e amortecimento de oscilações em uma bancada experimental em escala reduzida de 10kVA, localizada no Laboratório de Controle de Sistemas de Potência (LACSPOT) da UFPA.

A principal diferença dentre os estudos previamente realizados e o estudo desenvolvido nesta dissertação é a forma que a eletrônica foi empregada. O controle feito por (MORAES,2011) foi realizado através de Reguladores Automáticos de Tensão (RAT) e Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP). As malhas de controle foram embarcadas em microcontroladores de alto desempenho. Já o controle desenvolvido nesta dissertação se dá através do controle da tensão de saída no inversor. A medição dos sinais proposta por (MORAES,2011) é muito semelhante ao proposto na Bancada Dinâmica (BD) utilizada neste projeto, que se baseia em uma instrumentação eletrônica baseada em amplificadores operacionais para realização do condicionamento dos sinais dos sensores.

### 3. Bancada Dinâmica

#### 3.1 Elementos da Bancada Dinâmica

A figura 17 ilustra modelo esquemático bancada de simulação utilizada para estudo da instrumentação eletrônica para monitoração de máquinas elétricas rotativas. É composta de um Gerador síncrono Trifásico da WEG modelo GTA160SI13 de 4 pólos, classe de isolamento H, fator de potência de 0.8, baixa tensão, 60 Hz 1800 rpm, 21 kVA (16,8kW) para ligação de 220 – 240 V .e por um Motor CC de 20 CV, 260V, 63 A, 2500 rpm (acionado por um conversor CA/CC), ambos acoplados.

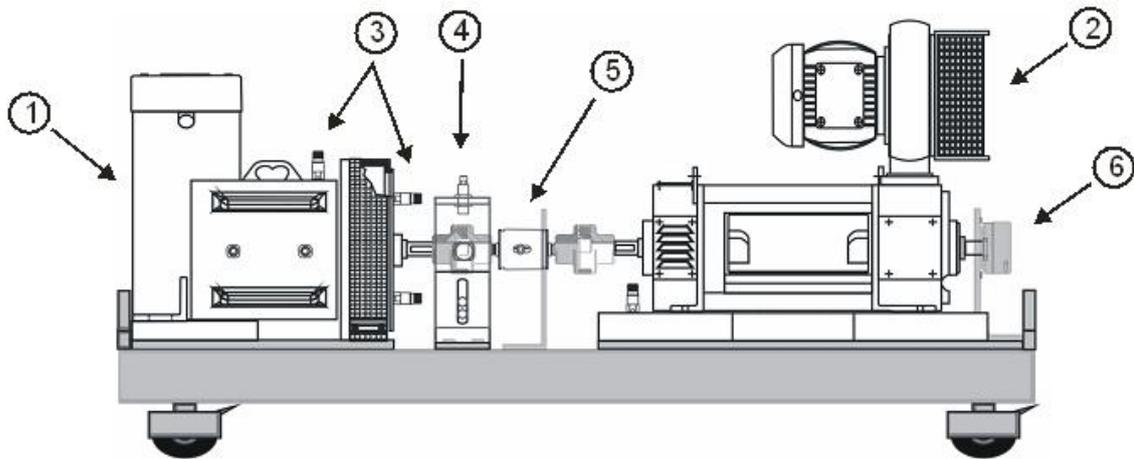


Figura 17 - Modelo Esquemático da Bancada Dinâmica

E a figura 18 apresenta a bancada física:



Figura 18 - Bancada Dinâmica

Elementos: Motor CC, Gerador Síncrono, acelerômetros, Sensor de Torque, Sensor de Velocidade, Sensor de proximidade, Conversor CTW 04 e inversor CFW09.

A descrição dos sensores utilizados na bancada foi mencionada no capítulo referente aos sistemas supervisórios.

### 3.2. Comando e Proteção

O comando e proteção da bancada foi realizado considerando todas as proteções necessárias para o operador. A figura 19 ilustra o esquemático do comando para utilização do conversor:

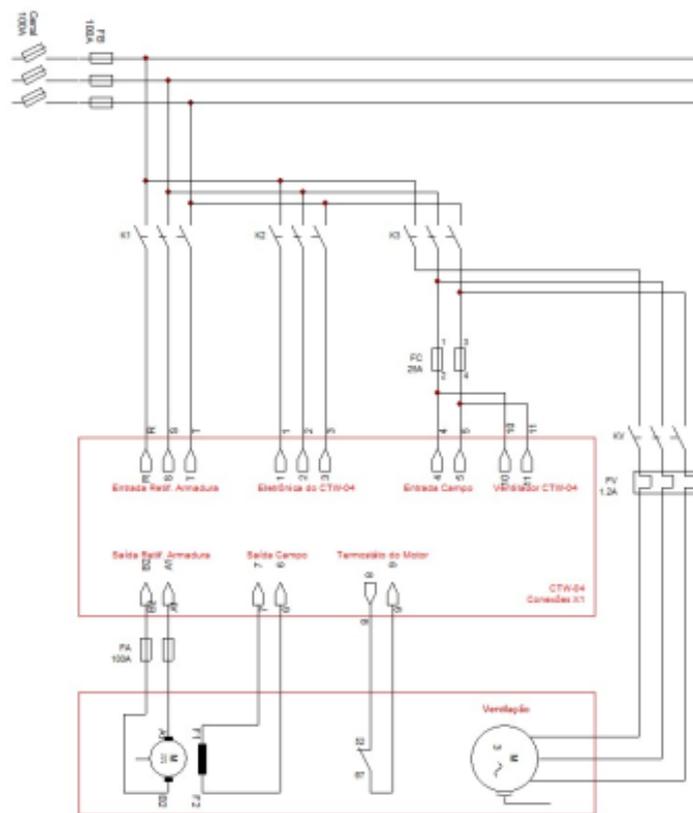


Figura 19 - Esquemático de Comando Conversor CTW04

A proteção da bancada utiliza-se basicamente de fusíveis de baixa perda e ultra-rápidos. Os fusíveis de baixa perda são de 100A, que estão na chave seccionadora de ligação da bancada, também de 100A na entrada de alimentação principal da bancada, 2 fusíveis de 100A após a armadura do motor CC, fusíveis de 25A para campo do motor e ventilação do conversor, e fusíveis de 80A para alimentação trifásica do inversor.

A bancada também conta com relé térmico para controle de temperatura do motor, contatoras para armadura do motor, campo, para funcionamento do inversor, do gerador

e da eletrônica do conversor. Além disso, foi inserido botoeira para bloqueio geral da bancada, e para habilitar as contatoras para funcionamento dos equipamentos.

### **3.3.Procedimentos de Manutenção**

#### **3.3.1. Motor CC**

GERAL

LIMPEZA / RESISTÊNCIA DE ISOLAÇÃO

**PORTA-ESCOVAS**

Limpar o porta escovas de todo pó e poeira. Checar a pressão das molas deve variar entre 200 e 250 g/cm<sup>2</sup>. Distância do porta escovas pro comutador é de 2 mm. Não mexer na posição do porta-escovas durante a limpeza.

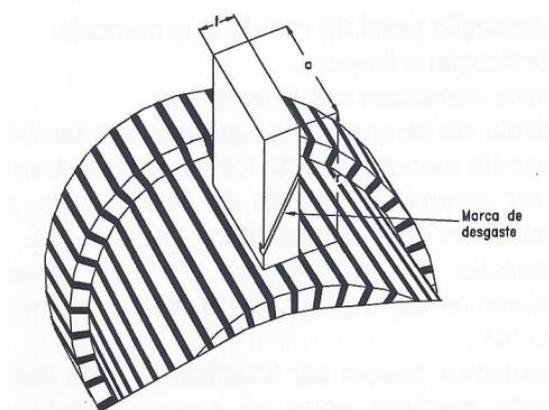
**ESCOVAS**

Certificar-se que todas as escovas sejam do mesmo tipo e qualidade.

Limpar as escovas de todo pó e sujeira, se atendendo para que não acha sujeira presa internamente nas escovas.

Verificar o estado das escovas, devendo suas cordoalhas ter o mesmo comprimento. Cordoalhas muito longas ou curtas podem atrapalhar o deslizamento da escova no comutador.

Verificar se a marcação de desgaste aceitável, mostrada na Figura 20, ainda aparece. Caso a marca não esteja mais visível, a escova deve ser trocada.



*Figura 20 - Marcação de desgaste nas escovas.*

Caso haja a necessidade de trocar as escovas, as mesmas devem ser trocadas preferencialmente por outras de mesmo material, quantidade e qualidade. Escovas de tipos diferentes não podem ser misturadas, e na necessidade de trocar as escovas por outras de tipo diferente deve-se fazê-lo sob a orientação da WEG. Na troca, a patina no

comutador (ver mais no tópico “X. Comutador”) só deve ser removida caso ela não esteja em condições normais ou caso a substituição das escovas seja por outra de material diferente.

## **COMUTADOR**

Os sulcos entre as lâminas devem ser limpos de toda poeira.

Remover do comutador óleo ou graxa presentes utilizando um solvente adequado. Deve-se tomar cuidado para não confundir graxa com a pátina resultante do desgaste das escovas sobre o comutador.

A patina é formada a partir do desgaste das escovas, que geram pó, junto de umidade. A presença dele em bom estado no comutador é fundamental para o bom funcionamento do motor, proporcionando uma área de melhor condução elétrica entre o comutador e as escovas e uma área de menor atrito por onde estas podem deslizar facilmente. Porém, dependendo de sua condição no comutador, ele pode ter efeitos adversos.

Em condições normais de operação, a patina que se forma no comutador terá uma coloração marro escura ou levemente negra. Se a superfície está brilhante, lustrosa ou áspera, é provável que o tipo de escovas deve ser trocado. Uma coloração negra e espessa, formada normalmente em situações de sobrecarga prolongada, indica uma deposição excessiva do material no comutador. A patina deve ser cuidadosamente observada, uma vez que seu aspecto é um ótimo indicador de possíveis problemas mecânicos, elétricos e térmicos na zona de comutação e do motor no geral. A tabela de ajuste das patinas, em anexo, mostra diversos aspectos da patina e suas possíveis causas.

O desgaste nas pistas do comutador deve ser uniforme ao longo da periferia do comutador. Caso o desgaste não seja uniforme deve-se contatar imediatamente a WEG.

O desgaste é medido na posição da pista das escovas em relação à pista não utilizada. Sempre que esta diferença for superior à 0,1 mm o comutador deverá ser reconicionado. Se a diferença de altura entre lâminas adjacentes for superior à 0,1 mm o comutador deve ser reparado. A ovalização geral do comutador não deve ser superior à 0,1 mm. Consultar o manual para mais detalhes sobre o processo de condicionamento.

## **ROLAMENTOS**

Os rolamentos para máquinas de altura de eixo até 132 tem lubrificação permanente, necessitando a substituição completa do rolamento no final da vida útil do lubrificante. A vida útil do lubrificante é medida em horas de trabalho, com essas horas variando dependendo da velocidade de trabalho contínuo, como mostra a tabela abaixo:

Tabela – Vida útil em horas da graxa de lubrificação dos rolamentos.

VIDA ÚTIL EM HORAS DA GRAXA DE LUBRIFICAÇÃO PARA ROLAMENTOS TIPO 6308-2RS DE CARCAÇA 132 – MÁQUINAS ABERTAS									
MODO DE OPERAÇÃO	ROTAÇÃO								
	500	600	750	1000	1200	1500	1800	2400	3000
EIXO NA HORIZONTAL	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	16000	12000
EIXO NA VERTICAL	20000	20000	20000	20000	20000	17000	13000	10000	7500
VIDA ÚTIL EM HORAS DA GRAXA DE LUBRIFICAÇÃO PARA ROLAMENTOS TIPO 6308-2RS DE CARCAÇA 132 – MÁQUINAS FECHADAS									
MODO DE OPERAÇÃO	ROTAÇÃO								
	500	600	750	1000	1200	1500	1800	2400	3000
EIXO NA HORIZONTAL	20000	18000	13500	11500	9000	7000	5500	4000	3000
EIXO NA VERTICAL	14500	11500	9000	7000	5500	4500	3500	2500	2000

Como o Motor CC da Bancada Dinâmica é utilizada para experimentos diversos, não ficando em serviço por longos períodos de tempo e/ou em velocidades fixas, é difícil estimar as horas de serviço com relação à vida útil da graxa.

Caso o motor esteja fora de uso por um período maior que 6 meses, é provável que o rolamento tenha que ser substituído, embora o estado do rolamento só possa ser verificado com testes de vibração e temperatura com o motor em funcionamento.

Caso haja a necessidade de trocar o rolamento, consultar o manual.

## **VENTILADOR**

Limpar filtros de ar. Filtros de malha grossa (filtros de metal) devem ser limpos com jatos de ar ou lavando o filtro com solventes. Os filtros de malha fina (com capas de fibra) podem ser lavados em água (40°, contendo detergente de roupa normal) ou jato de ar. Caso haja pó com graxa nos filtros, será necessário lavá-los com gasolina, tricorileno ou água contendo aditivo P3. Evite torcer ou escorregar o filtro. Todos os filtros devem ser secados depois da limpeza, devendo estarem completamente secos antes de serem utilizados novamente. Na desmontagem do motor, deve ser observado se não há nenhum

tipo de detrito próximo do eixo do ventilador ou nas vias de circulação de ar que possam atrapalhar o fluxo de ar.

## **DESMONTAGEM/MONTAGEM DO MOTOR CC**

A ordem para a desmontagem do motor é:

1. Primeiramente retirar o conjunto de ventilação;
2. Retirar o Tacogerador;
3. Proteger o comutador com cartolina ou similar a fim de que não se danifique durante a desmontagem;
4. Retirar o anel de fixação externo traseiro, soltar a tampa externa traseira e sacá-la;
5. Retirar o rotor juntamente com a tampa dianteira, do interior do motor.

Ao se realizar o teste de aplicação da tensão/corrente nominal no campo e armadura (um por vez) com o motor parado, caso haja vibração no motor então há um desbalanço elétrico presente, podendo as causas serem mal ajuste da zona neutra, bobinas de campo e/ou armadura partidas, escovas com desgastes anormais. Caso o problema só ocorra com o motor girando então o problema provavelmente é mecânico, embora ainda pode ser de origem elétrica.

### **3.3.2. Gerador**

Para realizar os procedimentos de desmontagem e montagem do gerador é necessário primeiramente conhecer a lista de peças assim como também possuir as ferramentas adequadas que serão utilizadas no processo, conforme mostra a tabela abaixo:

ITENS	DISCRIMINAÇÃO	QUANT.	OK
01	Chave de boca 4mm	1	
02	Chave de boca 6mm	1	
03	Chave de boca 14mm	1	
04	Chave de boca 24mm	1	
05	Chave de caixa No. 19	1	
06	Chave de caixa 15/16"	1	
07	Chave de caixa 9/16"	1	
08	Chave Allen 1/8 mm	1	
09	Chave Allen 5/32 mm	1	
10	Chave Catraca	1	
11	Chave de fenda	1	
12	Alicate	1	
13	Saca Polia com 3 Garras	1	
14	Peça de Prolongamento do saca polia	1	

15	Extrator de Rolamento de 3 fusos	1	
16	Tubo de Aço com Parafuso	1	
17	Garra para o Tubo de Aço com Parafuso	1	
18	Tubo de Aço Pequeno	1	
18	Olhal	2	
20	Paquímetro	1	
21	Marreta (menor que 1Kg) ou Martelo de borracha	1	
22	Lubrificante (Super Lub Loctite)	1	
23	Graxa (Polyrex EM 103)	1	
24	Girafa Hidráulica ou Talha	1	
25	Mesa	2	
26	Rolamento 6209-2RS	1	
27	Rolamento 6211-2RS	1	

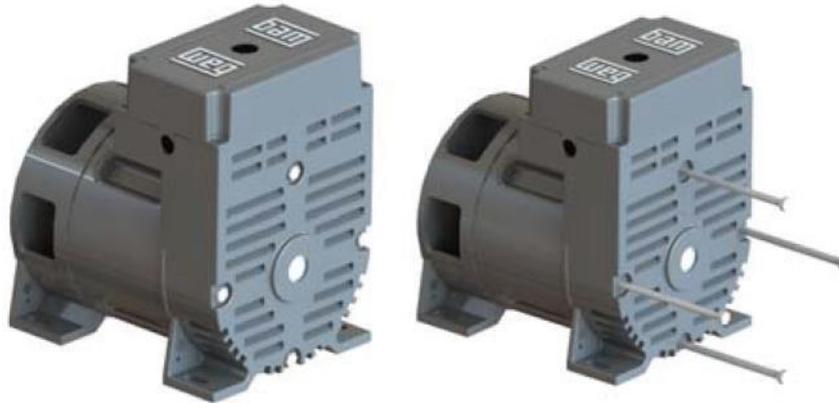
### **Desmontagem:**

- 1) Coloque o gerador na posição horizontal sobre uma base, de tal maneira que os pés e o flange fiquem aéreos, soltar os cabos das ligações principais da placa de bornes e os cabos do regulador de tensão, conforme mostra a figura abaixo:



*Figura 21 - Regulador de Tensão*

- 2) Marcar a posição do flange e da tampa traseira em relação à carcaça. Assim será garantido o alinhamento original e ideal entre as três peças;
- 3) Retirar os tirantes que fixam a tampa traseira e o flange dianteiro à carcaça. Ao retirar os tirantes, a tampa traseira e o flange estarão soltos e poderão cair, portanto, é necessário atenção, conforme mostra a figura abaixo:



*Figura 22 - Posicionamento dos tirantes*

- 4) Colocar o alternador na posição vertical, com os discos de acoplamento para cima, ao realizar isso, segure o gerador para que as tampas não soltem ao virar o gerador para a posição vertical. Por fim, retirar os discos de acoplamento;



*Figura 23 - Gerador na posição vertical: Com disco de acoplamento (esquerda) e sem disco de acoplamento (direita)*

- 5) Parafusar um olhal que possua a mesma rosca do furo do centro da ponta de eixo do rotor;

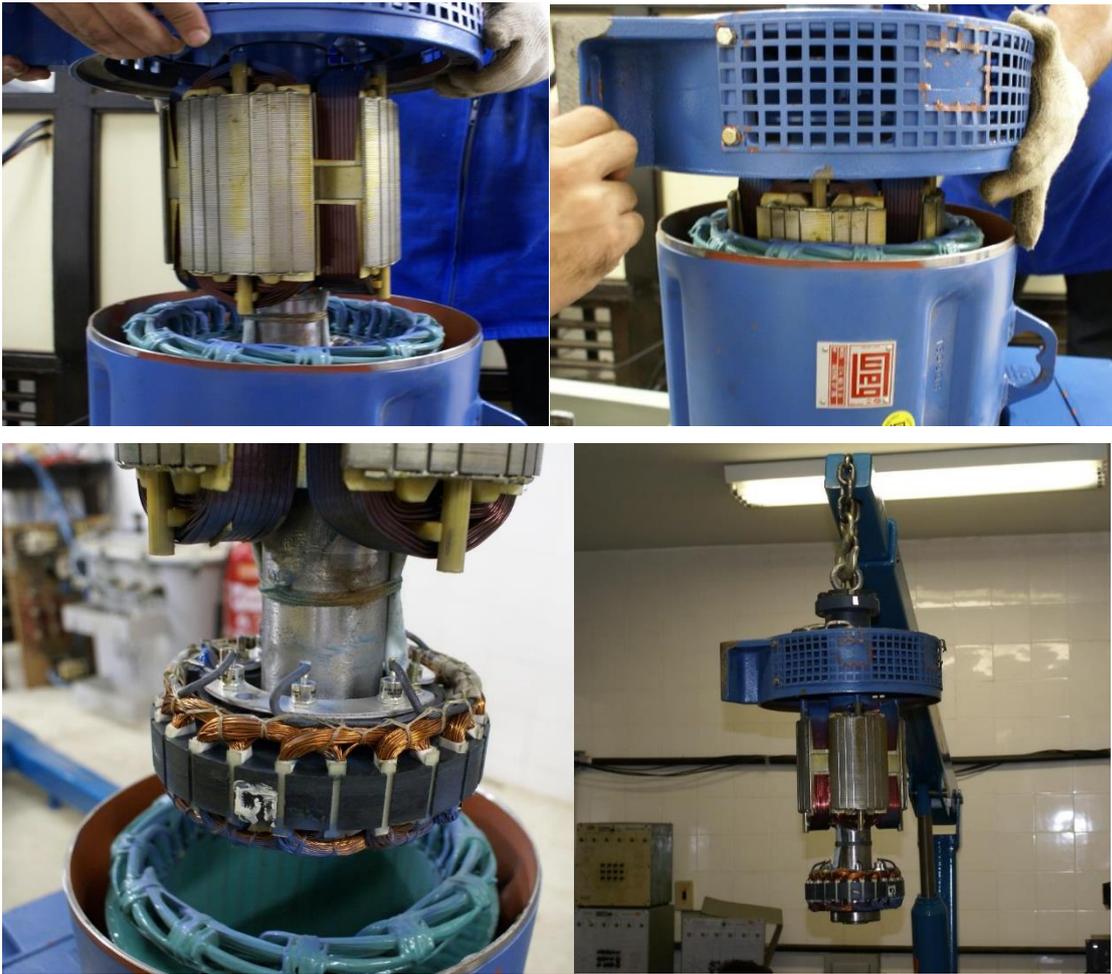


*Figura 24 - Gerador com conector olhal*

- 6) Içar o rotor cuidadosamente com o auxílio da girafa e elevando-o com uma talha, evite choques mecânicos nas bobinas do estator e do rotor:



*Figura 25 - Içando o gerador com auxílio da girafa*



*Figura 26 - Passos para remoção completa do rotor*

- 7) Utilizando um martelo de borracha, retire a tampa traseira, certificando-se que os cabos da caixa de ligação estejam todos liberados evitando assim que os mesmos sejam danificados. Da mesma forma retire o flange dianteiro.

E ao final destes passos, o gerador está desmontado.

Após isso, realizar a limpeza das partes constituintes do gerador, bem como a lubrificação do mesmo. Após isto, realizar a montagem.

### **Montagem**

- 1) Verifique se as partes usinadas de encaixe da carcaça, do flange e tampa traseira estão limpas e com proteção anticorrosiva;
- 2) Com a carcaça colocada horizontalmente sobre uma base plana, alinhe a marcação da tampa traseira e do flange dianteiro com a marcação da carcaça e encaixe as,

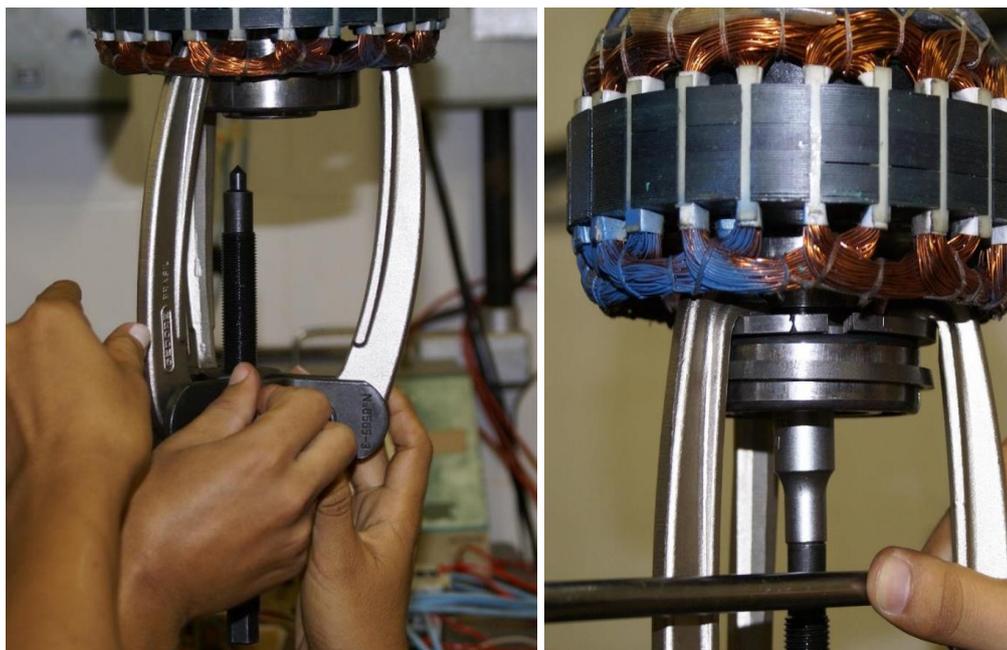
tomando os devidos cuidados com os cabos do estator principal e do estator da excitatriz para não os danificar;

- 3) Fixe o flange e a tampa traseira com os tirantes de fixação correspondentes;
- 4) Coloque o gerador na posição vertical com o lado do flange para cima;
- 5) Insira o rotor completo no interior da carcaça, tomando os devidos cuidados para não danificar as bobinas do rotor da excitatriz e do rotor principal;
- 6) Coloque o gerador na posição horizontal;
- 7) Certifique-se de que o rolamento esteja devidamente encaixado no assento e que o anel o´ring esteja na posição correta;
- 8) Faça as ligações dos cabos principais à da placa de bornes, e as ligações do regulador de tensão;
- 9) Certifique-se de que todas as ligações dos cabos principais, regulador de tensão e excitatriz estejam corretos.

Outro aspecto importante da montagem e desmontagem do gerador, é a substituição dos rolamentos, um componente muito importante dos geradores elétricos:

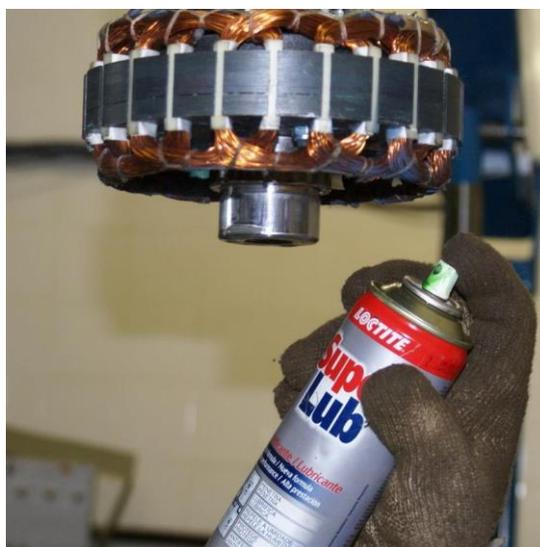
Após seguir os passos de desmontagem 1 a 7, é possível realizar a troca dos rolamentos.

Para remover o rolamento preso a ponta de eixo traseira é necessário o auxílio do dispositivo de sacar rolamento. Ao remover o rolamento este deve ser imediatamente descartado. As garras do extrator deverão ser aplicadas sobre a face lateral do anel interno do rolamento a ser desmontado ou sobre uma peça adjacente, conforme mostra a figura abaixo:



*Figura 27 - Encaixe do extrator de rolamentos (esquerda) e remoção do rolamento (direita)*

Rolamentos novos somente deverão ser retirados da embalagem, no momento de serem montados. Antes da montagem os assentos do eixo devem ser limpos e levemente lubrificados afim de facilitar o encaixe do novo rolamento. Assim como será necessário corrigir quaisquer sinais de rebarba ou pancadas no assento do rolamento no eixo.



*Figura 28 - Lubrificação do assento do eixo*

As graxas utilizadas para a lubrificação devem ser compatíveis, a fim de evitar deterioração das mesmas e conseqüentemente dos rolamentos.

Os rolamentos não podem receber golpes diretos durante a montagem. Recomenda-se que sejam aquecidos à uma temperatura entre 50°C e 100°C para facilitar a montagem.

Os rolamentos não devem ser submetidos a pancadas, quedas, armazenagem com vibração ou umidade, pois podem provocar marcas nas pistas internas ou nas esferas, reduzindo sua vida útil. O apoio para prensar o rolamento deve ser aplicado sobre o anel interno.

## 4. Arranjo Experimental

### 4.1. Condições de Contorno do Sistema

Para definição dos parâmetros utilizados, tanto para o inversor, quanto para o conversor, analisou-se todas as variáveis e fatores físicos, que limitam a capacidade do sistema.

Como característica do próprio inversor, o modelo CFW-09 foi totalmente designado para operar com controle de máquinas, logo, este inversor espera em sua saída o equivalente ao circuito de uma máquina. Portanto, foi proposto a utilização de um circuito RL, composto por resistores de  $2,75\Omega$  com potência de 1kW e indutâncias de 2,5mH, conforme mostra a figura 29:



Figura 29 - Carga RL alimentada pelo inversor

E, na figura 30, têm-se a chapa de identificação dos indutores utilizados:



Figura 30 - Chapa de identificação dos indutores

Na figura acima, é possível observar o primeiro fator limitante imposto pela configuração utilizada, neste caso, levando-se em conta que a capacidade de condução de corrente do indutor é de 35A. Também associado à carga, temos o resistor utilizado. A partir da potência do resistor e do valor de sua resistência, o valor de corrente suportado por cada resistência é de 19,06A. Como a configuração trabalha com 3 resistores em série por linha, o valor de corrente suportado é de, aproximadamente, 57A por fase.

Além disso, sabe-se, do manual do inversor CFW-09, que o mesmo é capaz de entregar até 54A por fase à carga. Também foi levado em conta a utilização do cabeamento para conexão entre as cargas, que é de 6mm<sup>2</sup>, tendo o valor máximo suportado de corrente de 30A. Logo, de todos os parâmetros analisados para determinação das limitações do sistema, o menor valor de capacidade de condução de corrente, encontrado dentre os elementos constitutivos da bancada, foi o do condutor.

Portanto, como medida de segurança, a proposta foi realizada de modo que cada fase do inversor entregue, no máximo, 30A de corrente por fase. Logo, para este valor de corrente, e considerando a impedância da carga (resistência e indutância), espera-se um valor de tensão na carga de  $82,57V_{Fase}$   $143,01V_{Linha}$ , desconsiderando o aumento da impedância de acordo com a variação da frequência. Após conhecer os parâmetros esperados na saída do inversor, relacionado com a entrada, é possível realizar a parametrização customizada da curva V/F do inversor, que será visto no tópico seguinte.

Para leitura dos sinais obtidos, utilizou-se o Osciloscópio da Agilent Technologies, modelo DSO X 2012A, conforme mostra a figura 31:

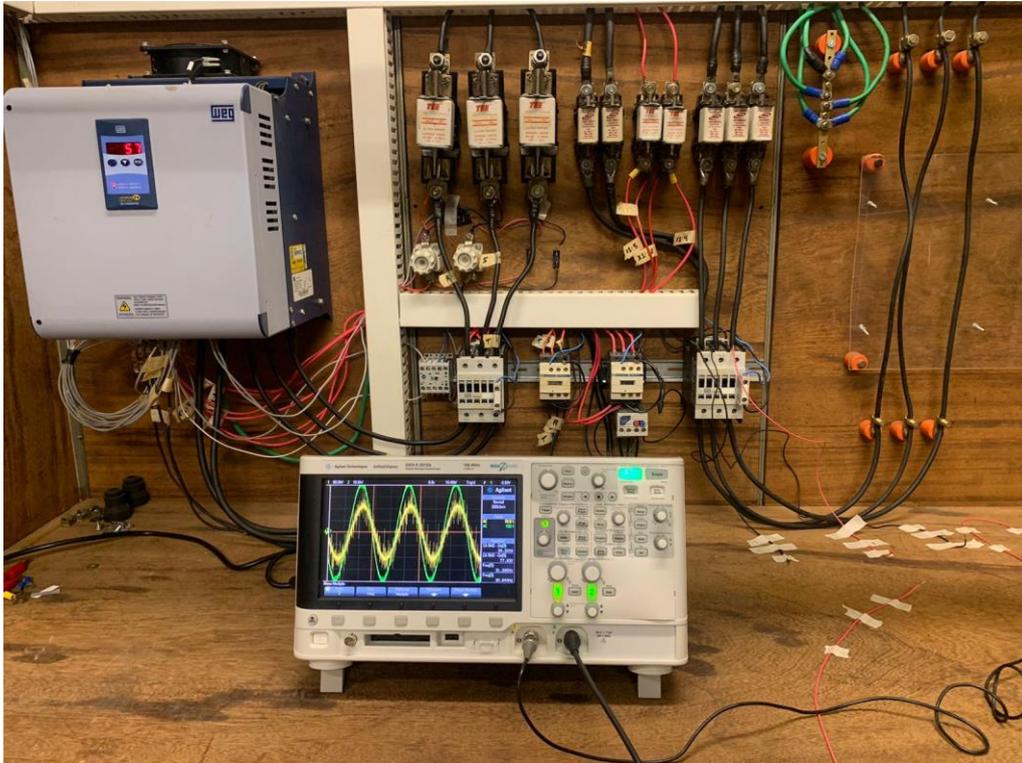


Figura 31 - Osciloscópio utilizado para leitura dos sinais.

#### 4.2. Parametrização da Curva V/F “Customizada” do Inversor

É sabido que o inversor CFW 09 possui 4 modos de programação. Para esta aplicação, o modo utilizado foi o Modo de Operação com a Curva V/F Ajustável, definindo o parâmetro do inversor  $P202 = 2$ , conforme mostra a figura 32:

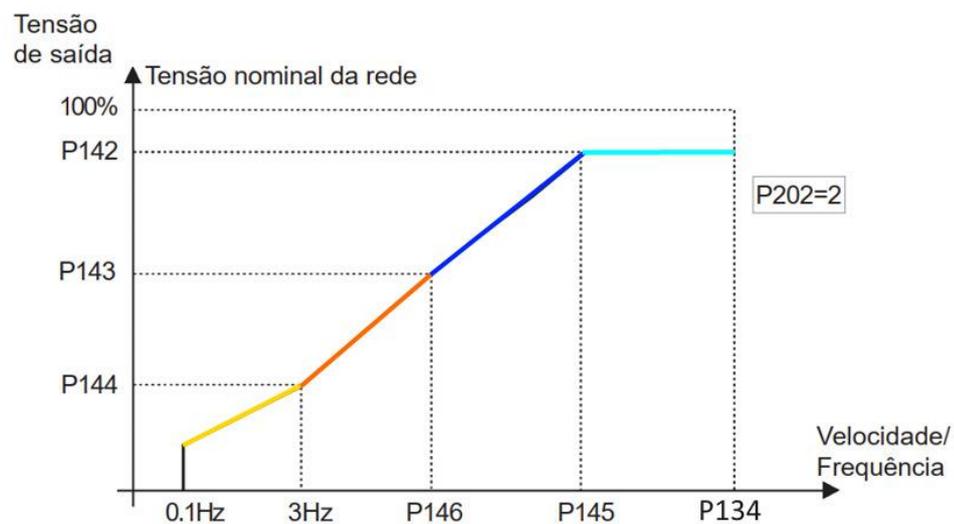


Figura 32 - Curva V/F Ajustável do Inversor. Fonte: Autor

A proposta deste modo de operação do inversor, é trabalhar em uma região linear onde é possível variar linearmente a tensão de saída do inversor com a frequência do mesmo. No entanto, para esta aplicação, não é válido que se tenha uma variação significativa da frequência, uma vez que a carga a ser alimentada é uma carga RL, logo, como a indutância varia com a frequência, a impedância total da carga sofreria alterações, causando imprecisões nos valores lidos.

Como o objetivo desta dissertação é apresentar uma variação de corrente na carga, sem alterar o perfil desta carga, se mostrou necessário a realização de uma “customização” desta curva V/F, uma vez que, deseja-se apenas variar a tensão de saída para se controlar a corrente de saída, pois, o controle desta variação se torna muito mais apurado, ao se ter apenas uma variável para alterar, mantendo, para este caso, a frequência constante, ou o mais próximo possível disto

Para se ter como base, a figura 33 apresenta a curva que representa a variação da impedância da carga RL, para uma frequência de 0 a 60Hz. É possível observar que, em 30Hz, a impedância da carga é de  $2,79\Omega$ , o que fornece uma corrente de 30A, conforme desejada. Para este caso, a tensão de linha calculada é de  $145V_{Linha}$ .

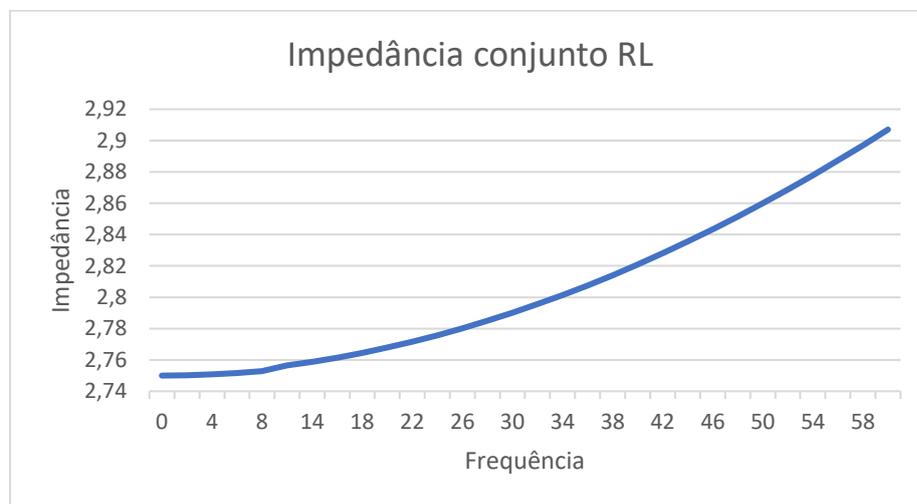


Figura 33 - Variação da Impedância de uma carga RL

Portanto, a figura 34, apresenta a Curva V/F “Customizada”, onde, é possível observar uma região crescente com uma reta quase linear, nos intervalos de velocidade de 3500 a 3700RPM, onde, a frequência, varia apenas de 29.16Hz à 30.83Hz, pouco variando a impedância da carga. Já a tensão de saída, apresenta uma variação de 0 a  $82,57V_{Fase}$  ou  $143,01V_{Linha}$  ( $145V_{Linha}$  para 30A). A figura 33 é apresentada a seguir:

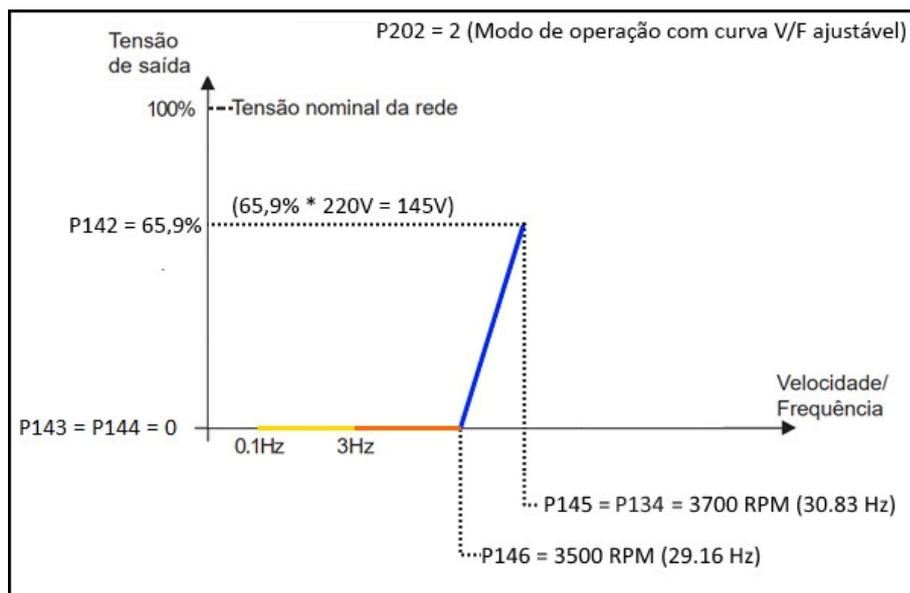


Figura 34 - Curva V/F "Customizada". Fonte: Autor

Na figura 34, temos os seguintes parâmetros do inversor que influenciam na curva V/F “Customizada”, e seus respectivos valores:

P142 – Tensão de saída máxima – Definido em 65,9%, pois, a tensão nominal da “rede” (neste caso, alimentada pelo gerador) esperada é de 220V, e 65,9% desta tensão equivale a uma tensão de  $145V_{Linha}$ , o que garante os 30A como corrente máxima desejada;

P143 – Tensão de saída intermediária – Definida como 0 para se manter um controle isolado do inversor, mantendo-se a frequência praticamente constante, apenas sendo permitido variar a tensão máxima de saída P142

P144 – Tensão de saída em 3Hz – Definida como 0, pela mesma razão que se definiu o parâmetro P143;

P145 - Velocidade de Enfraquecimento de Campo - 3700RPM, pois é a velocidade máxima que foi definida para operação, pois além deste valor, não se tem o controle linear da tensão, por este motivo, ele é o ponto limite de operação da curva V/F customizada. Pela curva V/F natural, acima deste ponto, apenas a frequência segue aumentando enquanto que a tensão permanece constante. Neste ponto, a frequência é de 30.83Hz;

P146 - Velocidade intermediária – 3500RPM, definido como ponto de origem da curva V/F customizada utilizada nesta aplicação. A curva inicia a partir deste ponto, onde a frequência é de 29.16Hz

P402 – Velocidade Nominal do Motor – Definido em 7200RPM, pois, ao atingir este valor, a frequência lida será de 60Hz. Por este motivo, que entre 3500RPM a 3700RPM, a frequência varia em um intervalo muito curto, menor que 3% da frequência nominal de 60Hz.

A partir da definição da curva, é possível a realização dos testes. Os valores passarão pelo método Tabela de Busca (Lookup Table), que será apresentado no tópico seguinte.

### 4.3. Utilização do método Tabela de Busca

A tabela de busca foi o método escolhido, e é baseado na construção de uma tabela de dados que relaciona, para este caso, a tensão de saída do inversor com a frequência (em rpm) do inversor, resultando na variação desejada da corrente de saída na carga, e a tabela é obtida pela curva desta tensão de saída com a frequência em rpm. Os dados da tabela foram obtidos a partir dos resultados experimentais definidos a partir das condições de contorno do arranjo, levando em considerações todas as especificações e características dos equipamentos da bancada. A figura 35 apresenta o diagrama de blocos do sistema para o cálculo esperado de potência na carga, utilizando o método para definição da tensão de saída do inversor, método este que, apresenta como principal característica, a necessidade de conhecimentos prévios dos parâmetros dos equipamentos (neste caso, condições de contorno e especificações do inversor).

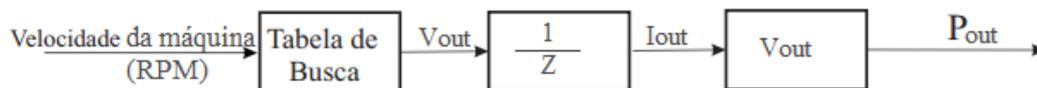


Figura 35 - Diagrama de Blocos simplificado utilizando o método Tabela de Busca

Os pontos obtidos formam um conjunto discreto, no entanto, sabe-se que na rotina de determinação do ponto de operação, deve-se haver interpolação pois o comando é contínuo. Além disto é importante comprovar um comportamento bem determinado, ou seja, que haja continuidade. Para atingir este objetivo, utilizou-se o software SCILAB, para garantir a continuidade a partir da interpolação feita pelos pontos obtidos experimentalmente. A figura 36 mostra o gráfico obtido de tensão de saída x velocidade em rpm, após interpolação feita pelo software, e obtenção da curva:

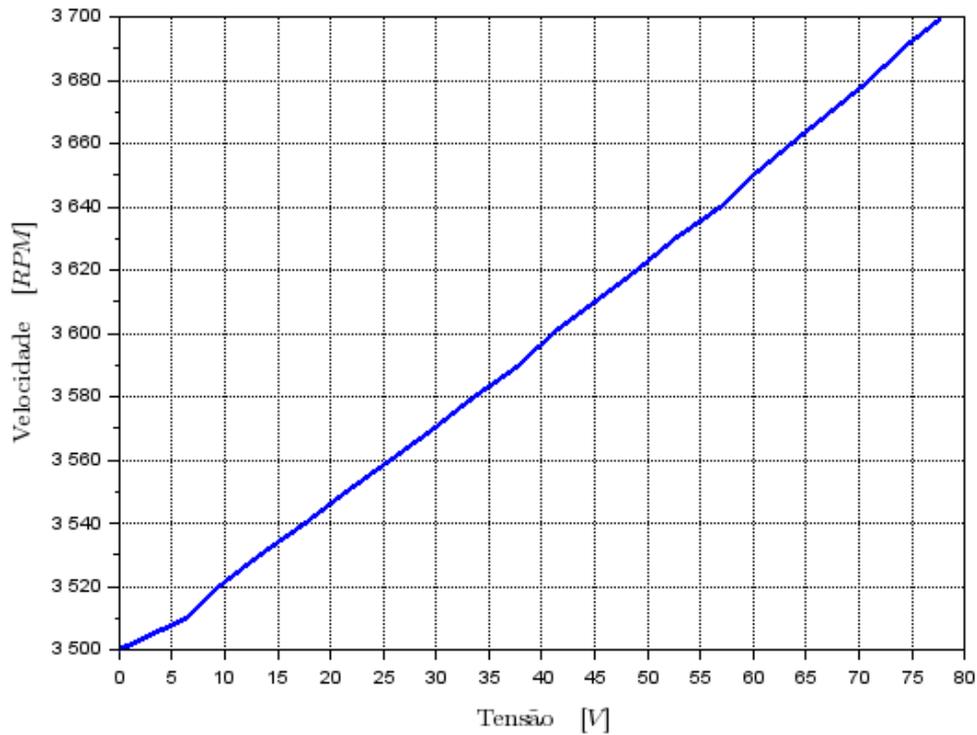


Figura 36 - Gráfico tensão de saída x velocidade (RPM), na fase R

É possível observar, conforme o proposto, que a tensão de saída cresce quase que de forma constante. Através do software SCILAB, é possível identificar, através da aproximação da curva, todos os pontos dentro desta faixa amostral de leitura. Os códigos de programação referente a este modelo, para obtenção destes gráficos, estão contidos no Anexo – Programação SCILAB. Já a figura 37, apresenta a corrente na saída em detrimento à velocidade em RPM:

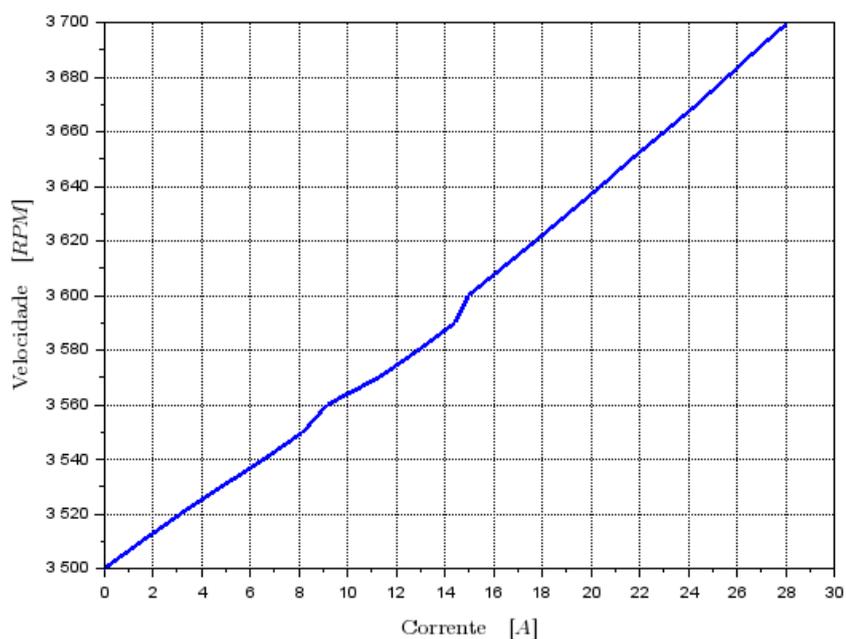


Figura 37 - Gráfico corrente de saída x velocidade (RPM), na fase R

Como era de se esperar, a corrente cresce quase que linearmente com a velocidade em RPM, uma vez que, conforme a curva customizada proposta, a tensão de saída, como mostrado anteriormente, cresce quase linearmente.

No próximo capítulo, serão demonstrados os resultados obtidos experimentalmente, e os gráficos lidos, bem como diversas observações acerca de fenômenos identificados.

## **5. Resultados e Análises**

### **5.1. Análise da variação de corrente na carga para diversos pontos de operação do inversor**

Conforme informado no tópico 4.1, seguindo as condições de contorno do sistema, e no tópico 4.2, onde é apresentado os parâmetros utilizados para a criação da Curva V/F “Customizada”, foram realizados os experimentos para verificar se, de fato, a curva é respeitada, e é possível se obter uma variação linear da corrente na carga.

Como é sabido, o espaço amostral utilizado para a curva e estes experimentos estão englobados entre 3500 a 3700 RPM, o que representa uma variação de 29.16Hz a 30.83Hz (variação menor que 3% da frequência nominal da máquina). Portanto, os testes foram realizados variando-se a velocidade de 10 em 10RPM, o que traz uma amostra de 22 pontos definidos. No entanto, como têm-se uma reta praticamente linear, conforme mostrado anteriormente, a amostra pode se estender para infinitos pontos ao longo desta reta.

Para cada teste realizado, foram adquiridas as formas de onda de tensão e corrente na entrada da contatora do inversor, e tensão e corrente na saída, ou seja, diretamente lido na carga. A partir destes gráficos obtidos e valores lidos, é possível evidenciar a pequena variação de frequência para uma considerável variação de tensão de saída, além de correlacionar potência de entrada e de saída do inversor, permitindo que seja determinado, inclusive, a eficiência do sistema, e quantificar as perdas no processo. Vale ressaltar que todos os gráficos adquiridos levam em conta que o gerador está operando em sua velocidade nominal (1800RPM).

A figura 38 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na fase R, na entrada da contatora do inversor, antes de acionar a mesma para energizar o equipamento:

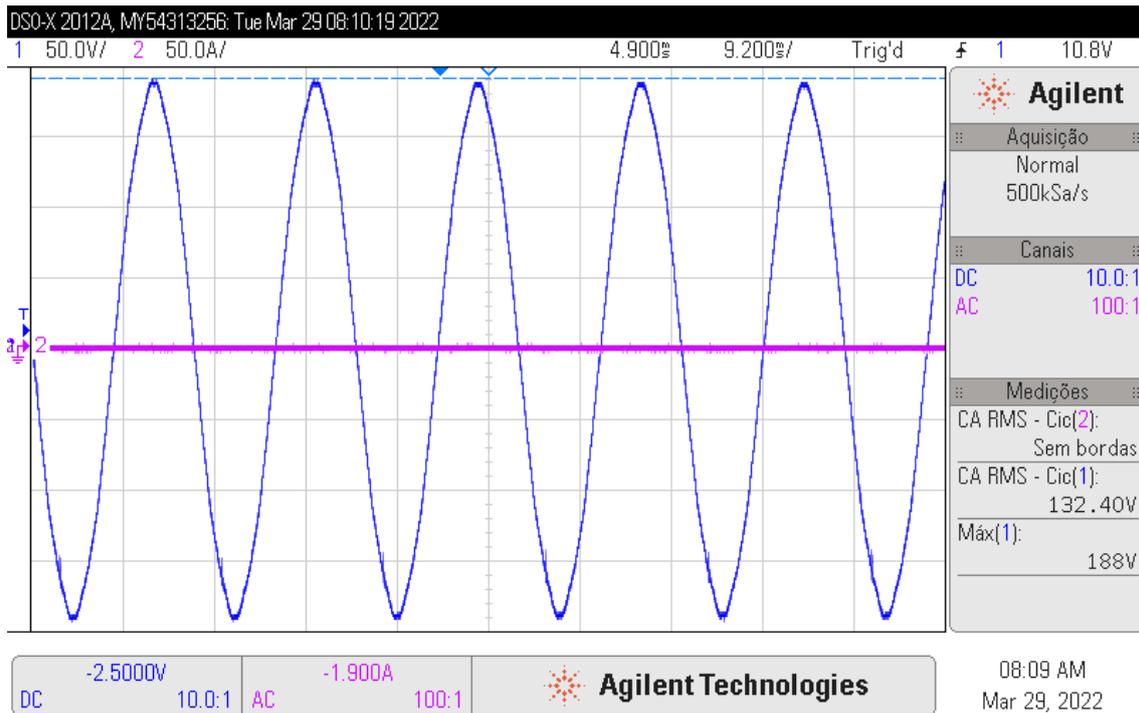


Figura 38 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na entrada, fase R.

E, como era de se esperar, têm-se a forma senoidal na tensão, no valor de  $132,40V_{Fase}$  e um valor de corrente zerado, uma vez que, o gerador está operando a vazio.

O mesmo ocorre na figura 39, onde ainda se tem a mesma leitura, no entanto, com o inversor energizado, mas desabilitado:

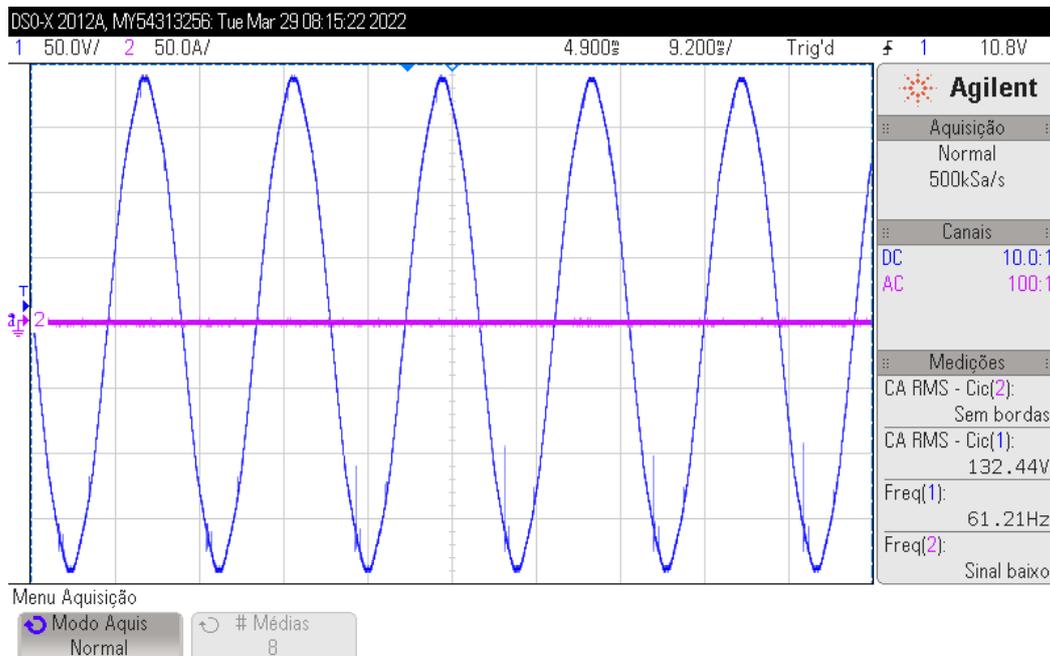


Figura 39 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na entrada com o inversor energizado, fase R.

Já a figura 40, apresenta a mesma forma de onda da fase R, para tensão e corrente, no entanto, com o inversor habilitado e operando na carga a vazio (3500RPM):

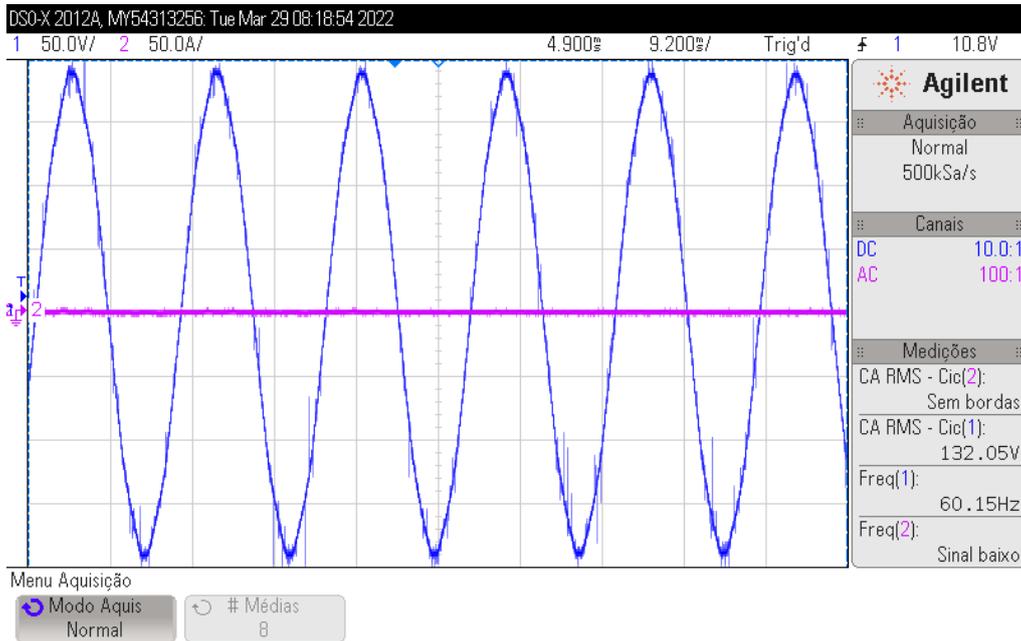


Figura 40 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na entrada, fase R, com o inversor a 3500RPM

Já é possível notar, em detrimento aos gráficos anteriores, que já é perceptível a presença de ruídos lidos no sinal de entrada, gerados pelo próprio inversor. E, com o inversor habilitado, é possível verificar o sinal de saída, mesmo com o equipamento operando a vazio. A figura 41 apresenta o sinal de saída em U:

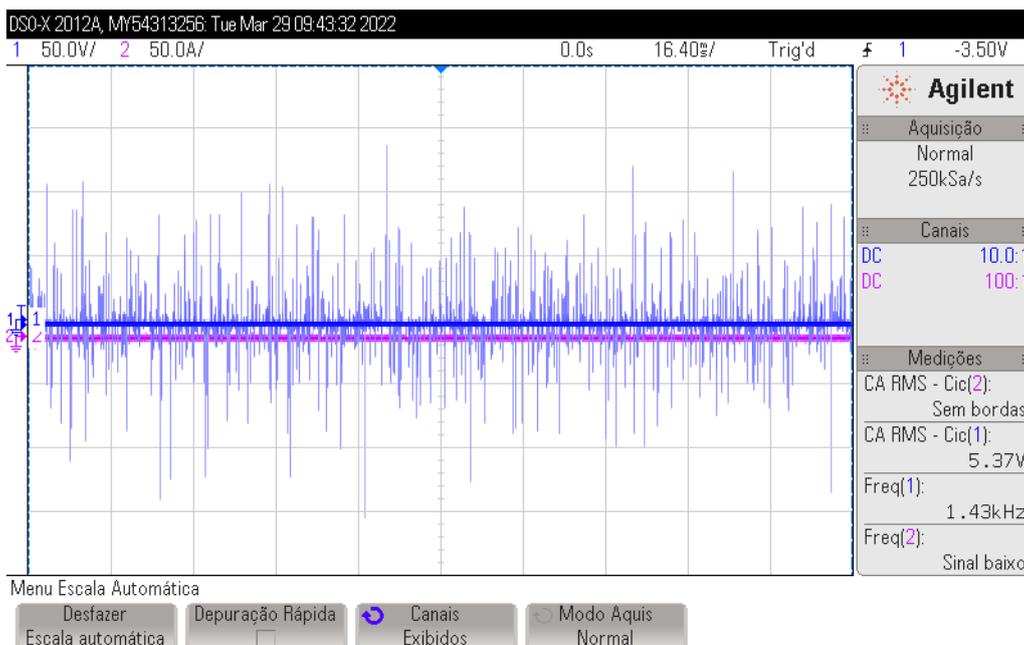


Figura 41 - Forma de onda de tensão (azul) e corrente (roxo) na saída U, com o inversor a 3500RPM

A forma de onda apresentada na figura 38 diz muito a respeito do funcionamento deste inversor, uma vez que é possível notar os disparos de alta frequência da ponte de tiristores presentes no equipamento. É por este motivo, que se necessitou a utilização de uma carga RL, pois, nesta aplicação, o indutor funciona como um filtro de altas frequências, para que seja possível observar a senóide esperada na saída.

Avançando nas leituras, a figura 42 já apresenta o sinal de entrada R, a 25% da carga (3550RPM):

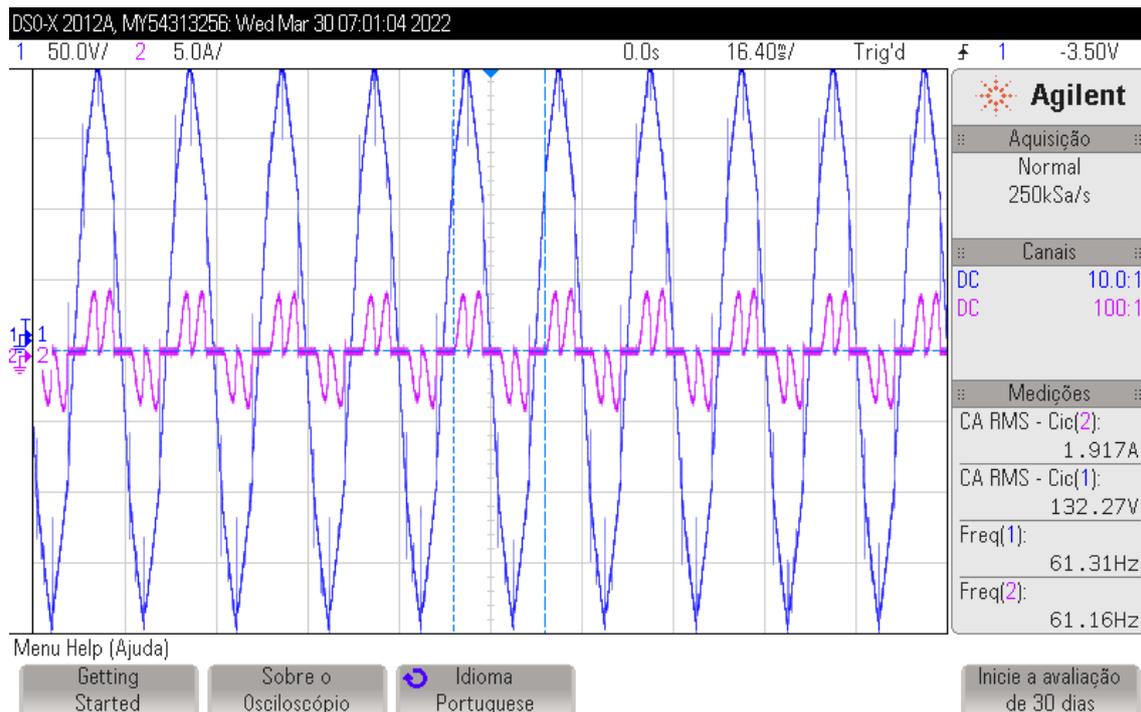


Figura 42 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 25% da carga

E de forma análoga, a figura 43 apresenta o sinal de saída em U, também operando a 25% da carga:

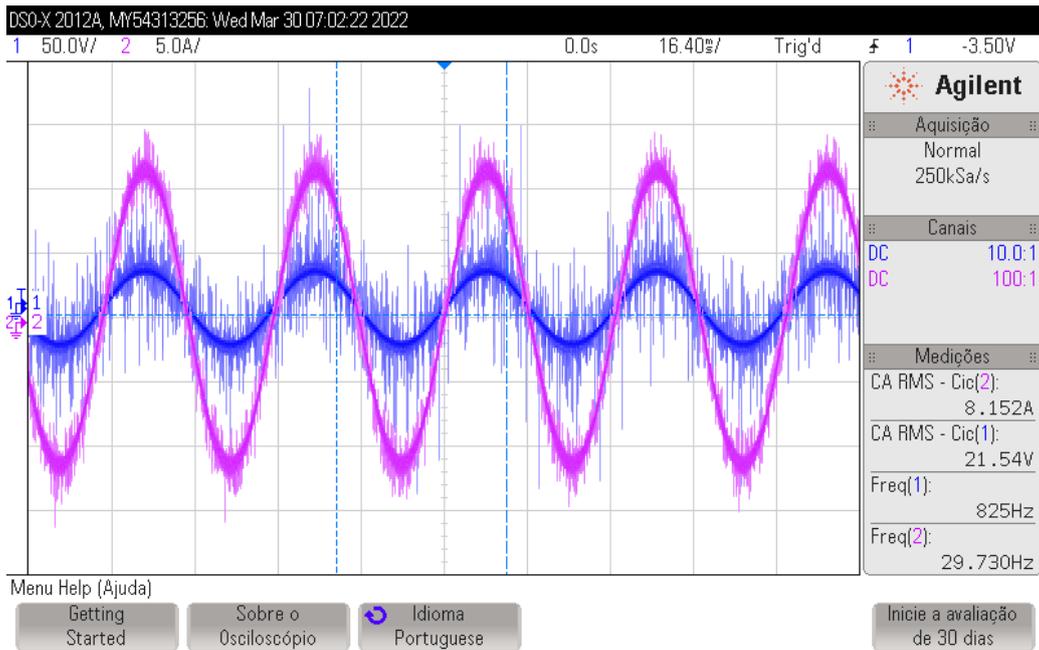


Figura 43 - Formas de onda de tensão e saída na saída U, operando a 25% da carga.

A partir destes dois gráficos, é possível observar que tensão e corrente estão operando corretamente, aparentemente em fase, apesar de se destacar pequenos ruídos na saída. Também é possível notar que para este ponto, a frequência lida foi de 29.73Hz.

A figura 44 apresenta novamente, a entrada R, desta vez operando a 50% da carga (3600RPM):

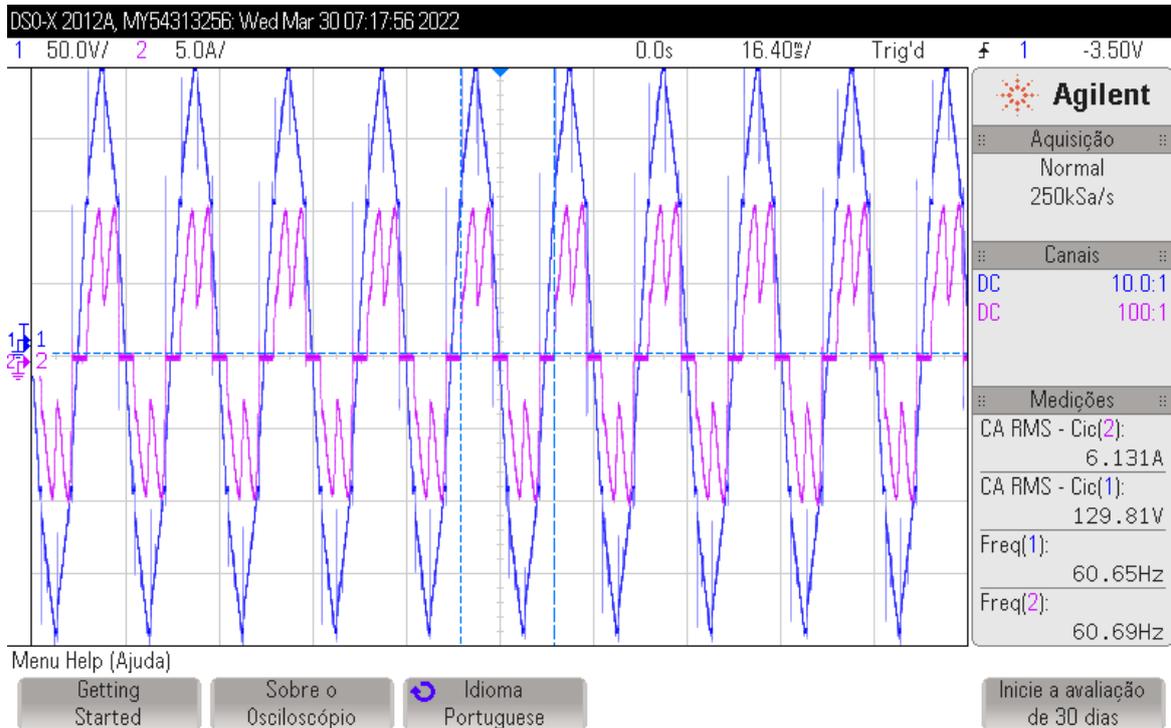


Figura 44 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 50% da carga.

Já a figura 45, apresenta a saída U, também operando a 50% da carga:

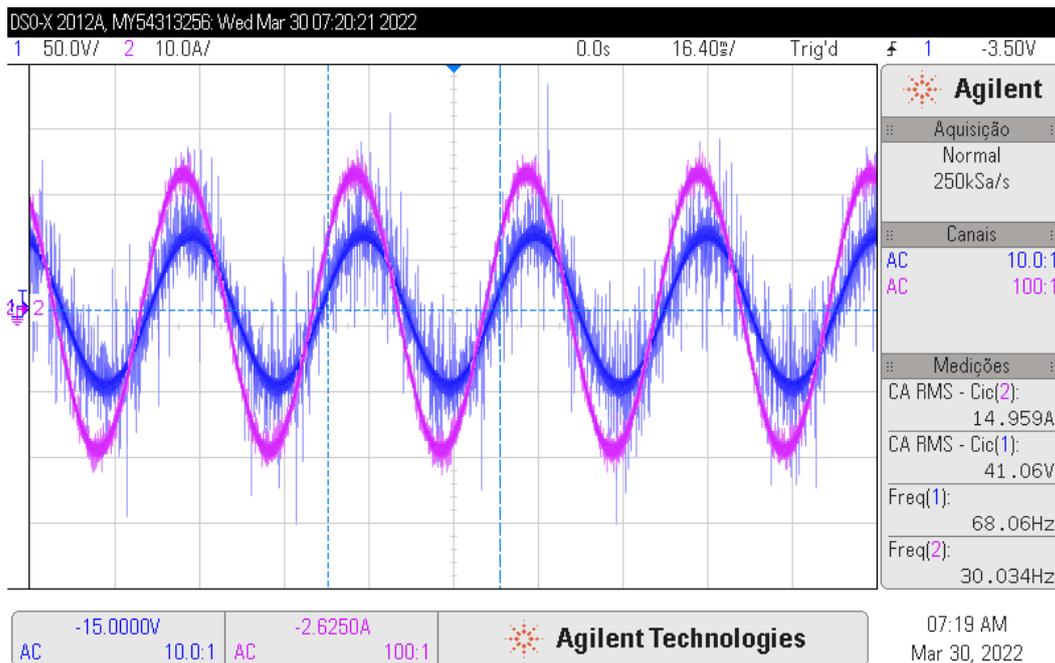


Figura 45 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, operando a 50% da carga.

A 50% da carga, pode-se observar que a frequência segue com uma pequena variação, no entanto, a tensão de saída praticamente dobra, em relação aos gráficos anteriores, também esperado, uma vez que a carga dobrou, de 25% para 50%. No entanto, é possível observar uma pequena defasagem entre tensão e corrente na saída. A figura 46 apresenta, novamente, a entrada R, operando a 75% da carga (3650 RPM):

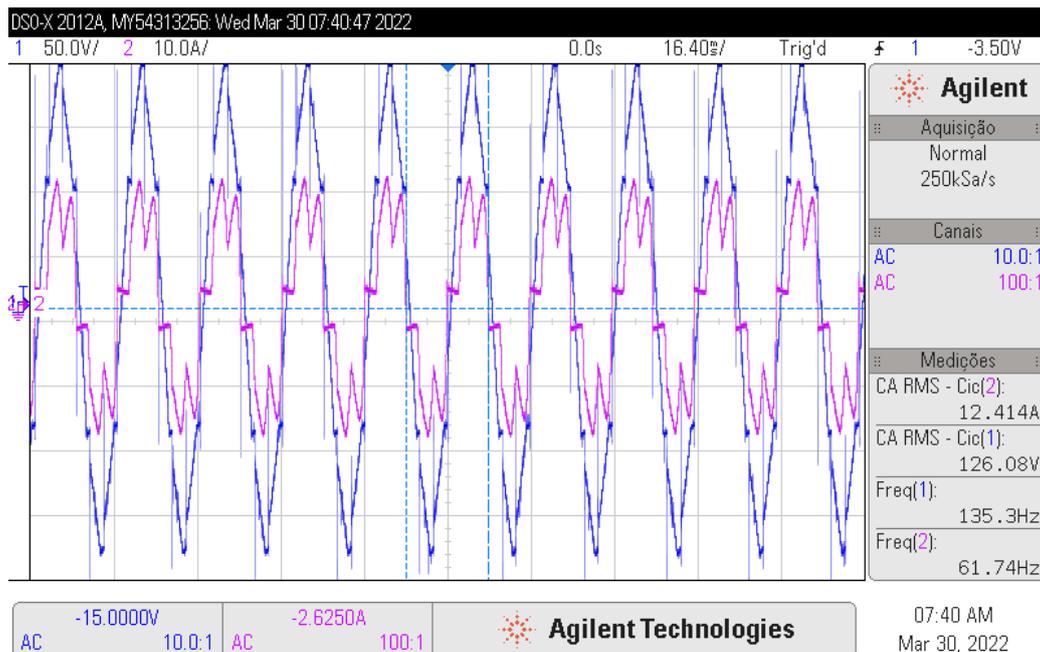


Figura 46 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 75% da carga.

E, na saída U, têm-se a figura 47, também operando a 75% da carga:

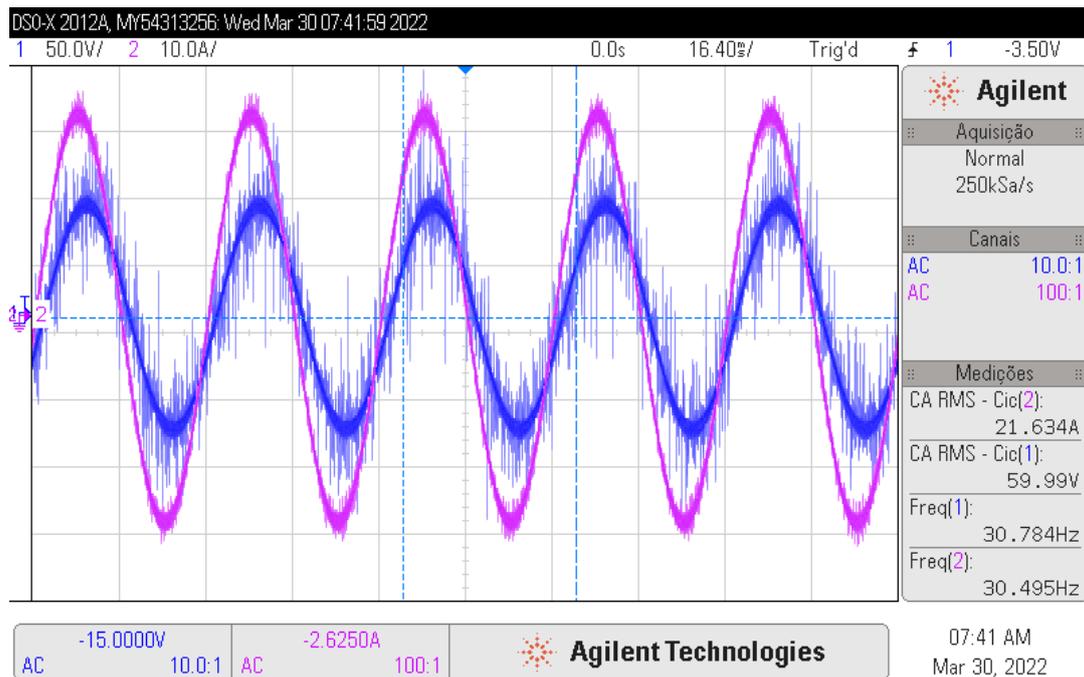


Figura 47 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, operando a 75% da carga.

E por fim, para 100% da carga (3700RPM), temos as figuras 48 e 49, representando a entrada R e a saída U, respectivamente:

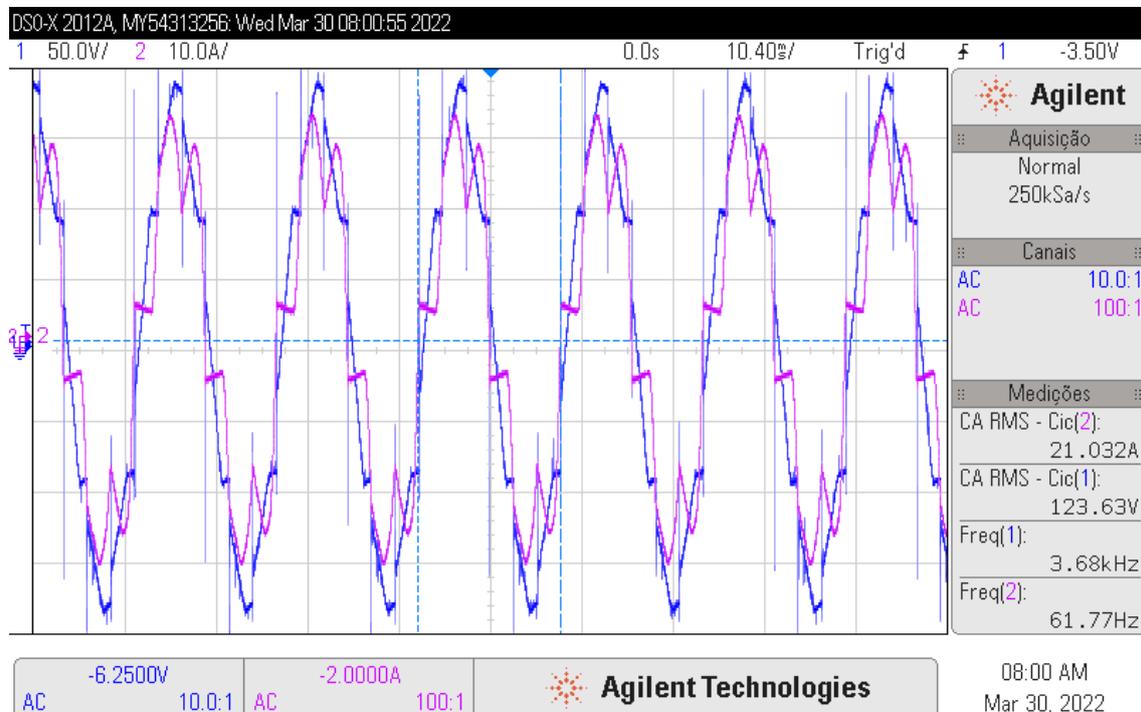


Figura 48 - Formas de onda de tensão e corrente na entrada R, operando a 100% da carga.

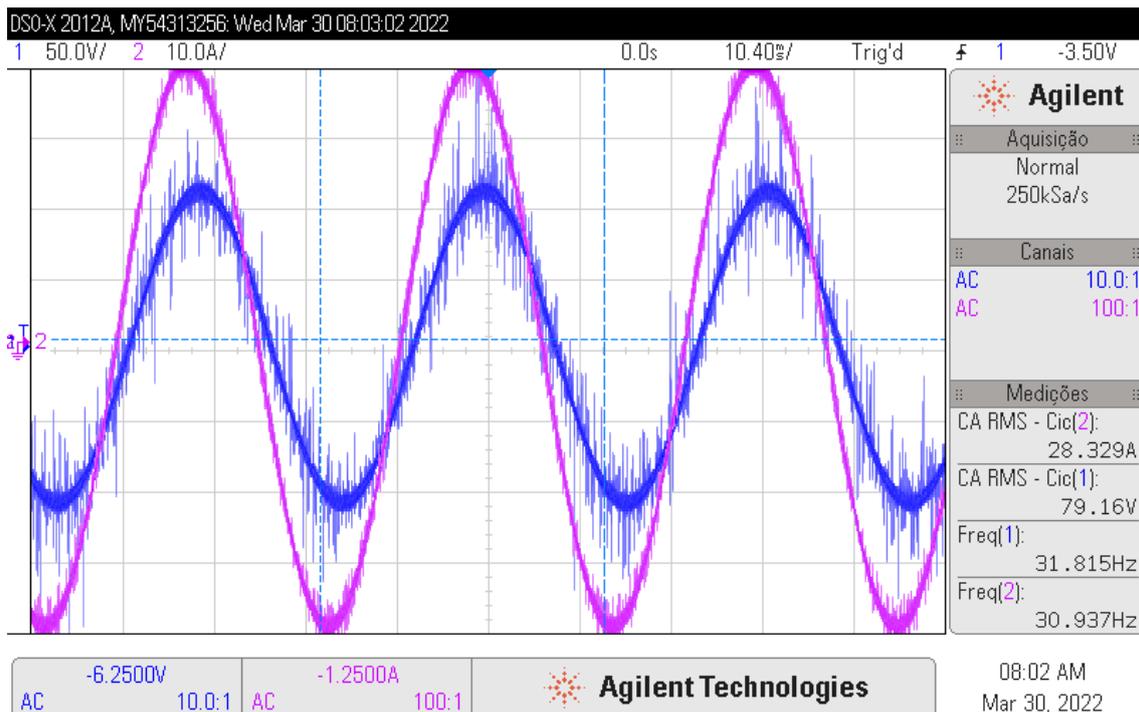


Figura 49 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, operando a 100% da carga.

Portanto, é possível observar, que a tensão de saída cresce linearmente até um valor máximo de 79,16V e um valor de corrente de 28.32A. Também é possível notar, que desde o ponto de 25% até o de 100%, a frequência variou de 29.73Hz a 30.93Hz, uma variação de apenas 1,20Hz.

## 5.2. Comparativo com os resultados teóricos esperados

Conforme demonstrado no tópico 4.1, onde são descritas as condições de contorno do sistema, é possível observar que:

- O valor teórico máximo calculado na tensão de saída, era de 82,57V. O valor lido foi de 79,16V, o que representa um desvio de 4,12% do valor esperado;
- O valor teórico máximo calculado na corrente na carga era de 30A. O valor lido foi de 28,32A, representando um desvio de 5,6% do valor esperado;
- A variação de frequência calculada foi de 29,16Hz a 30,83Hz. Pelo excesso de ruídos nos valores iniciais lidos, a primeira frequência lida foi de 28,82Hz, em 3530RPM (conforme figura 50), e a frequência final foi de 30,93Hz, o que representa uma variação de frequência de aproximadamente 2Hz, em detrimento à variação de 1,67Hz esperada.

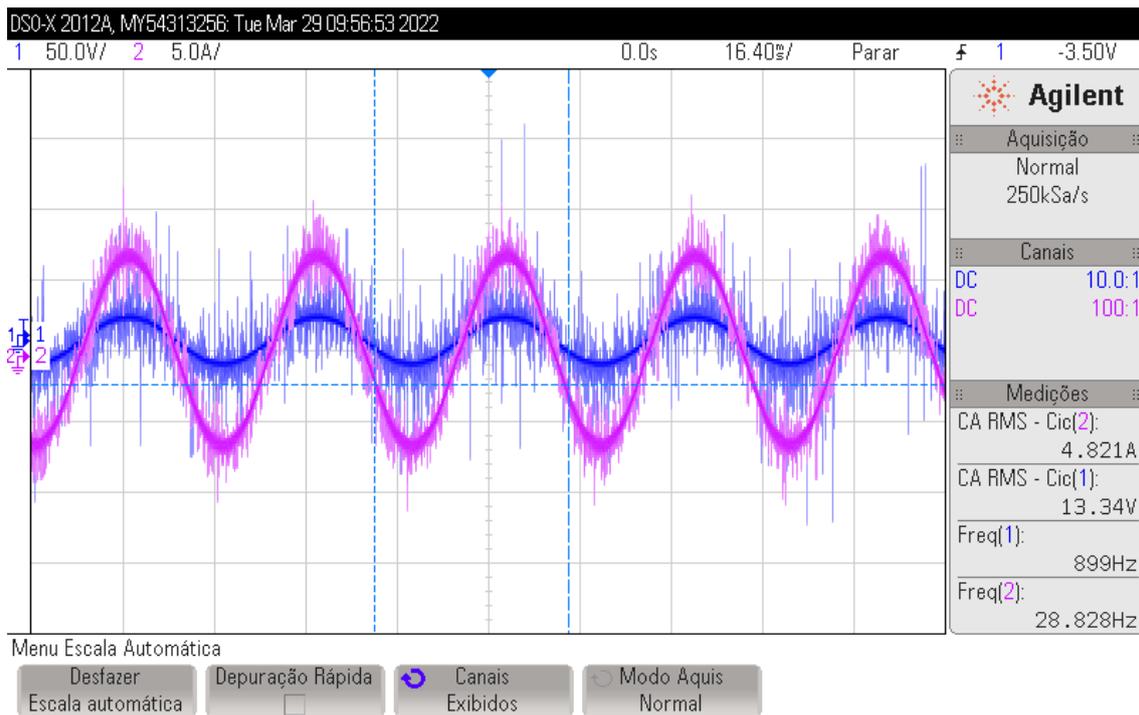


Figura 50 - Formas de onda de tensão e corrente na saída U, em 3530RPM.

Além disso, é possível observar que se têm um rendimento elevado do sistema, conforme a carga aumenta e se aproxima de seu valor nominal. No ponto de carga máxima (3700RPM), têm-se, na entrada, uma potência de 2600,18W (produto entre tensão de entrada e corrente de entrada), e na saída, pela mesma operação, têm-se uma potência de 2242,52W, representando um rendimento de 86,24%. O mesmo se observa para pontos próximos ao valor máximo, e nota-se um pequeno decréscimo desta relação entre potência de entrada e saída, conforme a carga diminui, a exemplo de 50% da carga (3600RPM), onde é possível notar que, na entrada, a potência é de 795,73W, enquanto que na saída, a potência é de 613,84W, representando um rendimento de 77,14%. O valor diminui até atingir a operação em vazio.

Portanto, levando-se em conta o objetivo da curva V/F proposta, pode-se afirmar que este modelo projetado para variação da corrente na carga, através dos parâmetros do inversor, atende de forma satisfatória aquilo para o que foi designado, a partir das delimitações (condições de contorno) definidas.

### 5.3. Trabalhos Futuros

É importante destacar alguns aspectos observados durante os testes, para elaboração de trabalhos futuros:

- a) É possível observar que, à medida que a carga vista pelo inversor aumenta, ocorre um aumento no valor da corrente de entrada, porém é percebido um decaimento da tensão do gerador, mesmo na presença do regulador de tensão, que, através de sua malha de controle, deveria manter a tensão constante. Uma proposta de trabalho futuro seria a investigação deste fato;
- b) Ainda sobre isto, também é possível observar que, conforme mencionado anteriormente, mesmo para o valor máximo de carga (100% - 3700RPM), o rendimento máximo do sistema lido foi de 86,24%. Uma proposta interessante seria observar e quantificar estas perdas de potência entre entrada e saída;
- c) Sabe-se também que o inversor é um equipamento que gera harmônicos em sua entrada, e conseqüentemente, neste caso, para a armadura do gerador. Pela presença dos ruídos e componentes harmônicas no sinal, é provável que a elaboração de um filtro, para mitigação destes ruídos, se apresente como uma forma de apurar ainda mais a leitura realizada, e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade dos sinais obtidos;
- d) Outra proposta, também interessante, está relacionada à potência dissipada pelos resistores. Sabe-se que, os resistores utilizados como carga possuem potência de 1kW, e em operação, dissipam um calor excessivo, que, atualmente, não está sendo aproveitado de forma alguma. É pura energia em forma de calor sendo dissipada no local. Outra proposta interessante seria a utilização desta energia dissipada para se atingir alguma finalidade;

Portanto, é possível observar que, a Bancada Dinâmica possui muitas aplicações diferentes, que podem ser exploradas. Aqui foram constatados apenas alguns tópicos de estudos futuros, possivelmente a bancada ainda possua espaço para mais aplicações.

## 6. Considerações Finais

Este trabalho apresenta uma Bancada Dinâmica utilizada para realização de emulação de geração de energia eólica e hidráulica, onde o objetivo proposto foi a utilização do inversor como estratégia para variação de corrente na carga, utilizando uma curva customizada de um dos modos de operação do próprio equipamento.

Através de parâmetros previamente conhecidos do sistema, foi desenvolvido uma tabela do tipo Lookup Table, para apresentação dos diversos pontos de operação lidos, variando-se apenas a tensão de saída do inversor, mantendo uma frequência quase constante, a fim de atingir o objetivo de variação de corrente na carga.

Foram determinados todos os parâmetros relevantes para a elaboração da curva V/F “customizada” e os demais parâmetros de programação, tanto do inversor, quanto do conversor (apresentados nos anexos a este trabalho), e após isto, foram realizados os experimentos para comprovar se a curva proposta atende aos requisitos previamente estabelecidos. Ao realizar o comparativo entre o que era esperado, e o que foi obtido, conclui-se que, para a aplicação proposta, a curva V/F customizada utilizada, atende de forma satisfatória.

No segundo capítulo, foi apresentado a teoria acerca da geração hidráulica e eólica, e, por conseguinte, a modelagem de ambos estes sistemas, sempre buscando representar estes modelos baseados na Bancada Dinâmica. Vale ressaltar que foram apresentados todos os cálculos de modelagem das turbinas eólicas e hidráulicas, levando-se em conta todos os aspectos relevantes para a construção destes modelos. Estes já são estudos consolidados, mas que trazem uma importância para a BD, pois correlaciona a modelagem com a prática, mostrando que a BD é capaz de representar estas gerações em escala menor.

Sabe-se que para a modelagem de sistemas, é muito importante conhecer os limites impostos pelos equipamentos. É o que foi visto também no capítulo 2, referente à todos os fatores limitantes presentes na curva de capacidade do gerador, além de serem apresentados os controles de potência necessários para as gerações propostas.

No terceiro capítulo, é apresentado de fato a Bancada Dinâmica, seus princípios de funcionamento e aspectos construtivos da mesma, além de ser demonstrado a parte de comando e proteção, e os procedimentos de manutenção necessários envolvendo o funcionamento da mesma, uma vez que, como já dito na introdução, este projeto foi

financiado pela Eletronorte, e a bancada estava em desuso a mais de 10 anos. Então se fez necessário, inicialmente, todo um trabalho de revitalização e revisão de toda a parte eletromecânica da mesma, testes realizados nas máquinas e equipamentos eletrônicos (seguindo as orientações dos seus respectivos manuais de operação). Todas estas informações foram datadas e catalogadas, e servirão para projetos futuros a serem realizados.

No quarto capítulo, foi apresentado o arranjo experimental utilizado, onde foram apresentadas todas as condições de contorno do sistema, limitações impostas pelos equipamentos e materiais utilizados, a fim de se obter parte dos parâmetros de definição do sistema, para realização dos cálculos teóricos a fim de se obter os valores esperados nos testes.

Além disso, foi demonstrado como a curva V/F “customizada” foi construída, apresentando todos os parâmetros relevantes para a elaboração da mesma, informando-se os valores utilizados e o motivo por trás destas escolhas. Para a construção desta curva, foram levados em consideração todas as condições de contorno do sistema, já dito anteriormente, bem como, aspectos construtivos do próprio inversor.

Outro ponto importante também destacado no quarto capítulo, foi a utilização da Tabela de Busca (Lookup Table), onde foram apresentados e determinados os pontos obtidos experimentalmente, correlacionado frequência e tensão de saída, para obtenção do valor da corrente.

Por fim, no quinto capítulo, foram apresentadas as formas de onda de tensão e corrente obtidas pelo osciloscópio, para alguns pontos de operação do inversor (operando a vazio, 25% da carga, 50% da carga, 75% da carga e 100% da carga). Nestas leituras, é possível observar diversos fenômenos, como o aumento do valor da corrente de entrada conforme a carga lida pelo inversor aumenta, bem como é constatado o decaimento da tensão na entrada, pelo gerador. Outro fator observado foi a correlação de potência entre entrada e saída, destacando-se o fato de, conforme a carga lida pelo inversor aumenta, a eficácia do sistema aumenta, atingindo o valor máximo de 86,24%. Foram observados componentes harmônicos nos sinais lidos, e o seu impacto nas leituras destes sinais.

Foram comparados os valores obtidos experimentalmente com os valores teóricos calculados a partir das condições de contorno do sistema, destacando-se a proximidade

desses sinais teóricos dos sinais práticos lidos pelo osciloscópio, mostrando que o modelo proposto é fidedigno, em comparação aos valores teóricos esperados.

E por fim, foram apresentadas sete possíveis propostas de trabalhos futuros, e talvez este seja um dos pontos mais importantes a serem destacados. Isto valida a importância que a Bancada Dinâmica tem, tanto para o âmbito acadêmico, de pesquisa, quanto para aplicação destes estudos para cunho profissional, em grandes indústrias.

A Bancada Dinâmica se apresenta como um instrumento extremamente versátil e importante, para diversas análises, vista por diversos ângulos diferentes de aplicação. Portanto, é inquestionável a importância que a mesma tem para os estudos envolvendo a Graduação e Pós-Graduação (Mestrado e Doutorado), se tornando inclusive, uma ferramenta para trazer recursos à Universidade, através de pesquisas a serem desenvolvidas.

Portanto, é possível concluir que este trabalho apresenta diversas contribuições, tanto no âmbito de seu desenvolvimento, onde foi apresentada uma nova estratégia de funcionamento do inversor, quanto para trabalhos futuros.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] Moura A.P. *et al.* **Geração Hidroelétrica e Elioelétrica**. Fortaleza – Ceará: Edições UFC, 291P. 2019. ISBN 978-85-7282-764-5.
- [2] C. Goldemberg, O.S. Lobosco, **Determination of induction motor characteristics from manufacturer datasheets**, ICEM 90 "International Conference on Electrical Machines", Cambridge, USA, pp. 458-463, Agosto 1990.
- [3] C. Goldemberg, O.S. Lobosco, **Determinação do circuito equivalente para análise estática e dinâmica de motores de indução a partir de catálogos de fabricantes**, II SIMEAR, Vol. IV, pp. 25-40, São Paulo, Maio 1991.
- [4] C. Goldemberg, O.S. Lobosco, **Non-linear fitting method for obtaining induction motor characteristics from manufacturer data sheets**, SPEEDAM, Positano, Italia, pp. 133-138, Maio 1992.
- [5] C. Goldemberg, **Determinação dos parâmetros funcionais de motores de indução a partir de catálogos de fabricantes**, Dissertação de mestrado UNICAMP, sob orientação do Prof. Dr. Yaro Burian Jr., em Junho 1992.
- [6] C. Goldemberg, O.S. Lobosco, **Numerical fitting method for obtaining induction motor characteristics from manufacturer data sheets**, ICEM-92, pp. 552 a 556, Manchester, Inglaterra, Setembro 1992.
- [7] Rocha R.V. **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE-UFRJ). Rio de Janeiro, 2008. Orientador: Luís Guilherme Barbosa Rolim
- [8] Parvaresh A. *et al.* **A Novel Deep Learning Backstepping Controller-Based Digital Twins Technology for Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine**. ISSN 2411-9660. Designs 2020;4,15.
- [9] Rajendran, S. **Control of Variable Speed Variable Pitch Wind Turbine at Above and Below Rated Wind Speed**. Journal of Wind Energy. Vol.2014, 14p.
- [10] Filho P, S, N. **Investigação de estratégias de controle digital para regulação de velocidade e emulação da dinâmica de turbinas hidráulicas, com implementação e testes experimentais em uma micromáquina de 10KVA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFGA). Belém, 2011. Orientador: Walter Barra Junior.
- [11] Kundur, P. **Power System Stability and Control**. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994. ISBN 0-07-035958-X
- [12] Chen X, Yang Y, Cui Z, Shen J. **“Vibration fault diagnosis of wind turbines based on variational mode decomposition and energy entropy”**. Energy 2019;174:1100-1109.

- [13] Jung I.H, Kim Y.S, Shin D.H, Chung J.T, Shin Y. **“Influence of spear needle eccentricity on jet quality in micro Pelton turbine for power generation”**. Energy 2019;175:58-65.
- [14] Martínez M.E.I, Córdoba P.F, Daviu J. A.A, Conejero J.A. **“Detection of Nonadjacent Rotor Faults in Induction Motors via Spectral Subtraction and Autocorrelation of Stray Flux Signals”**. IEEE Trans. Ind. Appl. 55, no. 5, pp. 4585-4594, Sep./Oct. 2019.
- [15] Junior, F.J.C **Desenvolvimento de um sistema multiconversor para a realização de estudos experimentais em microrredes de corrente contínua**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFPA). Belém, 2015. Orientador: Walter Barra Junior
- [16] Moraes, A.R.B **Desenvolvimento e implementação de estratégias de controle digital para regulação de tensão e amortecimento de oscilações eletromecânicas em um gerador síncrono de 10kVA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFPA). Belém, 2011. Orientador: Walter Barra Junior

## **8. ANEXOS**

### **ANEXO A**

#### **PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO PADRÃO CONFIGURAÇÃO DO CONVERTOR CTW-04 DA BANCADA DINÂMICA DE SIMULAÇÃO E GERAÇÃO**

**APLICAÇÃO:** Bancada Dinâmica de Simulação e Geração

**LOCAL:** Laboratório de Eletrônica de Potência, Prédio de Laboratórios de Engenharia Elétrica e Computação, UFPa Campus Belém

**EDIÇÃO:** 1ª

**ELABORADO POR:** Ygor Pereira Vaz e Marcos Andrey da Silva Lopes

**REVISADO POR:** Petrônio Vieira Junior

**APROVADO POR:**

**DATA DE APROVAÇÃO:**

## OBJETIVO

Realizar a configuração do Conversor CTW-04 presente na Bancada Dinâmica de Simulação e Geração, com esta devidamente conectada de acordo com seus esquemas de ligação de Força, Comando e Habilitação, e deixar o Conversor preparado para o acionamento do Motor CC nas condições de com ou sem carga.

----



## CONFIGURAÇÃO ESCOLHIDA

O Conversor CTW-04 será configurado para fornecer para o motor CC uma Corrente de Campo de 18 A, Tensão de Armadura máxima de 230 V e Corrente de Armadura Nominal de 63 A.

O controle de velocidade do motor será feito partir do ajuste da porcentagem da tensão de armadura nominal fornecida ao motor pelo Conversor, sendo esta porcentagem definida a partir da mudança das configurações do Conversor através da HMI do mesmo. O Conversor irá utilizar da FCEM gerada pelo motor como realimentação de velocidade, não irá operar na região de enfraquecimento de campo e será ajustado para que a velocidade não varie com variações de carga.

O Conversor será desabilitado caso a Corrente de Armadura fique por mais de 1 minuto acima da nominal ou imediatamente caso a corrente alcance 125% ou mais da nominal. Os tempos de aceleração e desaceleração foram definidos como 15s.

# BANCADA DINÂMICA DE SIMULAÇÃO E GERAÇÃO

## CHAVE GERAL

A Chave Geral energiza a Bancada quando fechada, conforme a Figura 51. Toda e qualquer manutenção nas conexões da Bancada ou nos equipamentos presentes devem ser feitas com a Chave Geral aberta para garantir que a mesma esteja desenergizada e não haja o risco de acidentes elétricos.

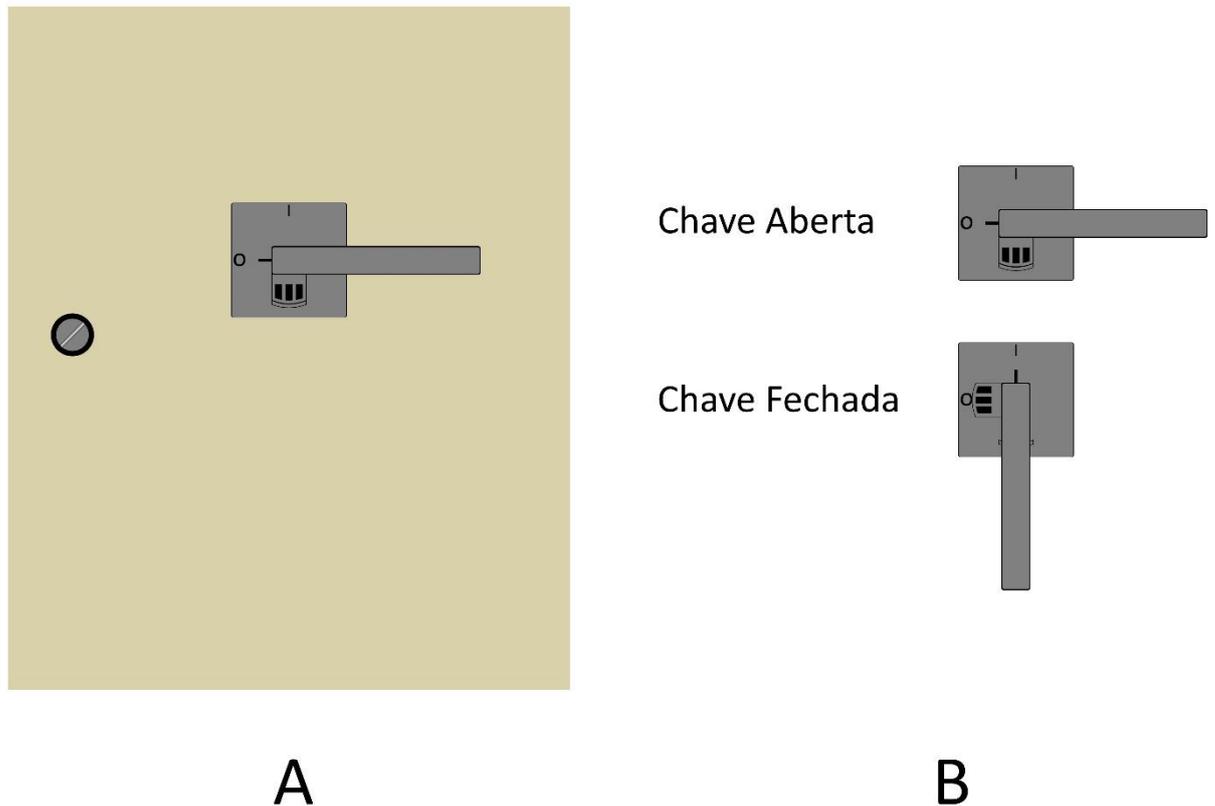


Figura 51: (A) Ilustração da Chave Geral presente no Laboratório de Eletrônica de Potência. (B) Ilustração da chave nas posições aberta e fechada que, respectivamente, impede ou permite a alimentação da Bancada.

## BANCADA DINÂMICA DE SIMULAÇÃO E GERAÇÃO

### BOTOEIRAS DE COMANDO

As cinco Botoeiras de Comando SBG e S1-S4, presentes na Bancada conforme a 30 e a Figura 52, permitem ativar ou desativar contatores que controlam a alimentação de diversas conexões da Bancada, tendo cada botoeira botões de ativação e desativação “I” e “O” respectivamente, conforme o mostrado na Figura 53 e na Figura 54. As botoeiras e suas respectivas funções são:

SBG: Desativa o Bloqueio Geral do Conversor;

S1: Ativa a Alimentação do retificador de armadura do Conversor;

S2: Ativa a Eletrônica do Conversor CTW-04;

S3: Ativa os Ventiladores do Conversor, do Motor e a alimentação de campo do Conversor;

S4: Permite a alimentação do Inversor pelo Gerador.

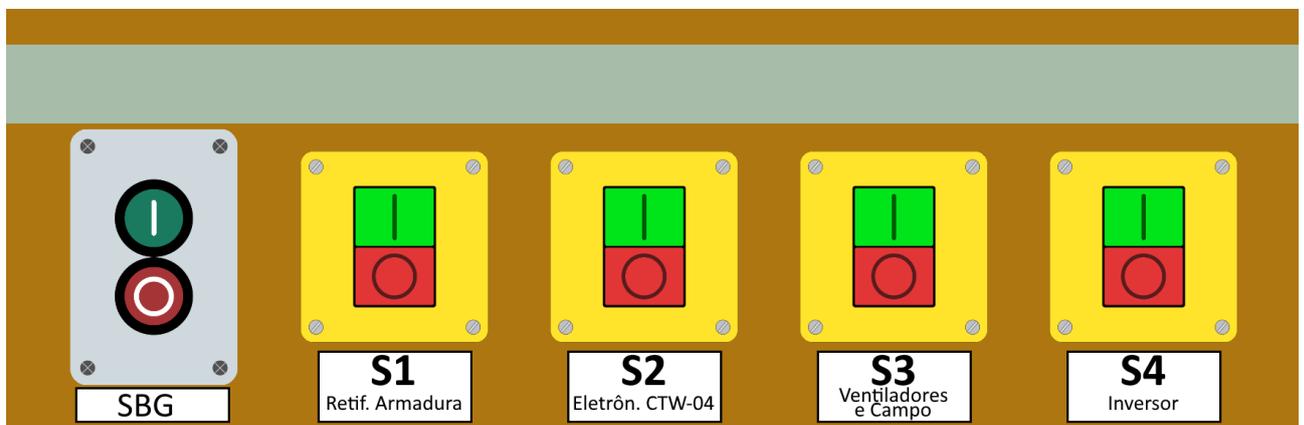


Figura 52: Ilustração das Botoeiras de Comando SBG e S1-S4 representando suas posições com relação à sua localização na Bancada conforme a Figura [Figura Geral da Bancada].

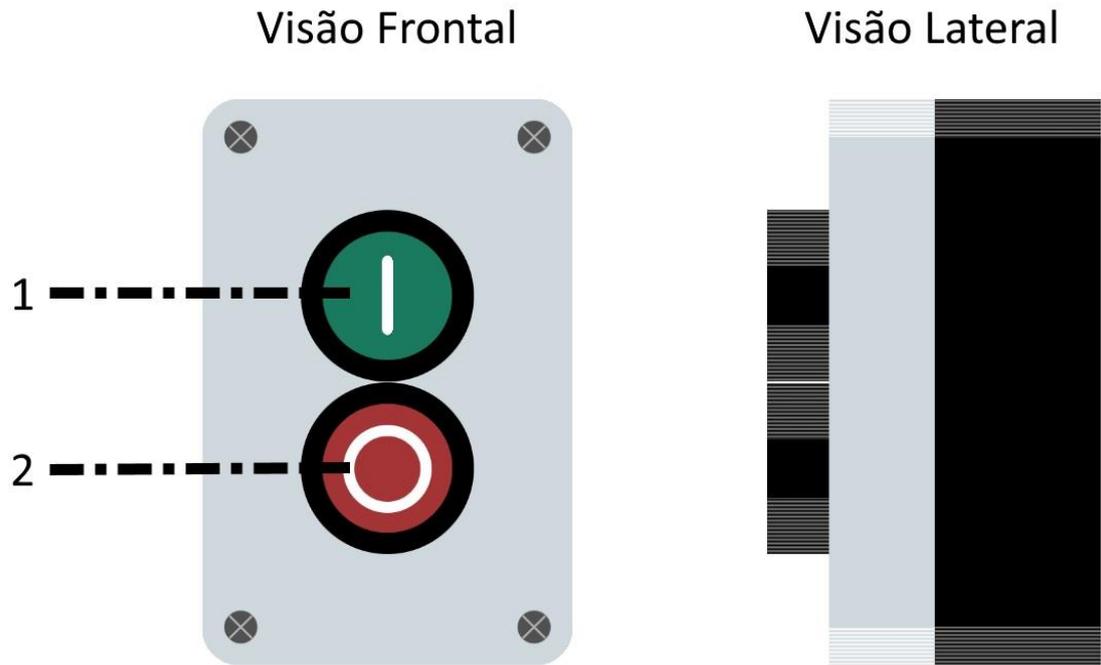


Figura 53: Ilustração da Botoeira de Comando SBG, sendo (1) o Botão de Ativação "I", em verde, e (2) o Botão de Desativação "O", em Vermelho.

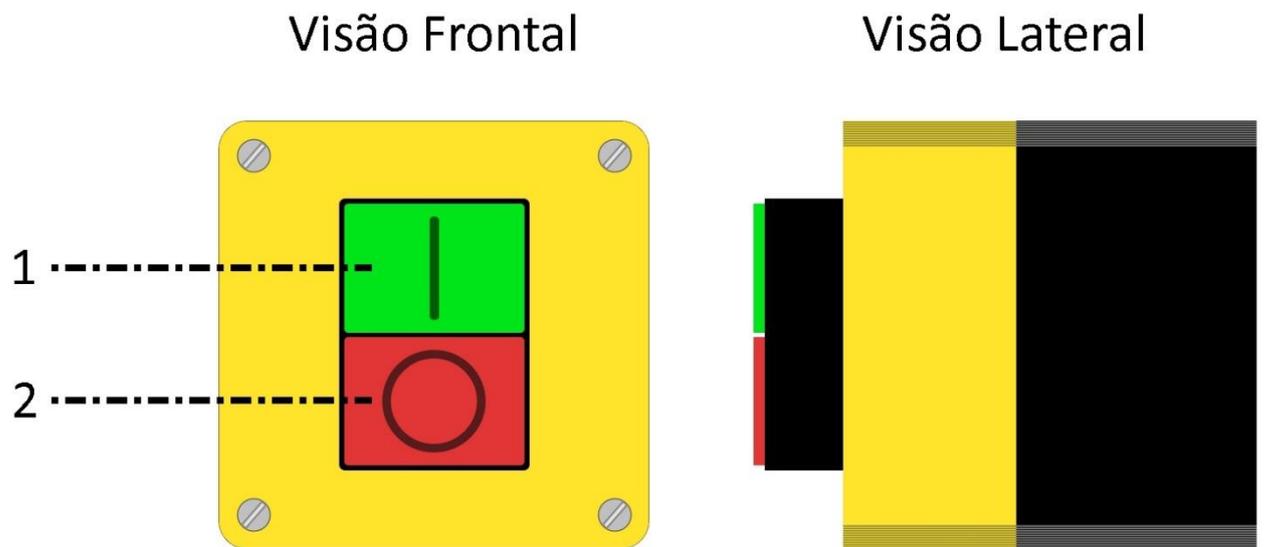


Figura 54: Ilustração de uma Botoeira de Comando sendo (1) o Botão de Ativação "I", em verde, e (2) o Botão de Desativação "O", em Vermelho.

## CHAVES DE HABILITAÇÃO

As quatro Chaves de Habilitação SE1-SE3, ilustradas na Figura 55, permitem controlar funções do Conversor ao serem habilitadas ou desabilitadas, conforme a Figura 56. As chaves são:

SE1: Bloqueio de Rampa de Velocidade (BR): Bloqueio ATIVADO em *OFF* e DESATIVADO em *ON*;

SE2: Referência de Velocidade: Referência definida como REMOTA em *OFF* e LOCAL em *ON*;

SE3: Sentido de Giro: X em *OFF* e Y em *ON*.

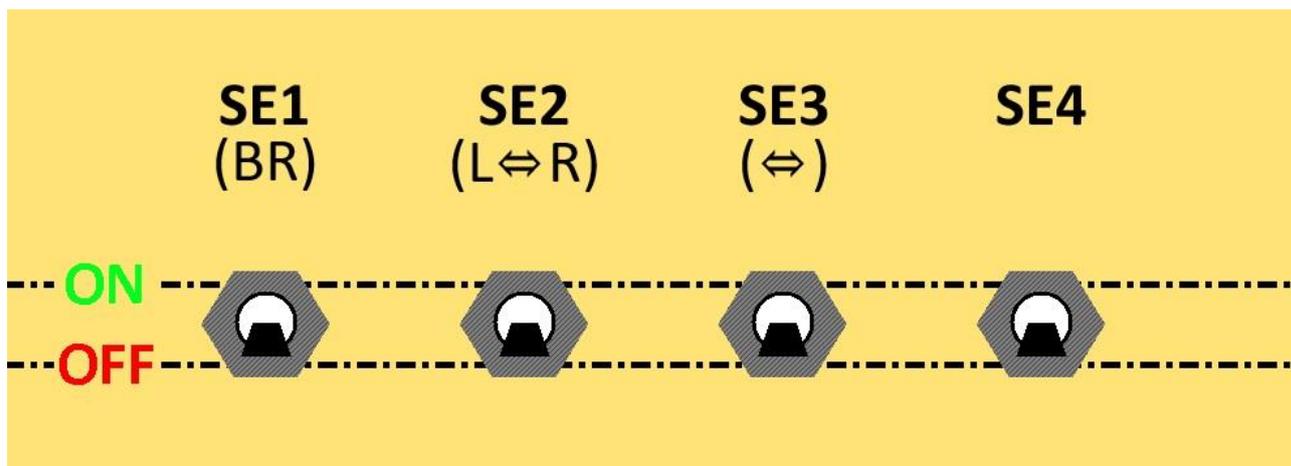


Figura 55: Ilustração das Chaves de Habilitação SE1-SE3, todas desabilitadas e suas posições com relação à sua localização na Bancada conforme a Figura [Figura Geral da Bancada].

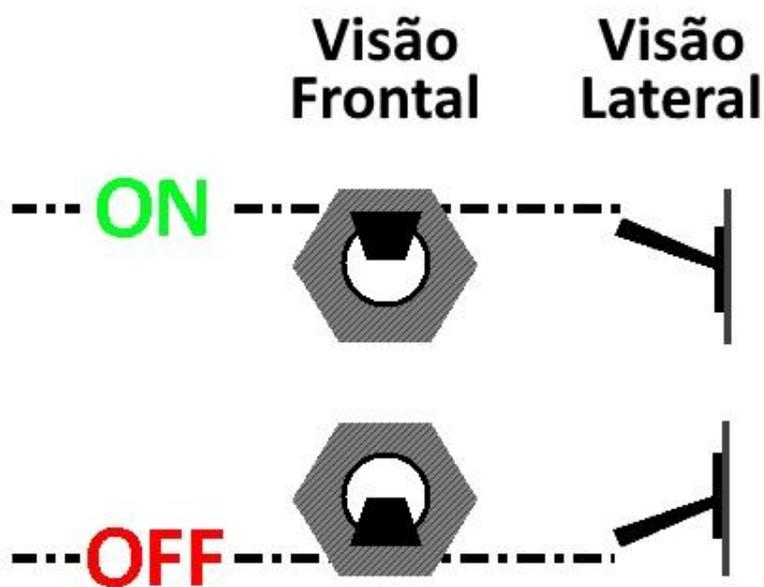


Figura 56: Ilustração de uma Chave de Habilitação habilitada, indicada por *ON*, e desabilitada, indicada por *OFF*.

## CONVERSOR CTW-04

### HMI do Conversor

A interface Homem-Máquina (HMI) presente na parte frontal do Conversor, ilustrada na Figura 57, permite a visualização do estado de operação, de mensagens de erro ou de falha e a verificação e ajuste dos parâmetros de configuração do mesmo.

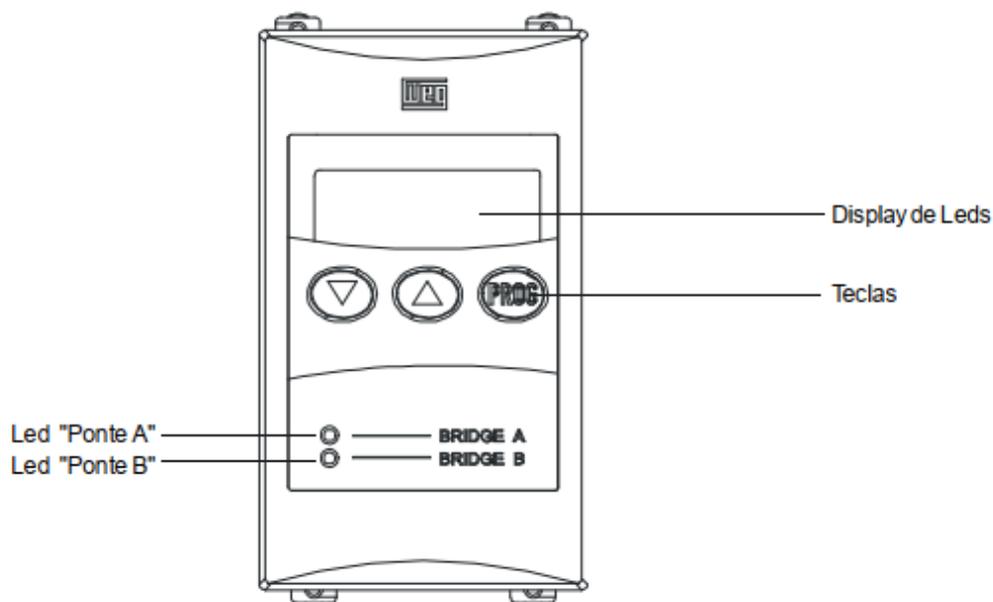


Figura 57: Localização do display, leds e teclas da HMI

-  Seleciona (comuta) display entre número do parâmetro e seu valor (posição/conteúdo).
-  Aumenta a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro.
-  Diminui a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro.

Figura 58: Funções básicas das teclas presentes na HMI

### Controle da HMI do Conversor

Quando a eletrônica do Conversor é energizada, todos os segmentos do *Display* devem acender por aproximadamente 3 segundos, sendo exibida em seguida a mensagem F001 indicando que o Bloqueio Geral está ativo. Deve-se então apertar uma vez a tecla **PROG** para que a mensagem F001 desapareça e seja possível ajustar os parâmetros do Conversor, sendo exibido inicialmente o parâmetro P000.

Para alternar entre a seleção de parâmetros e o ajuste do valor associado a eles deve-se utilizar a tecla **PROG**.

Na seleção de parâmetros sempre é exibida a letra “P” seguida do número de 3 dígitos do parâmetro (Ex.: Parâmetro de número 000 -> P000). Para selecionar o parâmetro desejado, deve-se utilizar as teclas ▲ e ▼ para respectivamente aumentar ou diminuir o número do parâmetro atual selecionado.

Depois de selecionar um parâmetro deve-se utilizar a tecla **PROG** para exibir o valor numérico associado a ele, podendo esse valor ser incrementado ou decrementado respectivamente a partir das teclas ▲ e ▼. Depois que o valor numérico tenha sido ajustado deve-se utilizar a tecla **PROG** para voltar a seleção de parâmetros.

### Abertura e Fechamento da tampa do Conversor

A tampa do conversor, que consiste em toda sua parte frontal conforme mostrado na Figura 59, pode ser aberta para ter acesso ao Cartão CCW4 e fácil acesso às conexões XC1.



Figura 59: Tampa do conversor.

A tampa deve ter seus 2 parafusos desparafusados o suficiente para que a tampa seja destravada, podendo assim ter seu lado esquerdo puxado para realizar o movimento de abertura. Os parafusos e o movimento de abertura são mostrados na Figura 60.

Para o fechamento, deve-se realizar o movimento inverso de abertura e então reparafusar os dois parafusos.

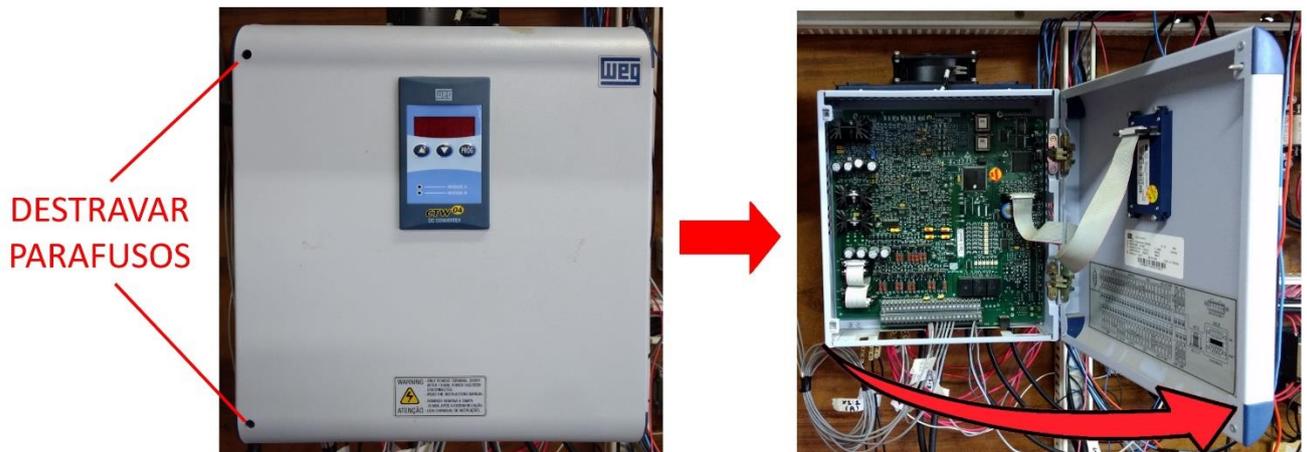


Figura 60: Fotos e indicações do processo de abertura da tampa.

### Cartão CCW4 do Conversor

Placa eletrônica interna do Conversor, conforme a Figura 61. É necessário que a tampa do conversor seja aberta para se obter acesso ao Cartão CCW4, conforme mostrado na sessão **SESSÃOQUAL**. Não se deve interagir diretamente com a placa sem equipamentos de proteção, mesmo com o Conversor não energizado, e quando a interação for necessária a executar com o máximo de cuidado devido aos riscos de choque elétrico e possíveis danos à placa.



Figura 61: Foto do Cartão CCW4.

### Portas XC1 do Conversor – Conexões de Sinal e Controle

As portas XC1 ficam na parte inferior do Cartão CCW4, conforme o mostrado na Figura 62.

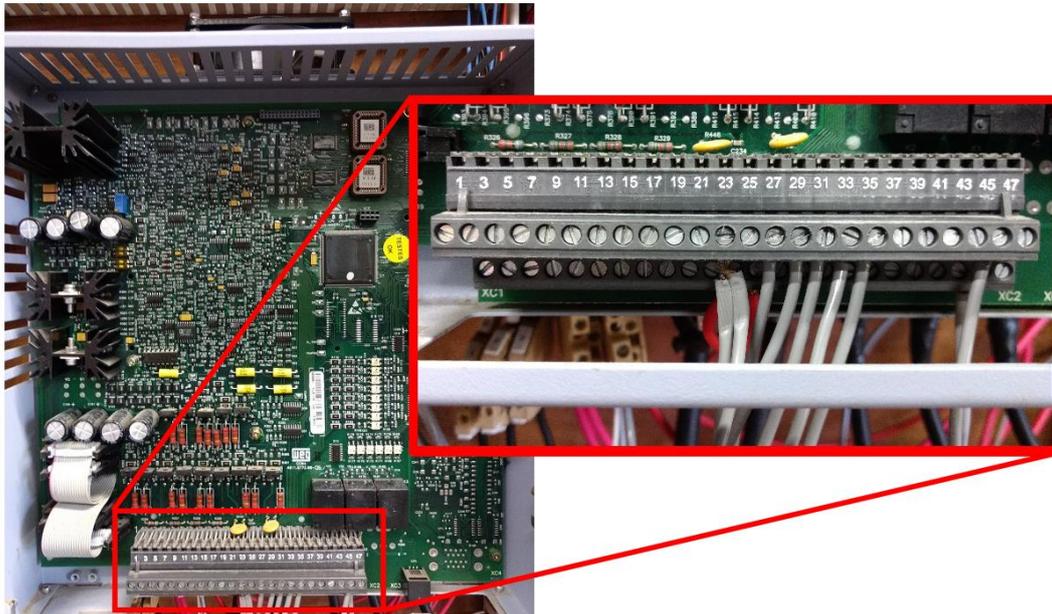


Figura 62: Portas XC1.

### Portas X1 do Conversor - Conexões do Conector de Potência

As portas X1 ficam na parte inferior do Conversor atrás do Cartão CCW4 e das portas XC1, conforme o mostrado na Figura 63.



Figura 63: Portas X1

### PREPARO INICIAL

1. Certificar-se que a Chave Geral está aberta de modo que a Bancada esteja completamente desenergizada;
2. Certifique-se que o motor está devidamente desacoplado do gerador;
3. Reposicione e prenda para longe do motor cabos que estejam em cima dele ou cabos nas proximidades que tenham o risco de se soltarem e/ou se moverem para cima do rotor;
4. Inspeccione visualmente se não há problemas com as conexões da Bancada, assim como se os fusíveis FG, FB, FA, FC, FCom1 e FCom2 não estão queimados.

### ENERGIZAÇÃO DO CONVERSOR

1. Certifique-se que todas as Chaves de Habilitação (SE1-SE3) estão desabilitadas;
2. Feche a Chave Geral para energizar a Bancada;
3. Utilize S2-I para energizar a eletrônica do Conversor;
4. A mensagem “F001” **DEVE** aparecer na HMI do Conversor CTW-04 3 segundos após sua energização, indicando que o Bloqueio Geral está ativo;

### AJUSTE INICIAL DOS PARÂMETROS

1. Aperte uma única vez qualquer tecla da HMI do Conversor para que a mensagem “F001” desapareça. Para realizar o ajuste dos parâmetros, verifique se P004 = 0. Caso P004 = 1, ajuste P013 = 1 que acarretará na mudança automática de P004 para P004 = 0;
2. Faça o ajuste dos parâmetros de acordo com a Tabela de parametrização do conversor, em anexo;
3. Depois de ajustar todos os parâmetros conforme a Tabela de parametrização do conversor, defina P004 = 1;
4. Defina P000 = 005. O *Display* deve piscar por alguns segundos, indicando que as configurações foram salvas;
5. Assim que o Display parar de piscar e retornar para P000, desligue a Eletrônica do Conversor através da Botoeira de Comando S2-O, ligando novamente a eletrônica depois de 5s através de S2-I;
6. Utilizando a Tabela de parametrização do conversor, verifique se todos os parâmetros foram salvos corretamente, repetindo os passos de 1 à 6 desta sessão caso haja parâmetros incorretos.

### INSPEÇÃO DA VENTILAÇÃO DO CONVERSOR E DO MOTOR

1. Utilize o botão S3-I para ligar as ventilações do Conversor e do Motor CC, assim como energizar a Entrada de Campo do Conversor;
2. Inspeccione de forma auditiva se as ventilações do conversor e do motor foram ativadas corretamente;
3. Inspeccione se o fluxo de ar do ventilador do Motor CC está de acordo com o selecionado.

### CONFIRMAÇÃO DE FUNCIONAMENTO E SENTIDO DE GIRO DO MOTOR

1. Ajuste P002 = 0 para que a alimentação de campo do Conversor para o Motor CC seja liberada;
2. Acione S1-I para ativar a alimentação da Entrada do Retificador da Armadura do CTW-04;

3. Ajuste a Referência de Velocidade para 5% da tensão nominal de armadura a partir de  $P056 = P057 = 5$  ( $P056$  altera a Referência de Velocidade de 1 em 1 % e  $P057$  de 0.1 em 0.1 %);
4. Habilite (*ON*), a chaves SE1 para desabilitar o Bloqueio de Rampa e então utilize a Botoeira SBG-I para desativar o Bloqueio Geral. O rotor deve começar a girar à uma baixa velocidade;
5. Verifique o sentido de giro do rotor, que deve girar no sentido horário;
6. Utilize a Botoeira SBG-O para reativar o Bloqueio Geral, espere o rotor parar de girar e então ative a chave SE3 para mudar o sentido de rotação do motor. Acione SBG-I novamente para confirmar a inversão do sentido de giro para o sentido anti-horário;
7. Reative o Bloqueio Geral a partir de SBG-O e em seguida desabilite (*OFF*) SE1 e SE3.

### AJUSTE DA TENSÃO DE ARMADURA

1. Habilite o conversor a partir da ativação de SBG-I e SE2. O rotor deve começar a girar à uma baixa velocidade;
2. Ajuste a Referência de Velocidade para 100% da tensão nominal de armadura a partir de  $P056 = P057 = 100$  ( $P056$  altera a Referência de Velocidade de 1 em 1 % e  $P057$  de 0.1 em 0.1 %), o que acarretará em um aumento de velocidade do Motor CC;
3. Utilize um multiteste aplicado às conexões de força X1: A1 e B2 para verificar a tensão da Armadura do Motor CC;
4. Caso a tensão da Armadura do Motor CC não seja a nominal de 230 Vcc, conforme o parâmetro  $P026 = 0$ , aumente ou diminua aos poucos o valor do parâmetro  $P066$  para, respectivamente, aumentar ou diminuir o Ganho do Sinal de tensão até que a tensão de 230 Vcc seja medida pelo multiteste;
5. Reative o Bloqueio Geral por SBG-O e desative SE1;
6. Ajuste  $P000 = 5$  para salvar os parâmetros. Espere o visor HMI do CTW-04 parar de piscar antes de prosseguir.

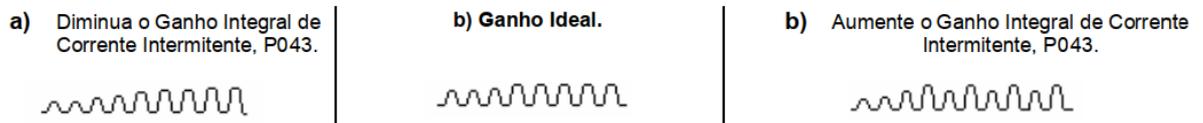
### AJUSTE DO REGULADOR DE VELOCIDADE (ESTÁTICO)

1. Ajuste a Referência de Velocidade para 50 % a partir de  $P056 = P057 = 50$  ( $P056$  altera a Referência de Velocidade de 1 em 1 % e  $P057$  de 0.1 em 0.1 %);
2. Utilize um osciloscópio aplicado as conexões X1: A1 e B1 para monitorar a tensão de Armadura do Motor CC;
3. Acione SBG-I e ative (*ON*) SE1;
4. Caso a tensão de armadura não esteja estável, varie o parâmetro  $P039$  para ajustar o Ganho Proporcional e estabilizar a tensão.
5. Acione SBG-O e desative SE1;
6. Ajuste  $P000 = 5$  para salvar os parâmetros. Espere o visor HMI do CTW-04 parar de piscar antes de prosseguir.

### AJUSTE DO REGULADOR DE CORRENTE

1. Confirme que o Bloqueio Geral está ativo (reacione SBG-O se necessário) e que a chaves SE1 está desativada;
2. Ajuste  $P002 = 1$  para inibir a aplicação de corrente de campo no motor;
3. Ajuste  $P013 = 1$ , que acarretará na mudança automática de  $P004$  para  $P004 = 0$ ;
4. Ajuste  $P070 = 4$ ;
5. Ajustar  $P039 = 1$ ,  $P040 = 0$  e  $P041 = 0$ ;

6. Ajuste  $P054 = P055 = 100 \%$ ;
7. Ajuste  $P032 = P033 = 0$ , definindo as Rampas de Aceleração e Desaceleração como 0 segundos;
8. Monitore, com osciloscópio, os pontos de testes “IA\_INST” e “AGND” no cartão CCW4, conforme a sessão SESSÃO CARTÃO CCW4AQUI e o Anexo X;
9. Ajuste  $P054 = P055 = 100 \%$ ;
10. Ative somente a Chave SE1;
11. Acione SBG-I **POR UM TEMPO MENOR QUE 3 SEGUNDOS** enquanto se verifica o comportamento do sinal medido no osciloscópio. Após os 3 segundos, acione SBG-O;
12. Compare se o sinal que foi medido está de acordo com o comportamento correto mostrado abaixo;
13. Caso o sinal não esteja de acordo com o item “b” abaixo, ajuste P042 e P044 para alterar, respectivamente, o Ganho Proporcional e o Ganho Integral de corrente, repetindo os passos de 11 à 13 desta sessão até que o comportamento seja o mais próximo possível do ideal;
14. Desabilite a chave SE1;
15. Ajuste  $P054 = P055 = 0 \%$ ;
16. Reative a chave SE1;
17. Aumente gradativamente a Referência de Velocidade  $P054 = P055$  até obter corrente intermitente no osciloscópio;
18. Desabilite a chave SE1 e espera 5 segundos;
19. Acione SBG-I e então ative a chave SE1 ;
20. Verifique se o sinal medido coincide conforme abaixo;



21. Caso o sinal não coincida, acione SBG-O e desative SE1 por 5s, **varie o parâmetro P043** e repita os passos 19 e 20 desta sessão até obter o mostrado no item “b” acima
22. Acione SBG-I e desative SE1;
23. Ajuste  $P004 = 1$  e  $P000 = 5$  para salvar os parâmetros.

## AJUSTE DO REGULADOR DE VELOCIDADE

1. Ajuste  $P013 = 1$ , que acarretará na mudança automática de  $P004$  para  $P004 = 0$ ;
2. Ajuste  $P002 = 1$  (Controle de Campo = Inativo);
3. Ajuste  $P039 = 4.0$  e  $P040 = 0.12$ ;
4. Ajuste  $P002 = 0$  (Controle de Campo = Ativo);
5. Medir com o osciloscópio as conexões XC1: 6 e 4;
6. Ajuste os parâmetros P032 (Tempo de Aceleração) e P033 (Tempo de Desaceleração) de acordo com os valores na Tabela de parametrização do conversor;
7. Ajuste  $P054 = P055 = 75 \%$ ;
8. Habilite o Conversor através de, respectivamente, o acionamento de SBG-I e a ativação de SE1. compare o sinal medido com os sinais abaixo e então acione SBG-O e desative SE1;

**a) Ganho muito baixo.**

Aumente o Ganho Proporcional de Velocidade, P039. E/ou diminua o Ganho Integral de Corrente, P040.



**b) Ganho Ideal.**



**c) Ganho muito alto.**

Diminua o Ganho Proporcional de Velocidade, P039. E/ou aumente o Ganho Integral de Corrente, P040.



9. Caso o sinal não esteja de acordo com o item “b”, ajuste P039 e P040 conforme as instruções dos itens “a” ou “c”, dependendo do comportamento atual do sinal. Em seguida, repita os passos 9 e 10 desta sessão;
10. Assim que o sinal medido esteja de acordo com o item “b”, ajuste P004 = 1 e P000 = 5 para salvar os parâmetro.

## AJUSTE DO REGULADOR DA CORRENTE DE CAMPO E REGULADOR DE FCEM

1. Desative a Alimentação do Retificador da Armadura do Conversor pela Botoeira de Comando S1-O;
2. Ajuste 054 = P055 = 0 %;
3. Monitore com um osciloscópio o sinal  $I_c$  com relação à AGND do cartão interno do CCW4;
4. Ative a Chave SE1 e compare o sinal com os mostrados na Figura 64 abaixo, desabilitando a Chave SE1 depois de feito a comparação. Caso necessário, Ajuste P063 e P064 conforme as instruções da imagem e repita este passo até obter o sinal com ganho ideal conforme mostrado no item “b”;

**a) Ganho muito baixo.**

Ajustar P063 e/ou P064.



**b) Ganho Ideal.**



**c) Ganho muito alto.**

Ajustar P063 e/ou P064.



Figura 64: Possíveis comportamentos do sinal  $I_c$ , no cartão CCW4.

5. Com o Bloqueio Geral ativado (re-acione SBG-O por garantia) desativada, acione a botoeira S1-I;
6. Ajuste 054 = P055 = 100 %;
7. Acione SBG-I e ative SE1;
8. Caso o sinal esteja instável, altere P059 para alterar o Ganho Integral;
9. Mantendo 054 = P055 = 100 %, acione SBG-O e, assim que o motor parar, acione SBG-I novamente e aguarde até o motor alcançar a velocidade máxima. Realize esse teste nas condições de sem e com carga. Caso o motor esteja demorando para acelerar, não correspondendo ao tempo definido no parâmetro P033, então P058, que representa o Ganho Proporcional, está muito baixo e deve ser aumentado;
10. Acione SBG-O e desative SE1;

11. Ajuste P000 = 5 para salvar os parâmetros.
12. Desative todos os Contatores a partir das botoeiras SBG-O, S1-O, S2-O, S3-O e S4-O, confirme que todas as Chaves de Habilitação SE1-3 estão desativadas e abra a Chave Geral para a completa desenergização da Bancada.

Após a sessão acima, o Conversor CTW-04 estará configurado e operacional.

Tabela de configuração de parâmetros do Conversor CTW-04

<b>PARÂMETROS DO MODO DE OPERAÇÃO</b>		
P000	Gravação dos parâmetros	?
P002	Malha de Controle da Corrente de Campo –IC	1
P004	Modo de operação	?
P005	Tipo de conversor	1
P007	Controle de Torque	0
P008	Controle do Ângulo de Disparo	0
P009	Tempo da Rampa de Desaceleração	0
P011	Contato do relé de n = 0	Irrelevante
P013	Alteração do Modo de Operação	Irrelevante
P014	Faixa de ajuste da Rampa	0
P015	Bloqueio por Velocidade Nula (Lógica de Parada)	0
P016	Modo de saída do Bloqueio por velocidade Nula	0
P017	Detetor de IA > IX (Ver P071)	0 (ativo)
P018	Detetor de Falta de Tacogerador ou Encoder Incremental	0
P024	Seleção da Referência de Velocidade	4
P025	Seleção da Realimentação de Velocidade	0
P028	Função da entrada AI1	0
P029	Função da entrada AI2	0
	<b>Comunicação Serial</b>	
P019	Referência de velocidade	0
P020	Seleção do Bloqueio Geral, Bloqueio por Rampa e Reset por Falhas	0
P021	Seleção do Sentido de Giro	0
P022	Seleção do Comando jog+, Jog-	0
P065	Função da DI (XC1: 37)	0
P083	Serial WEGBus	0
P084	Endereço do Conversor	1
P085	FieldBus	0
P086	Tipo de Bloqueio com E29/E30	0
	<b>Dados do Conversor</b>	
P026	Seleção da Tensão Nominal de Armadura	0
P027	Seleção da Corrente Nominal de Armadura	2
	<b>Sobrecarga [ I x t ]</b>	
P067	Corrente de Sobrecarga - I x t	125
P068	Corrente Máx. sem Sobrecarga - I x t	100

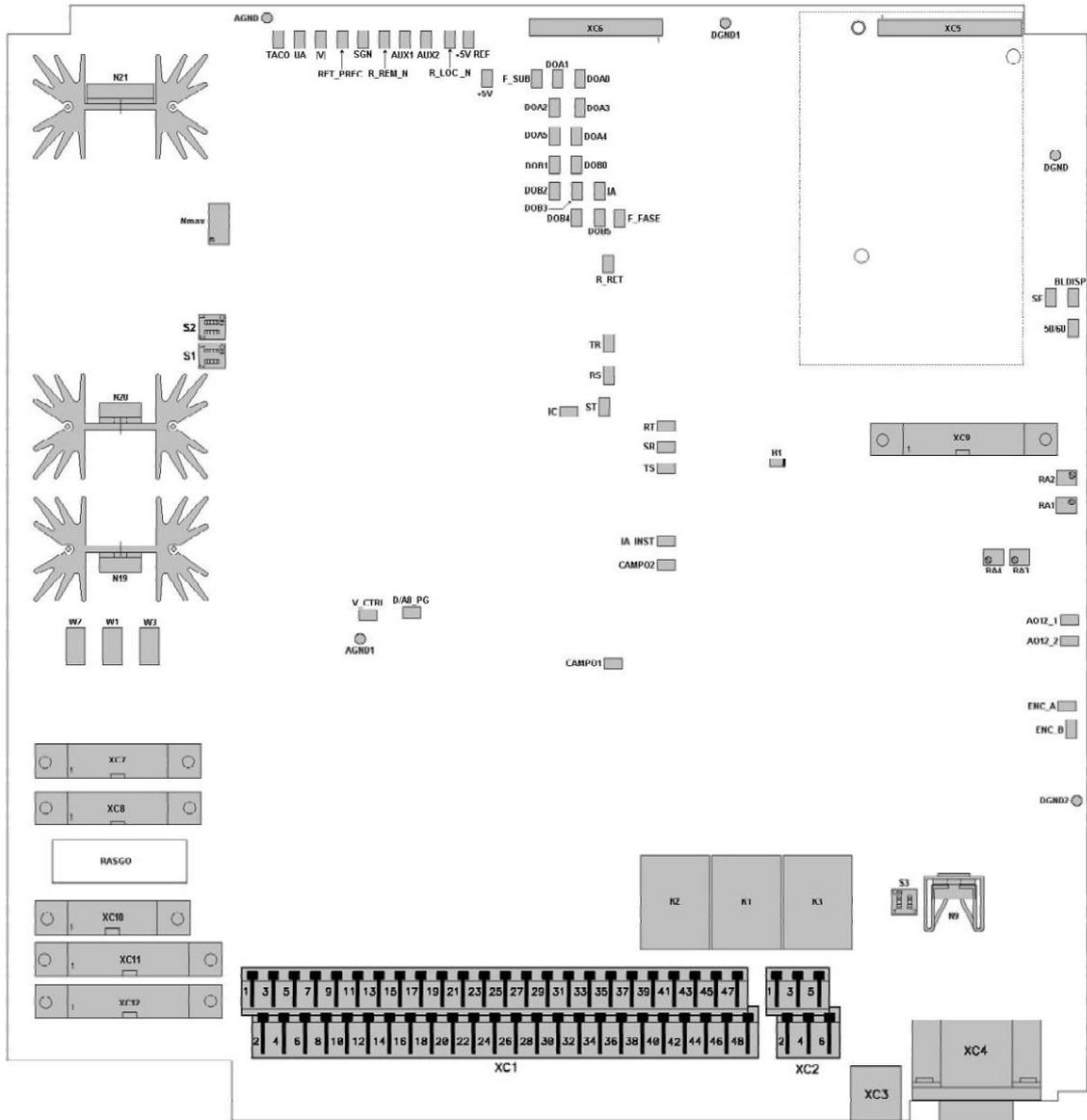
P069	Tempo de Atuação	60
P070	Função da DO programável (XC1: 38)	0
<b>PARÂMETROS DE REGULAÇÃO</b>		
Saídas Analógicas		
P030	Função da Saída AO D/A (8 bits)	8
P046	Função da Saída AO1 D/A (12 bits)	0
P047	Função da Saída AO2 D/A (12 bits)	0
P078	Ganho da Saída AO D/A (8 bits)	1.0
P079	Ganho da Saída AO1 D/A (12 bits)	1.0
P080	Ganho da Saída AO2 D/A (12 bits)	1.0
Rampas		
P032	Tempo de Aceleração	15
P033	Tempo de Desaceleração	15
Referência de Velocidade		
P034	Velocidade Mínima	0
P037	JOG+	0
P038	JOG-	0
P056	Referência de Velocidade n1*	0
P057	Referência de Velocidade n1*	0
P076	Offset da Referência	0
Nx, Ny, Ix, N = 0		
P035	Atuação de n = n*	2.0
P036	Atuação de n = 0	1.0
P071	Corrente Ix (Ver P017)	125
P072	Velocidade Ny	0.0
P073	Velocidade Nx	100
Regulador de Velocidade		
P039	Ganho Proporcional	4.0
P040	Ganho Integral	0.12
P041	Ganho Diferencial	0
P048	Ganho Proporcional - P065 (Ver P065)	0

P049	Ganho Integral - P065 (Ver P065)	0
	Regulador de Corrente	
P042	Ganho Proporcional	0.26
P043	ganho Integral (Intermitente)	35
P044	Ganho Ingegral (Contínua)	70
P045	Taxa de Variação $I^*(dI^* / dt)$	20
P054	Limitação de Corrente (+I) (Ver P028)	25.0
P055	Limitação de Corrente (-I) (Ver P028)	25.0
	Entradas Analógicas	
P050	Ganho da Entrada AI1	1.0
P051	ganho da Entrada AI2	1.0
	Encoder Incremental	
P052	Frequência Máxima - Centena	0
P053	Frequência Máxima - Milhar	21
	Regulador da FCEM	
P031	Compensação de $R_a = P031/1000$	0
P058	Ganho Proporcional	1.50
P059	Ganho Integral	0.25
P066	Ganho do Sinal	1.00
	Regulador da Corrente de Campo	
P060	Corrente Nominal	19
P061	Corrente Mínima	19
P100	Corrente de Economia	0
P063	Ganho Proporcional	0.2
P064	Ganho Integral	0.1

	Limitação de Corrente em Função de n	
P074	Corrente Imin	125
P075	Velocidade n1	100

Esquema simplificado o Cartão CCW4 somente com possíveis pontos de interesse

**Posição dos elementos de ajuste:**



## **ANEXO B**

### **PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO PADRÃO DE PARAMETRIZAÇÃO PARA SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO E CARGA DO INVERSOR CFW 09 DA BANCADA DINÂMICA DE MÁQUINAS ROTATIVAS**

**APLICAÇÃO:** Bancada Dinâmica de Máquinas Rotativas

**LOCAL:** Laboratório de Eletrônica de Potência (LabEP), Prédio de Laboratórios de Engenharia Elétrica e Computação, UFPA Campus Belém

**EDIÇÃO:** 1ª

**ELABORADO POR:** Ygor Pereira Vaz e Marcos Lopes

**REVISADO POR:** Petrônio Vieira Junior

**APROVADO POR:**

**DATA DE APROVAÇÃO:**    /    /

## OBJETIVO

Parametrizar o Inversor CFW 09, modelo CFW090054T2223PODBZ, da Bancada Dinâmica de Máquinas Rotativas presente no LabEP, do Prédio de Laboratórios de Engenharia Elétrica e Computação da UFPA Campus Belém, para se obter o controle linear de sua tensão de saída quando utilizado para alimentar a Carga RL presente na Bancada. O conjunto Inversor-Carga RL será utilizado como carga de potência ajustável nas simulações de geração e de carga da Bancada.



# EQUIPAMENTOS E FERRAMENTAS NECESSÁRIAS

Para a correta execução desse POP, é necessário ter disponível os seguintes itens:

## Equipamentos

- Multiteste;
- Alicates Amperímetro;
- Osciloscópio de alta resolução/taxa de amostragem;
- Termômetro Infravermelho;

## Ferramentas

- Chave Hexagonal Allen nº ?;
- Chave de Fenda ?;

## Cabos

- 3 cabos Isolados de 16mm<sup>2</sup> e 1? M;

# VISÃO GERAL DA BANCADA DINÂMICA

## Chave Geral

A Chave Geral, fixada à parede do LabEP, energiza a Bancada quando fechada, conforme a Figura 65. Toda e qualquer manutenção nas conexões da Bancada ou nos equipamentos presentes devem ser feitas com a Chave Geral aberta para garantir que a Bancada esteja desenergizada e não haja o risco de acidentes elétricos.

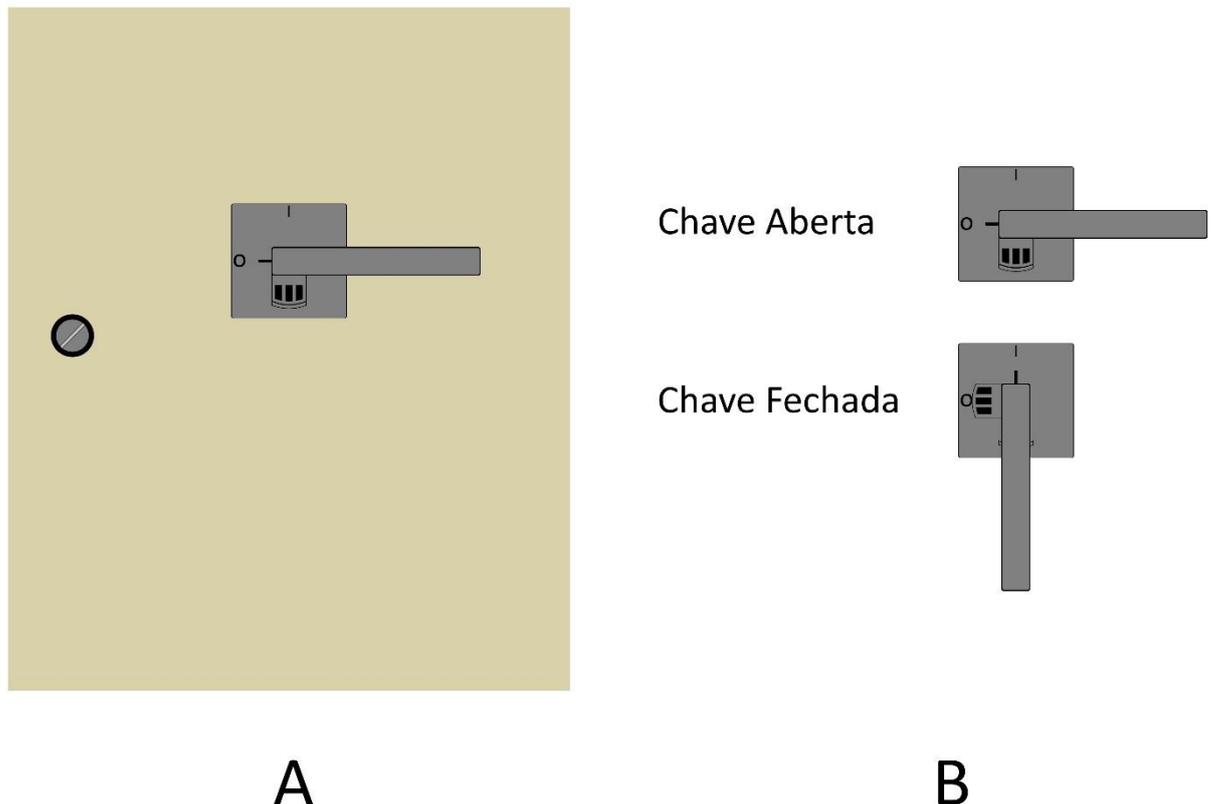


Figura 65: (A) Ilustração da Chave Geral presente no Laboratório de Eletrônica de Potência. (B) Ilustração da chave nas posições aberta e fechada que, respectivamente, impede ou permite a alimentação da Bancada.

## Componentes da Bancada

As cinco Botoeiras de Comando SBG e S1-S4, presentes na Bancada conforme a Figura 66 (Figura da visão geral da bancada), permite ativar ou desativar contadores que controlam a alimentação de diversas conexões da Bancada, tendo cada botoeira botões de ativação e desativação “I” e “O” respectivamente, conforme o mostrado na Figura 67. As botoeiras e suas respectivas funções são:

SBG: Desativa o Bloqueio Geral do Conversor;

S5: Ativa a Alimentação do retificador de armadura do Conversor;

S6: Ativa a Eletrônica do Conversor CTW-04;

S7: Ativa os Ventiladores do Conversor, do Motor e a alimentação de campo do Conversor;

S8: Permite a alimentação do Inversor pelo Gerador.

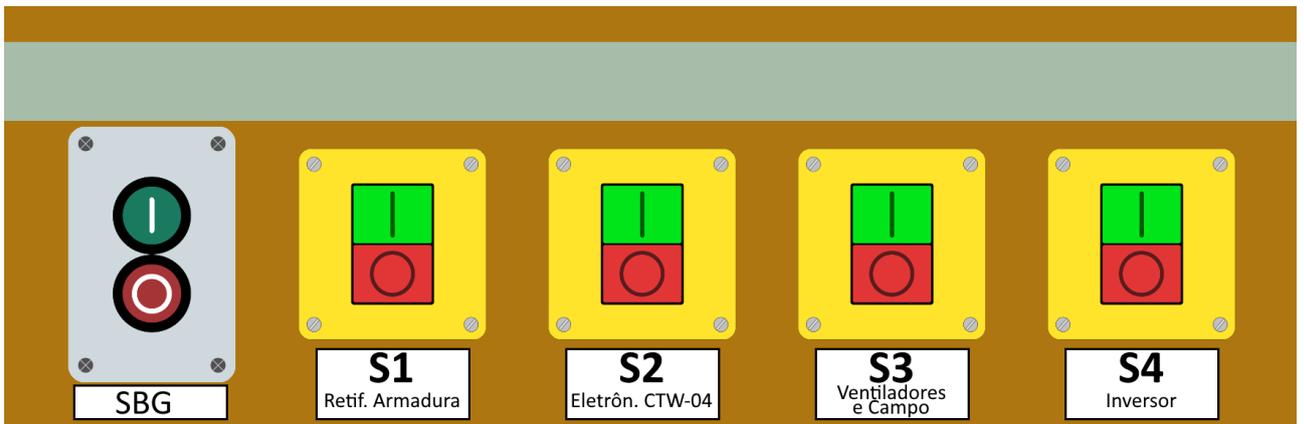


Figura 66: Ilustração das Botoeiras de Comando SBG e S1-S4 representando suas posições com relação à sua localização na Bancada conforme a Figura [Figura Geral da Bancada].

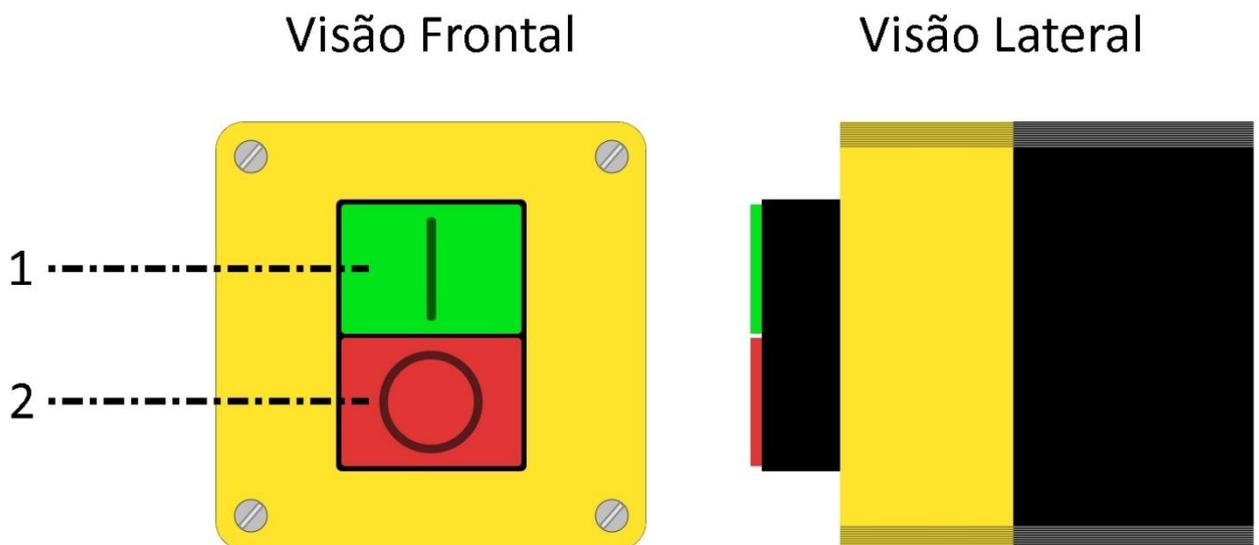


Figura 67: Ilustração de uma Botoeira de Comando sendo (1) o Botão de Ativação “I”, em verde, e (2) o Botão de Desativação “O”, em Vermelho.

## Inversor

O Inversor, indicado na Figura 68 tem seus cabos de alimentação conectados à jusante da Contatora K4, também indicada como Item Y? na mesma figura. Para se ter acesso as suas conexões de Potência/Aterramento e Controle, é necessário abrir sua tampa frontal, destravando os parafusos e movimentando a lateral esquerda da tampa como indicado na Figura 68. Deve-se considerar que sempre que for necessário abrir a tampa do Inversor, o mesmo deve estar desenergizado por pelo menos 10 minutos, para que haja o descarregamento total de seus capacitores de potência.

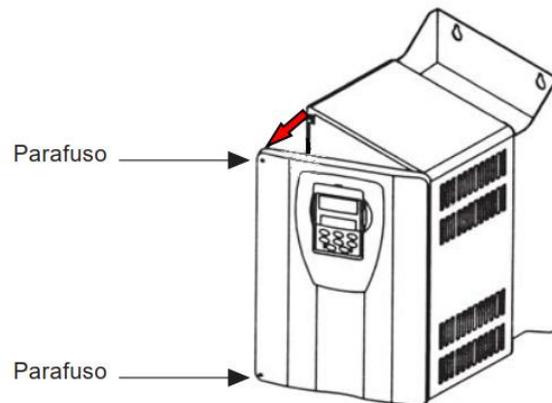


Figura 68: Indicação do processo de abertura da Tampa do Inversor.

## HMI do Inversor

A operação do Inversor é feita a partir do uso de seu painel HMI, ilustrado na Figura 69 abaixo:

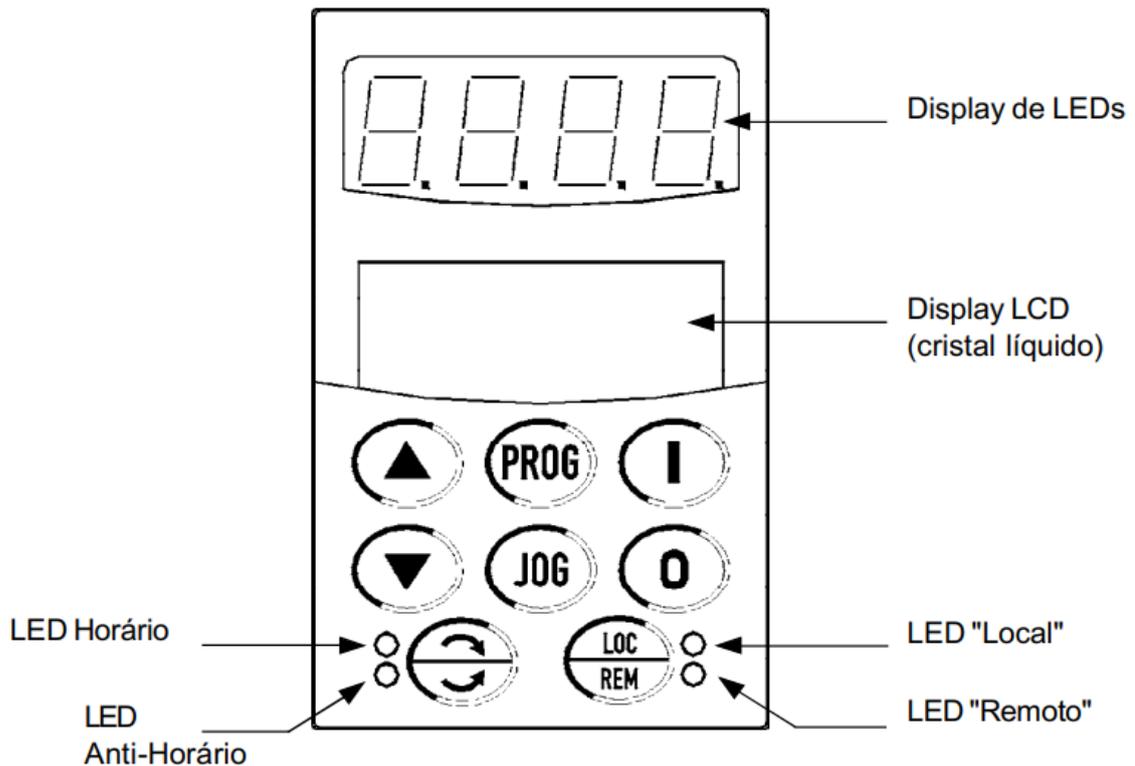


Figura 69: Representação do painel HMI do Inversor.

O Display de LEDs mostra de forma simplificada o estado do inversor, o parâmetro atual na tela de seleção de parâmetros, o valor do parâmetro selecionado ou mensagens de erro. O Display LCD mostra mensagens mais detalhas do parâmetro ou estado atual do Inversor. O funcionamento de cada botão do painel consta na Tabela abaixo.

Tabela: Funções dos botões da HMI do Inversor.

	<p>Habilita o inversor via rampa (partida). Após habilitação, a cada toque, comuta as indicações de acesso rápido no display como indicado abaixo:</p> <p>rpm → V → Estado → Torque → % → Hz → A</p>
	<p>Desabilita o inversor via rampa (parada). Reseta o inversor após a ocorrência de erros</p>
	<p>Seleciona (comuta) display entre número do parâmetro e seu valor (valor/posição/conteúdo).</p>
	<p>Aumenta a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro. Diminui a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro.</p>

	Inverte o sentido de rotação do motor comutando entre Horário e AntiHorário.
	Seleciona a origem dos comandos/referência entre LOCAL ou REMOTO.
	Se o inversor estiver desabilitado por rampa e com habilita geral ativado, essa tecla quando pressionada realiza a função JOG, fazendo a referência de velocidade (velocidade desejada do motor) se tornar imediatamente àquela definida no parâmetro P122.

Caso no Display LED esteja se exibindo a mensagem “ready”, significa que o Inversor está pronto para ser operado, devendo-se apertar a tecla  para confirmar a mensagem. Caso no display de LED esteja sendo exibido a letra “P” seguida de 3 dígitos (Ex.: P000), a HMI está na tela de seleção de parâmetros. Caso não haja letras presentes, a HMI está na tela de alteração do valor do parâmetro selecionado. Para alterar entre os dois modos, deve-se utilizar a tecla . Assim, na tela de seleção de parâmetros, deve-se selecionar o parâmetro desejado utilizando os botões  e , e, para alterar seu valor, utilizar a tecla  para mudar para a tela de seleção de valor, escolhendo então o valor desejado com  e  e depois retornando para a tela de seleção de parâmetros com a tecla  novamente.

Caso no Display LED a mensagem exibida se inicie com “E”, significa que a HMI está indicando um erro. Ao se interromper a alimentação do Inversor, o Display LED irá começar a piscar enquanto exibe o Erro 03 (E03), indicando que a alimentação do inversor foi perdida, sendo este um comportamento normal e esperado do mesmo. Na ocorrência de erros em situações não indicadas no passo-a-passo desse POP, deve-se anotar o erro ocorrido e imediatamente desenergizar o Inversor/a Bancada de testes, seguido da notificação de um profissional qualificado para a investigação do erro.

## AJUSTE DOS PARÂMETROS DO INVERSOR

### Remoção da carga do Inversor

- Certifique-se que o conjunto motor-gerador não esteja em operação, que a Conversor CA-CC esteja desligado e que a chave geral da Bancada Dinâmica esteja aberta;
- Destrave e abra a tampa frontal do Inversor para obter acesso aos bornes de potência;
- Desconecte os cabos de alimentação da carga RL dos bornes de potência U, V e W;
- Feche e trave a tampa frontal do Inversor;

### Energização do Inversor

- Acione o conjunto motor-gerador à velocidade nominal de 1800 RPM (100% da velocidade). Certifique-se que o conjunto está na velocidade nominal com o auxílio de um tacômetro;
- Acione a botoeira S4-I para energizar o Inversor. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display da HMI;

### Restauração dos ajustes de fábrica do Inversor da Bancada Dinâmica

- Com a mensagem “Ready” aparecendo no Display do Inversor, pressione a tecla  1 vez para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste os parâmetros P201, P295, P296, P297 e P308 de acordo com a Tabela abaixo;

Tabela: Ajustes preparativos para restauração dos ajustes da WEG de fábrica p/60Hz

PARÂMETRO	AJUSTE
P201	0
P295	14
P296	0
P297	2
P308	1

- Ajuste P204 = 5 (Carrega os ajustes de fábrica da WEG para 60Hz). Ao realizar esse ajuste, será necessário ajustar imediatamente os parâmetros P201, P296, P400, P401, P403, P402, P404 e P406, nessa ordem, de acordo com a tabela abaixo. No momento de ajuste desses parâmetros, somente avance para o próximo ao se confirmar o correto ajuste do parâmetro atual. Ao avançar após o parâmetro P406, a mensagem “rdy” (pronto) deve aparecer no inversor. Aperte a tecla  1 vez para o inversor voltar à tela de seleção de parâmetros. Caso se tenha feito o ajuste incorreto de um parâmetro, repita este passo;

Tabela: Ajustes necessários após a solicitação da restauração dos ajustes de fábrica para 60Hz

PARÂMETRO	AJUSTE
P201	0
P296	0
P400	142
P401	30
P403	60
P402	1800
P404	12
P406	0

### Parametrização do Inversor para alimentação da carga resistiva trifásica da Bancada Dinâmica

- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste P202 = 2 (V/F Ajustável). Após o ajuste, o Inversor irá exibir a mensagem “READY”/ retornar ao parâmetro P002;
- Ajuste os parâmetros do inversor de acordo com a tabela presente no anexo Ajuste de Parâmetros do Inversor CFW 09.
- . Os parâmetros não presentes na tabela não devem ser alterados;
- Com o auxílio de um multíteste, meça e anote a tensão de linha de entrada do Inversor a partir dos bornes de potência da contactora K4 (ver o Esquema de Ligação da Bancada no Anexo X);
- Ajuste o parâmetro P142 de acordo com a seguinte fórmula:

$$P142 = \frac{144,97}{\text{Tensão de Linha de Entrada do Inversor}}$$

- Desenergize o Inversor acionando a botoeira S4-O;
- Siga os passos do POP de Acionamento da Bancada para parar o conjunto motor-gerador e desenergizar por completo a Bancada Dinâmica.

### Teste de funcionamento

- Após a desenergização do Inversor é necessário o aguardo de 10 minutos para que haja o descarregamento dos capacitores de potência do Inversor antes de prosseguir para o próximo passo;
- Destrave e abra a tampa frontal do Inversor para obter acesso aos bornes de potência;
- Reconecte os cabos de alimentação da Carga LR Trifásica da Bancada Dinâmica nos correspondentes bornes de potência U, V e W do Inversor;
- Feche e parafuse a tampa frontal do Inversor;
- Siga os passos do POP de Acionamento da Bancada para energizar a Bancada Dinâmica e acionar o conjunto motor-gerador à velocidade nominal de 1800 RPM. Certifique-se que o conjunto está na velocidade nominal com o auxílio de um tacômetro;

- Acione a botoeira S4-I para energizar o Inversor. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display da HMI;
- Pressione a tecla  1 vez para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
- Ajuste P001 = 3520 e habilite o Inversor pressionando o botão  em seu painel;
- Confirme se a Corrente do Motor em P003 é igual à 3 A;
- Confirme se a Tensão de Saída em P007 é igual à ~14,2 V;
- Utilizando um osciloscópio e um sensor de corrente, confirme se a corrente que passa individualmente nos cabos da Cara RL Trifásica conectada aos bornes de potência do Inversor é igual a ~3 A;

NOTA: É necessário a utilização de um osciloscópio com taxa de amostragem/resolução alta o suficiente para verificar harmônicos de alta frequência. Recomenda-se a utilização do osciloscópio da fabricante Agilent Technologies, Modelo DSO-X-2012A, do LabEP para essa verificação.

- Ajuste P001 = 3700;
- Confirme se a Corrente do Motor em P003 é igual à 30 A;
- Confirme se a Tensão de Saída em P007 é igual à ~145 V;
- Utilizando um osciloscópio e um sensor de corrente, confirme se a corrente que passa individualmente nos cabos da Cara RL Trifásica conectada aos bornes de potência do Inversor é igual a 30A;

Nota: variações na tensão de entrada do Inversor irá resultar numa variação inversamente proporcional da corrente de entrada dele. Utilize um multiteste nos bornes da contatora de alimentação do Inversor para verificar a tensão da rede e confirmar se a corrente de entrada encontrada é condizente.

- Ajuste lentamente P001 de 3700 à 3500 para zerar a corrente de saída do Inversor;
- Desabilite o Inversor pressionando o botão . A mensagem “READY” deve aparecer em seu display;
- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste P204 = 10 para realizar o back-up dos ajustes atuais dos parâmetros do Inversor no “usuário 1”;
- Mensagem de confirmação?
- Após o ajuste indicado no passo acima, desenergize o Inversor acionando a botoeira S4-O;
- Siga os passos do POP de Acionamento da Bancada para parar o conjunto motor-gerador e desenergizar por completo a Bancada Dinâmica.

Após este último passo, o Inversor estará corretamente parametrizado para sua operação em conjunto com a Carga RL Trifásica para simulação de geração e carga.

Ajustes dos parâmetros para configuração do Inversor para alimentação da Carga RL da Bancada Dinâmica.

<b>PARÂMETROS DE REGULAÇÃO</b>		
<b>P100</b>	Tempo de aceleração	2.0
<b>P101</b>	Tempo de desaceleração	2.0
<b>P122</b>	Referência de velocidade para JOG ou JOG+	1000
<b>P132</b>	Nível máximo de sobrevelocidade	2
<b>P133</b>	Referência de velocidade mínima	3500
<b>P134</b>	Referência de velocidade máxima	3700
<b>P135</b>	Velocidade de atuação do controle I/F	2
<b>P136</b>	Boost de torque manual (IxR)	0
<b>P138</b>	Escorregamento nominal	0
<b>P142</b>	Tensão de saída máxima	64,9
<b>P143</b>	Tensão de Saída intermediária	0
<b>P144</b>	Tensão de saída em 3Hz	0
<b>P145</b>	Velocidade de início do enfraquecimento do campo	3700
<b>P146</b>	Velocidade Intermediária	3500
<b>P151</b>	Nível de atuação da regulação da Tensão do link CC	375
<b>P156</b>	Corrente de Sobrecarga do Motor à Velocidade Nominal	32
<b>P157</b>	Corrente de Sobrecarga do Motor à 50% da Velocidade Nominal	32
<b>P158</b>	Corrente de Sobrecarga do Motor à 5% da Velocidade Nominal	32
<b>P169</b>	Corrente Máxima de Saída	33
<b>P206</b>	Tempo de Auto-Reset	0
<b>P209</b>	Detectação de Falta de Fase no Motor	1
<b>P211</b>	Bloqueio por N = 0 (Lógica de Parada)	1
<b>P212</b>	Condição para Saída de Bloqueio por N = 0	1
<b>P222</b>	Seleção Referência de Velocidade Situação REMOTO	0
<b>P226</b>	Seleção do Sentido de GIRO Situação REMOTO	2
<b>P227</b>	Seleção Gira/Pára Situação REMOTO	0
<b>P228</b>	Seleção Fonte de JOG Situação REMOTO	1
<b>P263</b>	Função da Entrada Digital DI1	0
<b>P268</b>	Função da Entrada Digital DI6	0
<b>P279</b>	Função Saída a Relé RL2	0
<b>P280</b>	Função Saída a Relé RL3	0
<b>P400</b>	Tensão Nominal do Motor	220
<b>P401</b>	Corrente Nominal do Motor	30
<b>P402</b>	Velocidade Nominal do Motor	7200
<b>P404</b>	Potência Nominal do Motor	12

## **ANEXO C**

### **PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO PADRÃO PARA CONFIGURAÇÃO E ACIONAMENTO DE MOTOR WEG DE INDUÇÃO 220 V/4,42 A POR INVERSOR DE FREQUÊNCIA CFW 09 (MODELO CFW090045T2223PSZ)**

**APLICAÇÃO:**

**LOCAL:** Laboratório de Eletrônica de Potência (LabEP) e Laboratório de estudos em acionamento eletrônico (Sala 38), Prédio de Laboratórios de Engenharia Elétrica e Computação, UFPa Campus Belém

**EDIÇÃO:** 1<sup>a</sup>

**ELABORADO POR:** Ygor Pereira Vaz e Marcos Lopes

**REVISADO POR:** Petrônio Vieira Junior

**APROVADO POR:**

**DATA DE APROVAÇÃO:**

## OBJETIVO

Parametrizar o Inversor CFW 09 modelo CFW090045T2223PSZ e com este acionar com controle de velocidade os motores WEG de indução 220 V/4,42 A presentes no LabEP e na Sala 38, do Prédio de Laboratórios de Engenharia Elétrica e Computação da UFPA Campus Belém, com o propósito de permitir testes e estudos de acionamento eletrônico com inversores de frequência. O controle poderá ser feito tanto pelo modo de controle V/F quanto pelo Vetorial *Sensorless*.

O propósito desse manual é para o controle mais simples do motor, sem usar resistores de frenagem ou as portas digitais/analógicas do inversor. Esse POP foi feito especificamente para os inversores CFW09 de tensão nominal 220V e motores trifásicos de indução 60Hz;



## Esquema de ligação do conjunto inversor-motor

AVISO: O esquema de ligação aqui apresentado foi planejado somente para o uso do motor do LabEP / Sala 38, de especificações mostradas na Figura 70 e da configuração dos ajustes do inversor conforme mostrada na Figura 71. O uso de um motor de maior corrente e/ou a utilização de outra parametrização do inversor poderá levar à sobrecarga dos cabos, pontos quentes e perigo de incêndio. Não se deve utilizar este POP como guia para a ligação de outros motores e deve-se respeitar a seção mínima dos cabos assim como as especificações dos fusíveis utilizados.



Figura 70: Placa de identificação do motor WEG utilizado.

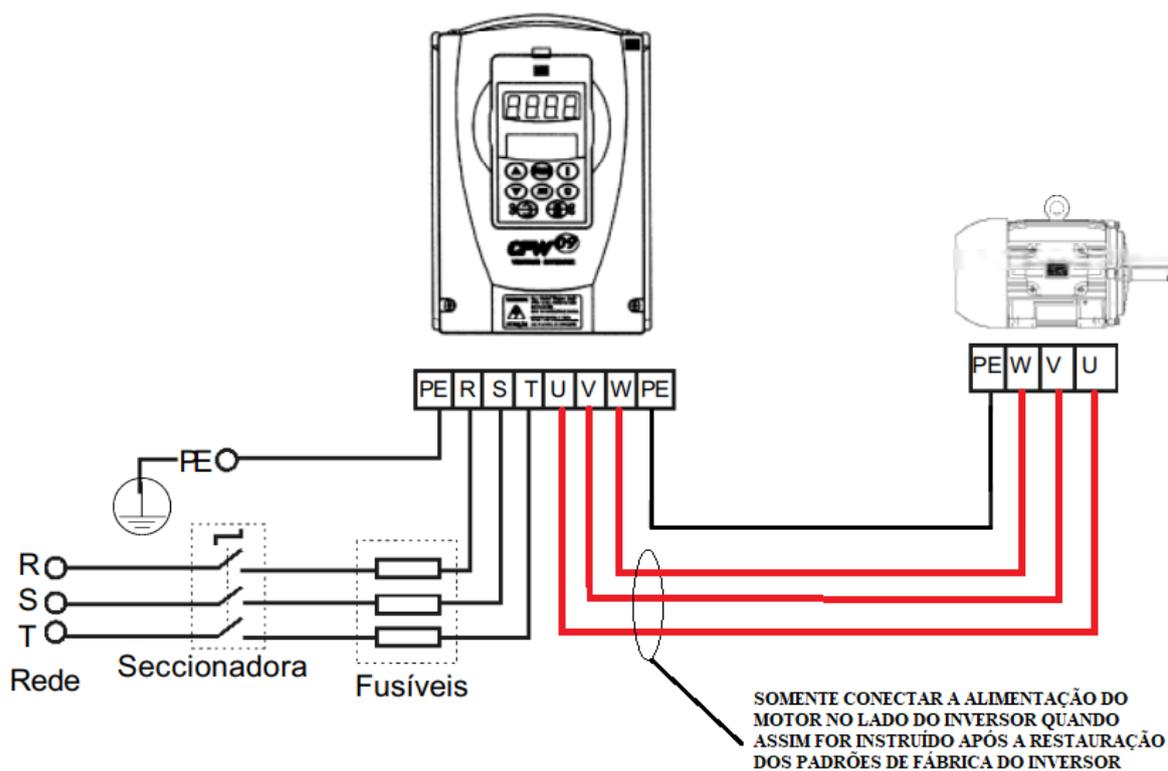


Figura 71: Esquema de ligação do conjunto inversor-motor.

Tabela: especificações dos fusíveis e cabos à serem utilizados

SEÇÃO MÍNIMA DOS CABOS (FASE + TERRA)	2,5 mm <sup>2</sup>
ESPECIFICAÇÃO DOS FUSÍVEIS	Fusíveis ultra-rápidos de 25 A,
I <sup>2</sup> T DO FUSÍVEL I <sup>2</sup> T @25 °C	Menor ou igual à 450 A <sup>2</sup>

O aterramento do motor pode ser feito no próprio Inversor, como indicado na imagem acima, ou no mesmo ponto onde o Inversor está aterrado.

O motor deve ser conectado em Delta (Método de ligação para 220 V), seguindo o indicado em sua placa de identificação.

Certifique-se que não haja cabos conectados às entradas/saídas de sinal e controle do inversor.

A princípio, os cabos de alimentação do motor não devem estar conectados aos bornes de potência U, V e W do Inversor, devendo eles serem conectados somente quando instruídos após a restauração dos padrões de fábrica do Inversor.

Caso o inversor esteja fora de uso há 1 ano ou mais, é necessário energizá-lo por 1h, mantendo-o desabilitado durante esse período e com o motor desconectado dele, seguido de 24hs de repouso antes de operá-lo normalmente.

## Controle da HMI do Inversor

A operação do Inversor é feita a partir do uso de seu painel HMI, ilustrado na Figura 69 abaixo:

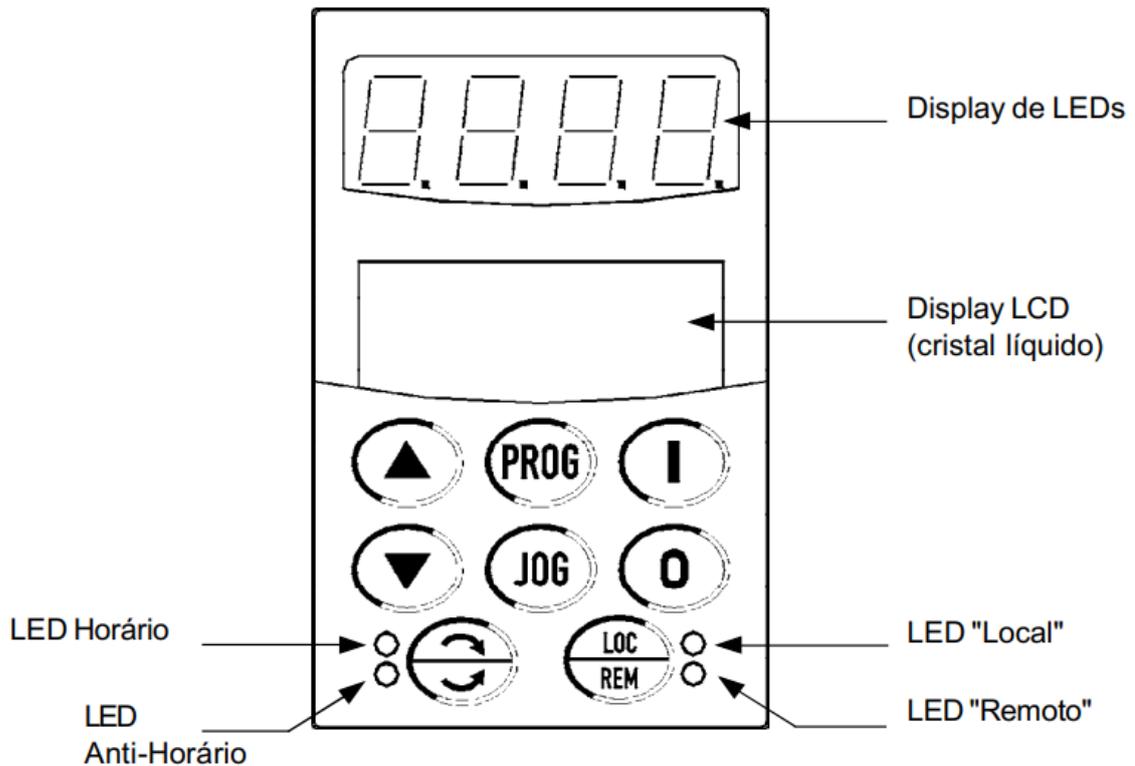


Figura 72: Representação do painel HMI do Inversor.

O Display de LEDs mostra de forma simplificada o estado do inversor, o parâmetro atual na tela de seleção de parâmetros, o valor do parâmetro selecionado ou mensagens de erro. O Display LCD mostra mensagens mais detalhas do parâmetro ou estado atual do Inversor.

Tabela: Funções dos botões da HMI do Inversor.

	<p>Habilita o inversor via rampa (partida). Após habilitação, a cada toque, comuta as indicações de acesso rápido no display como indicado abaixo:</p> <p>rpm → V → Estado → Torque → % → Hz → A</p>
	<p>Desabilita o inversor via rampa (parada). Reseta o inversor após a ocorrência de erros</p>
	<p>Seleciona (comuta) display entre número do parâmetro e seu valor (valor/posição/conteúdo).</p>

	Aumenta a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro. Diminui a velocidade, número do parâmetro ou valor do parâmetro.
	Inverte o sentido de rotação do motor comutando entre Horário e AntiHorário.
	Seleciona a origem dos comandos/referência entre LOCAL ou REMOTO.
	Se o inversor estiver desabilitado por rampa e com habilita geral ativado, essa tecla quando pressionada realiza a função JOG, fazendo a referência de velocidade (velocidade desejada do motor) se tornar imediatamente àquela definida no parâmetro P122.

Caso no Display LED esteja se exibindo a mensagem “rdy”, significa que o Inversor está pronto para ser operado, devendo-se apertar a tecla  para confirmar a mensagem. Caso no display de LED esteja sendo exibido a letra “P” seguida de 3 dígitos (Ex.: P000), a HMI está na tela de seleção de parâmetros. Caso não haja letras presentes, a HMI está na tela de alteração do valor do parâmetro selecionado. Para alterar entre os dois modos, deve-se utilizar a tecla . Assim, na tela de seleção de parâmetros, deve-se selecionar o parâmetro desejado utilizando os botões  e, para alterar seu valor, utilizar a tecla  para mudar para a tela de seleção de valor, escolhendo então o valor desejado com  e depois retornando para a tela de seleção de parâmetros com a tecla  novamente.

Caso no Display LED a mensagem exibida se inicie com “E”, significa que a HMI está indicando um erro. Ao se interromper a alimentação do Inversor, o Display LED irá começar a piscar indicando o Erro 03 (E03), indicando que a alimentação do inversor foi perdida, sendo este um comportamento normal e esperado do mesmo. Na ocorrência de erros em situações não indicadas no passo-a-passo desse POP, deve-se anotar o erro ocorrido e imediatamente desenergizar o Inversor/a bancada de testes, seguido da notificação de um profissional qualificado para a investigação do erro.

## AJUSTE DOS PARÂMETROS DO INVERSOR

### Restauração dos ajustes de fábrica do Inversor

- Certifique-se que os cabos de alimentação do motor estejam desconectados do inversor;
- Energize o inversor fechando a contactora de sua alimentação. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display da HMI.
- Pressione a tecla  1 vez para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste os parâmetros P201, P295, P296, P297 e P308 de acordo com a Tabela abaixo;

Tabela: Ajustes preparativos para restauração dos ajustes da WEG de fábrica p/60Hz

PARÂMETRO	AJUSTE
P201	0
P295	13
P296	0
P297	2
P308	1

- Ajuste P204 = 5 (Carrega os ajustes de fábrica da WEG para 60Hz). Ao realizar esse ajuste, será necessário ajustar imediatamente os parâmetros P201, P296, P400, P401, P403, P402, P404 e P406, nessa ordem. No momento de ajuste desses parâmetros, somente avance para o próximo ao se confirmar o correto ajuste do parâmetro atual. Ao avançar após o parâmetro P406, a mensagem “rdy” (pronto) deve aparecer no inversor. Aperte a tecla  1 vez para o inversor voltar à tela de seleção de parâmetros. Caso se tenha feito o ajuste incorreto de um parâmetro, repita este passo;
- Desenergize o inversor e aguarde 10 minutos para que os capacitores de potência do Inversor se descarreguem;
- Desparafuse e abra a tampa frontal do Inversor para obter acesso aos bornes de potência;
- Conecte os cabos de alimentação do Motor nos correspondentes bornes de potência U, V e W do Inversor;
- Feche e parafuse a tampa frontal do Inversor;
- Re-energize o Inversor.

### Ajustes para controle escalar (V/F) ou Vetorial *Sensorless*

Siga somente o Item “A.” caso se deseje ajustar o Inversor para acionamento com controle escalar (V/F) ou somente o Item “B.” para Vetorial *Sensorless*.

### A. Controle Escalar (V/F)

- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste os parâmetros do inversor de acordo com a tabela presente no anexo Ajuste dos Parâmetros inversor CFW 09
- . Os parâmetros não presentes na tabela não devem ser alterados;
- Após os ajustes da tabela indicada no passo anterior serem concluídos, confirme se o motor está desacoplado da carga e então ajuste P001 = 857 (aproximadamente metade da velocidade nominal de 1715);
- Acione o motor pressionando a tecla . O motor deve começar a girar;
- Meça a velocidade do motor com o auxílio do tacômetro. A velocidade medida deve ser próxima da definida em P001 (857 RPM), com uma diferença de no máximo 17 RPM;
- Desabilite o inversor pressionando a tecla . O motor deve parar de girar;
- Desenergize o inversor;
- Acople o motor à carga (Freio de Foucault);
- Energize o inversor;
- Após a mensagem “rdy” aparecer na tela da HMI do Inversor, pressione a tecla  1 vez? para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
- Ajuste P001 = 857 (aproximadamente metade da velocidade nominal de 1715);
- Acione o motor pressionando a tecla . O motor deve começar a girar;
- Visualize o parâmetro P003 (Corrente do Motor);
- Acione e aumente gradativamente a intensidade do Freio de Foucault até que a corrente do motor, mostrada em P003, esteja próxima da nominal (4,42 A);
- Meça a velocidade do motor utilizando o tacômetro. Caso ela não seja igual à velocidade do motor medida anteriormente na situação de sem carga, varie gradativamente P138 até que a velocidade seja igual ou o mais próximo possível à ela (o parâmetro pode ser variado com o motor em operação);

NOTA: Durante este passo, deve-se ajustar P138 até que a velocidade real do motor com carga seja o mais próximo possível da medida na situação de sem carga. Para os próximos passos, pode-se considerar uma diferença de até 17 RPM (~1% da velocidade nominal do motor) como satisfatória.

- Desative o Freio de Foucault;
- Ajuste P001 = 90;
- Confirme que a corrente do motor em P003 é menor ou igual à 2,5 A;
- Desabilite o inversor pressionando a tecla . O motor deve parar de girar;
- Desenergize o inversor.

Após a realização desses passos o inversor estará corretamente configurado para o controle V/F do motor com precisão de até 1% da velocidade nominal.

## B. AJUSTES PARA CONTROLE VETORIAL SENSORLESS

- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste P202 = 3 (Modo de controle vetorial sensorless);
- P202 = 3 (Modo de controle vetorial sensorless). Ao realizar esse ajuste, será necessário ajustar imediatamente os parâmetros P400, P401, P403, P402, P404 e P406 de acordo com a Tabela abaixo. No momento de ajuste desses parâmetros, somente avance para o próximo ao se confirmar o correto ajuste do parâmetro atual. Ao avançar após o parâmetro P406, o parâmetro P408 deve piscar na tela;

ANTES DE PASSAR PARA O PRÓXIMO PASSO CONFIRME SE OS PARÂMETROS AJUSTADOS ACIMA ESTÃO CORRETOS. O AJUSTE INCORRETO PODERÁ RESULTAR NA QUEIMA DO ENROLAMENTO DO MOTOR

Tabela: Parâmetros iniciais para execução do auto-ajuste

PARÂMETRO	AJUSTE
P400	220
P401	4.4
P403	60
P402	1715
P404	4
P406	0

- Confirme que o motor está desacoplado da carga (Freio de Foucault) e então ajuste P408 = 1 (Auto-ajuste – “Gira p/ Imr”). Após esse ajuste, não se deve utilizar nenhuma tecla do inversor durante o período de auto-ajuste de em torno de 5 minutos SALVO NA SITUAÇÃO EM QUE SEJA NECESSÁRIO CANCELAR O AUTO-AJUSTE, PODENDO O CANCELAMENTO SER FEITO PRESSIONANDO A TECLA . O auto-ajuste estará concluído quando a mensagem “rdy” aparecer no visor do Inversor. Aperte a tecla  1 vez para o inversor voltar à tela de seleção de parâmetros.

Ao ajustar esse parâmetro, o inversor irá, automaticamente, ajustar os parâmetros P409, P410, P411, P412, P413 e parâmetros relacionados à estes. Durante o auto-ajuste o inversor irá acionar automaticamente o motor, onde será possível escutar um zumbido do motor e haverá períodos de giro do motor. A rotina de testes dura em torno de 5 minutos, terminando quando a mensagem “rdy” (pronto) aparecer no inversor.

- Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
- Ajuste os parâmetros do inversor de acordo com a tabela no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, seguindo a ordem da tabela. Os parâmetros não presentes na tabela não devem ser alterados;

- Após os ajustes da tabela indicada no passo anterior serem concluídos, confirme se o motor está desacoplado da carga e então ajuste P001 = 857 (aproximadamente metade da velocidade nominal de 1715);
- Acione o motor pressionando a tecla . O motor deve começar à girar;
- Meça a velocidade do motor com o auxílio do tacômetro. A velocidade medida deve ser próxima da definida em P001 (857 RPM);
- Desabilite o inversor pressionando a tecla . O motor deve parar de girar;
- Desenergize o inversor;
- Acople o motor à carga (Freio de Foucault);
- Após a mensagem “rdy” aparecer na tela da HMI do Inversor, pressione a tecla  1 vez? para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
- Ajuste P001 = 857 (aproximadamente metade da velocidade nominal de 1715);
- Acione o motor pressionando a tecla . O motor deve começar à girar;
- Visualize o parâmetro P003 (Corrente do Motor);
- Acione e aumente gradativamente a intensidade do Freio de Foucault até que a corrente do motor, mostrada em P003, esteja próxima da nominal (4,42 A);
- Meça a velocidade do motor utilizando o tacômetro. Caso ela não seja igual à velocidade do motor medida anteriormente na situação de sem carga, varie gradativamente P412 até que a velocidade seja igual ou o mais próximo possível à ela (o parâmetro pode ser variado com o motor em operação);

NOTA: Durante este passo, deve-se ajustar P412 até que a velocidade real do motor com carga seja o mais próximo possível da medida na situação de sem carga. Para os próximos passos, pode-se considerar uma diferença de até 9 RPM (0,5% da velocidade nominal do motor) como satisfatória.

- Desative o Freio de Foucault;
- Ajuste P001 = 90;
- Confirme que a corrente do motor em P003 é menor ou igual à 2,5 A;
- Desabilite o inversor pressionando a tecla . O motor deve parar de girar;
- Desenergize o inversor.
- Leia o AVISO 1 antes de realizar testes com o motor.

## CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR

### AVISO: ACIONAMENTO DO MOTOR EM CONJUNTO COM FREIO DE FOCAULT

Devido à corrente nominal do motor utilizado (4,42 A) ser muito inferior à corrente nominal do inversor (45 A), não é possível ajustar corretamente no inversor os parâmetros de proteção contra sobrecarga do motor, fazendo com que a única proteção contra sobrecarga do motor seja feita através do relé térmico, que é configurado somente para a situação do motor em velocidade máxima com variação de carga.

Dessa forma, não se recomenda a utilização do Freio de Focault quando o motor estiver abaixo de sua velocidade nominal. Abaixo da velocidade nominal, limitar o uso do Freio à períodos máximos de 15 segundos, seguidos de períodos de 45s com o Freio desligado para o resfriamento do motor, sempre verificando P003 para que a corrente máxima não ultrapasse 4,8 A (Corrente nominal do motor corrigida pelo fator de serviço  $F_s = 1.1$ );

- Energize o inversor. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display da HMI;
- Pressione a tecla  2 vezes para voltar ao modo de seleção de parâmetros. O parâmetro P002 deve aparecer no Display Vermelho da HMI;
- Ajuste P001 para a velocidade desejada entre 90 e 1715, utilizando os botões  para habilitar o inversor, fazendo o motor acelerar até a velocidade desejada, e  para desabilitar o inversor, fazendo o motor desalecerar até a parada. Caso P001 seja ajustado com o inversor habilitado, o motor irá ter sua velocidade variada juntamente com a variação do parâmetro;
- Sempre monitorar a corrente no motor a partir de P003, de acordo com o AVISO no início dessa sessão;
- Somente desenergizar o inversor com ele desabilitado e o motor parado, a menos que na ocorrência de um erro.

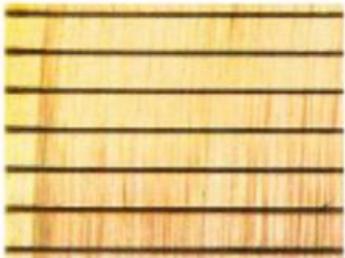
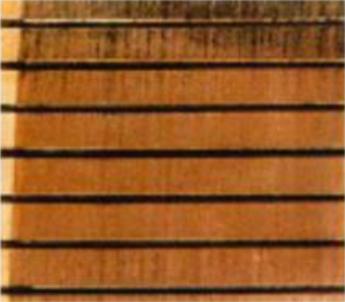
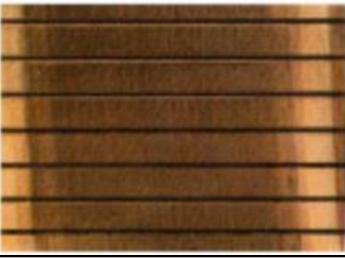
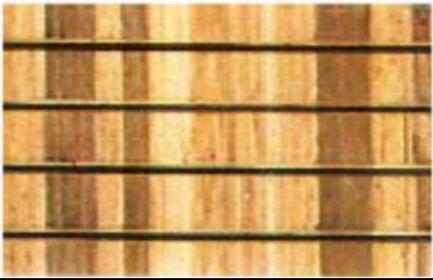
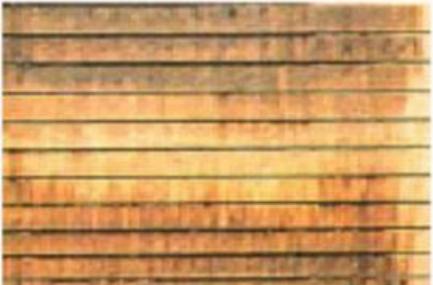
Tabela: Ajustes dos parâmetros para configuração do Inversor em modo de controle Escalar (V/F) a partir das configurações de fábrica p/ motores de 60 Hz.

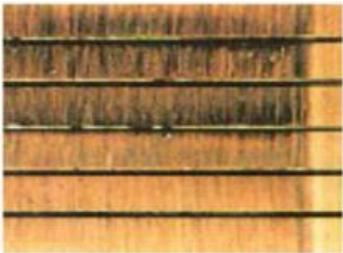
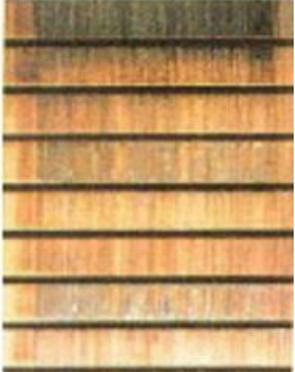
PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	AJUSTE/VALOR
P100	TEMPO DE ACELERAÇÃO	10
P101	TEMPO DE DESACELERAÇÃO	10
P122	Referência de velocidade para JOG ou JOG+	1715
P134	Referência de velocidade máxima	1715
P138	Escorregamento nominal	4,7
P151	Nível de atuação da regulação da Tensão do link CC <b>Com Controle V/F</b>	375
P158	Corrente de Sobrecarga do Motor à 5% da Velocidade Nominal	$0,2 * P295 = 0,2 * 45 = 9 \text{ A?}$
P157	Corrente de Sobrecarga do Motor à 50% da Velocidade Nominal	$0,2 * P295 = 0,2 * 45 = 9 \text{ A?}$
P156	Corrente de Sobrecarga do Motor à Velocidade Nominal	$0,2 * P295 = 0,2 * 45 = 9 \text{ A?}$
P169	Corrente Máxima de Saída <b>Com Controle V/F</b> <b>(P202 = 0, 1 ou 2)</b>	9A
P209	Detectação de Falta de Fase no Motor	1
P211	Bloqueio por N = 0 (Lógica de Parada)	1
P222	Seleção Referência de Velocidade Situação REMOTO	0
P226	Seleção do Sentido de GIRO Situação REMOTO	2
P227	Seleção Gira/Pára Situação REMOTO	0
P228	Seleção Fonte de JOG Situação REMOTO	1
P263	Função da Entrada Digital DI1	0
P268	Função da Entrada Digital DI6	0
P279	Função Saída a Relé RL2	0
P280	Função Saída a Relé RL3	0
P295	Corrente Nominal do Inversor	13
P296	Tensão de Entrada Nominal	0
P400	Tensão Nominal do Motor	220
P401	Corrente Nominal do Motor	$1.0 * P295 = 4.42$
P402	Velocidade Nominal do Motor	1715
P404	Potência Nominal do Motor	4

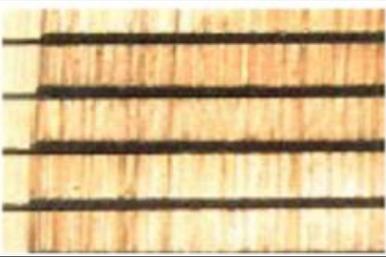
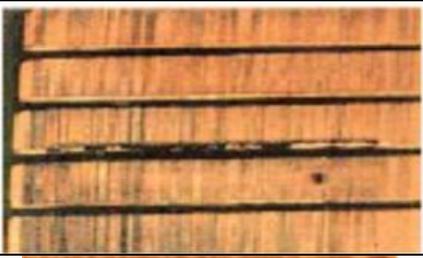
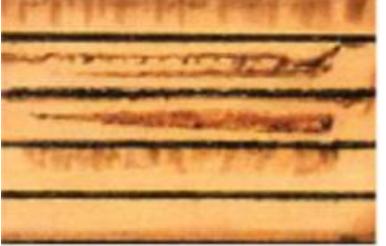
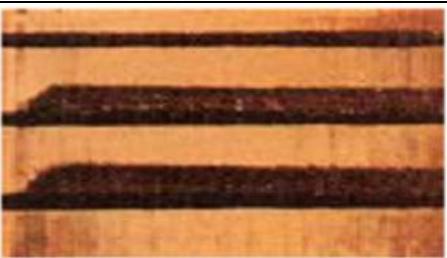
Tabela: Ajustes dos parâmetros para configuração do Inversor em modo de controle Vetorial Sensorless a partir das configurações de fábrica p/ motores de 60 Hz e após a execução da rotina de auto-ajuste.

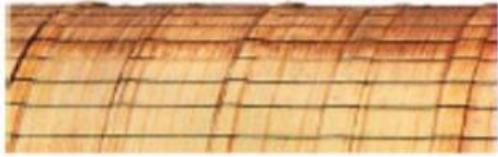
<b>PARÂMETRO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>AJUSTE/VALOR</b>
<b>P100</b>	Tempo de aceleração	10
<b>P101</b>	Tempo de desaceleração	10
<b>P122</b>	Referência de velocidade para JOG ou JOG+	1715
<b>P134</b>	Referência de velocidade máxima	1715
<b>P151</b>	Nível de atuação da regulação da Tensão do link <b>CC Frenagem Ótimo Com Controle Vetorial</b>	375
<b>P158</b>	Corrente de Sobrecarga do Motor à 5% da Velocidade Nominal	0,2 * P295 = 0,2 * 45 = 9 A?
<b>P157</b>	Corrente de Sobrecarga do Motor à 50% da Velocidade Nominal	0,2 * P295 = 0,2 * 45 = 9 A?
<b>P156</b>	Corrente de Sobrecarga do Motor à Velocidade Nominal	0,2 * P295 = 0,2 * 45 = 9 A?
<b>P169</b>	Máxima Corrente de Torque Horário <b>Com Controle Vetorial (P202 = 3 ou 4)</b>	?
<b>P170</b>	Máxima Corrente de Torque Anti-Horário	?
<b>P171</b>	Máxima Corrente de Torque Horário na Velocidade Máxima (N = P134)	?
<b>P172</b>	Máxima Corrente de Torque Anti-Horário na Velocidade Máxima (N = P134)	?
<b>P202</b>	Tipo de Controle	3
<b>P209</b>	Detecção de Falta de Fase no Motor	1
<b>P211</b>	Bloqueio por N = 0 (Lógica de Parada)	1
<b>P222</b>	Seleção Referência de Velocidade Situação REMOTO	0
<b>P226</b>	Seleção do Sentido de GIRO Situação REMOTO	2
<b>P227</b>	Seleção Gira/Para Situação REMOTO	0
<b>P228</b>	Seleção Fonte de JOG Situação REMOTO	1
<b>P263</b>	Função da Entrada Digital DI1	0
<b>P268</b>	Função da Entrada Digital DI6	0
<b>P279</b>	Função Saída a Relé RL2	0
<b>P280</b>	Função Saída a Relé RL3	0
<b>P400</b>	Tensão Nominal do Motor	220
<b>P401</b>	Corrente Nominal do Motor	1.0 * P295 = 4.42
<b>P402</b>	Velocidade Nominal do Motor	1715
<b>P404</b>	Potência Nominal do Motor	4

Tabela: Aspecto da patina e do comutador e possíveis causas.

PATINAS DE APARÊNCIA NORMAL		
P2		<p>P2, P4 e P6 são exemplos de patinas com aparência normal, indicando bom funcionamento. A patina apresenta-se lisa, ligeiramente brilhante, coloração uniforme desde o bronzeamento, o marron claro (P2), até o marron escuro, podendo ainda conter tonalidade cinza (P6) azuladas, avermelhadas ou outras.</p> <p><b>IMPORTANTE É A REGULARIDADE, NÃO A TONALIDADE.</b></p>
P4		
P6		
PATINAS ANORMAIS		
P12		<p>Aspecto: Patina raiada com pistas mais ou menos largas. A cor é alternadamente clara ou escura. Não há desgaste no comutador.</p> <p>Causas: Alta umidade, vapores de óleo ou de gases agressivos ambientais, baixa densidade de correntes nas escovas.</p>
P14		<p>Aspecto: Patina rasgada, de modo geral como P12, com pistas mais estreitas e ataque ao comutador.</p> <p>Causas: Como P12, porém, a danificação perdura há tempo.</p>
P16		<p>Aspecto: Patina gordurosa com manchas aperiódicas, forma e cor desuniforme.</p> <p>Causas: Comutador deformado ou muito sujo.</p>

<b>PATINA COM MANCHAS DE ORIGEM MECÂNICA</b>		
P22		<p>Aspecto: Manchas isoladas ou com espaçamento regular, apresentando-se em uma ou várias zonas do comutador.</p> <p>Causas: Ovalização do comutador, vibração da máquina, oriundas do desbalanceamento do rotor ou de mancais defeituosos.</p>
P24		<p>Aspecto: Manchas escuras com bordas definidas, vide também T12 e T14.</p> <p>Causas: Lâmina ou grupo de lâminas defeituosos que provocam o erguimento das escovas e a conseqüente perda de contato.</p>
P26		<p>Aspecto: Lâminas manchadas nas beiradas ou no centro.</p>
P28		<p>Causas: Frequentes dificuldades de comutação ou também comutador mal retificado.</p>
<b>PATINA COM MANCHAS DE ORIGEM ELÉTRICA</b>		
P42		<p>Aspecto: Lâminas alternadamente claras e escuras.</p> <p>Causas: Desuniformidade na distribuição de corrente em dois bobinamentos paralelos de laço duplo ou, também, diferença de indutância em caso de duas bobinas por ranhura.</p>

P46		<p>Aspecto: Manchas foscas em intervalo duplo - polares.</p> <p>Causas: Geralmente soldagens defeituosas das conexões auxiliares ou nas asas das lâminas.</p>
<b>QUEIMADURAS</b>		
B2		
B6		<p>Aspecto: Queimaduras no centro ou nas bordas lâminas.</p> <p>Causas: Faíscamento proveniente de dificuldades de comutação.</p>
B8		
B10		<p>Aspecto: Patina perfurada, formação de pontos claros como densidade e distribuição variados.</p> <p>Causas: Perfuração da patina com consequência de excessiva resistência elétrica da mesma.</p>
<b>MANCHAS NO COMUTADOR</b>		
T10		<p>Aspecto: Manchas escuras reproduzindo à área de contato das escovas.</p> <p>Causas: Prolongadas paradas desenergizadas ou curtas paradas sobre carga.</p>

T1 2		<p>Aspecto: Queimaduras nas bordas de saída e na entrada da lâmina subsequente.</p> <p>Causas: Indica a existência de lâminas salientes (vide L2).</p>
T1 4		<p>Aspecto: Manchas escuras.</p> <p>Causas: Indica a existência de lâminas em nível mais baixo (L4), ou de zonas planas no comutador.</p>
T1 6		<p>Aspecto: Marcas escuras claramente delimitadas conjuntamente com queimaduras nas bordas das lâminas.</p> <p>Causas: Isolação entre lâminas, mica saliente (vide L6).</p>
T1 8		<p>Aspecto: Manchas escuras.</p> <p>Causas: arestas das lâminas mal ou não chanfradas (vide L8).</p>
<b>DESGASTE DO COMUTADOR</b>		
R2		<p>Desgaste Normal: Aspecto de um comutador mostrando o desgaste do metal, pista por pista, com montagem correta, conseqüente de um desgaste normal após um longo período de funcionamento.</p>
R4		<p>Desgaste Anormal: Aspecto de um comutador, mostrando desgaste anormal do metal conseqüente da montagem incorreta das escovas (nº de escovas positivas diferentes do número de escovas negativas sobre a pista), ou qualidade inadequada ou ainda poluições diversas.</p>

Anexo – Planilha de pontos obtidos experimentalmente, de tensão e corrente de entrada, tensão e corrente de saída na carga, e eficiência.

<b>TELA OSCIOSCÓPIO</b>	<b>PONTOS</b>	<b>VELOC.(RPM)</b>	<b>Tensão(V)</b>	<b>Corrente(A)</b>	<b>Potência(W)</b>	<b>Eficiência</b>
scope 7	InR - Inversor habilitado 3500RPM	3500	132,05	0	0	
scope 8	InS - Inversor habilitado 3500RPM	3500	131,82	0	0	
scope 9	InT - Inversor habilitado 3500RPM	3500	132,62	0	0	
scope 14	OutU 3500RPM	3500	0	0	0	
scope 15	OutV 3500RPM	3500	0	0	0	
scope 16	OutW 3500RPM	3500	0	0	0	
scope 17	InR 3510RPM	3510	132,13	0,429	56,68377	
scope 18	InS 3510RPM	3510	132,32	0,41	54,2512	
scope 19	InT 3510RPM	3510	131,79	0,365	48,10335	
scope 20	OutU 3510RPM	3510	6,37	1,5465	9,851205	17,38%
scope 21	OutV 3510RPM	3510	6,19	1,5629	9,674351	17,83%
scope 22	OutW 3510RPM	3510	6,15	1,6088	9,89412	20,57%
scope 23	InR	3520	132,03	0,568	74,99304	
scope 24	InS	3520	132,13	0,722	95,39786	
scope 25	InT	3520	132,22	0,653	86,33966	
scope 26	OutU	3520	9,45	3,137	29,64465	39,53%
scope 27	OutV	3520	9,57	3,169	30,32733	31,79%
scope 28	OutW	3520	9,51	3,133	29,79483	34,51%
scope 29	InR	3530	132,19	1,0131	133,921689	
scope 30	InS	3530	131,95	0,872	115,0604	
scope 31	InT	3530	131,95	0,894	117,9633	

<b>scope 32</b>	OutU	3530	13,34	4,821	64,31214	48,02%
<b>scope 33</b>	OutV	3530	13,09	4,836	63,30324	55,02%
<b>scope 34</b>	OutW	3530	13,21	4,83	63,8043	54,09%
<b>scope 35</b>	InR	3540	132,3	1,45	191,835	
<b>scope 36</b>	InS	3540	132,6	1,5	198,9	
<b>scope 37</b>	InT	3540	132,6	1,5	198,9	
<b>scope 38</b>	OutU	3540	17,6	6,55	115,28	60,09%
<b>scope 39</b>	OutV	3540	17,9	6,6	118,14	59,40%
<b>scope 40</b>	OutW	3540	17,55	6,58	115,479	58,06%
<b>scope 41</b>	InR	3550	132,2	2	264,4	
<b>scope 42</b>	InS	3550	132,5	2,05	271,625	
<b>scope 43</b>	InT	3550	132,5	2	265	
<b>scope 44</b>	OutU	3550	21,5	8,16	175,44	66,35%
<b>scope 45</b>	OutV	3550	22	8,22	180,84	66,58%
<b>scope 46</b>	OutW	3550	21,8	8,31	181,158	68,36%
<b>scope 47</b>	InR	3560	132,4	2,62	346,888	
<b>scope 48</b>	InS	3560	132,8	2,73	362,544	
<b>scope 49</b>	InT	3560	132,4	2,7	357,48	
<b>scope 50</b>	OutU	3560	25,7	9,16	235,412	67,86%
<b>scope 51</b>	OutV	3560	26	9,75	253,5	69,92%
<b>scope 52</b>	OutW	3560	25,3	9,87	249,711	69,85%
<b>scope 53</b>	InR	3570	132	3,27	431,64	
<b>scope 54</b>	InS	3570	132,2	3,38	446,836	
<b>scope 55</b>	InT	3570	131,8	3,39	446,802	
<b>scope 56</b>	OutU	3570	29,8	11,28	336,144	77,88%
<b>scope 57</b>	OutV	3570	29,92	11,41	341,3872	76,40%
<b>scope 58</b>	OutW	3570	29,7	11,5	341,55	76,44%

<b>scope 59</b>	InR	3580	131,2	4,1	537,92	
<b>scope 60</b>	InS	3580	131	4,22	552,82	
<b>scope 61</b>	InT	3580	130,9	4,25	556,325	
<b>scope 62</b>	OutU	3580	33,6	12,9	433,44	80,58%
<b>scope 63</b>	OutV	3580	34,2	13	444,6	80,42%
<b>scope 64</b>	OutW	3580	34	13,1	445,4	80,06%
<b>scope 65</b>	InR	3590	130,65	5,07	662,3955	
<b>scope 66</b>	InS	3590	130,5	5,21	679,905	
<b>scope 67</b>	InT	3590	130,2	5,15	670,53	
<b>scope 68</b>	OutU	3590	37,9	14,4	545,76	82,39%
<b>scope 69</b>	OutV	3590	38	14,5	551	81,04%
<b>scope 70</b>	OutW	3590	38,19	14,62	558,3378	83,27%
<b>scope 71</b>	InR	3600	130	6,1	793	
<b>scope 72</b>	InS	3600	129,8	6,18	802,164	
<b>scope 73</b>	InT	3600	129,65	6,22	806,423	
<b>scope 74</b>	OutU	3600	41	14,95	612,95	77,30%
<b>scope 75</b>	OutV	3600	42,1	15,09	635,289	79,20%
<b>scope 76</b>	OutW	3600	41,59	15,18	631,3362	78,29%
<b>scope 80</b>	InR	3610	128,9	7,1	915,19	
<b>scope 81</b>	InS	3610	128,35	7,15	917,7025	
<b>scope 82</b>	InT	3610	128,4	7,31	938,604	
<b>scope 83</b>	OutU	3610	45	16,33	734,85	
<b>scope 84</b>	OutV	3610	45,6	16,47	751,032	
<b>scope 85</b>	OutW	3610	45,3	16,56	750,168	
<b>scope 86</b>	InR	3620	127,9	8,33	1065,407	80,29%
<b>scope 87</b>	InS	3620	127,8	8,4	1073,52	81,84%
<b>scope 88</b>	InT	3620	127,6	8,38	1069,288	79,92%

<b>scope 89</b>	OutU	3620	49	17,72	868,28	
<b>scope 90</b>	OutV	3620	49,7	17,88	888,636	
<b>scope 91</b>	OutW	3620	49,8	18	896,4	
<b>scope 92</b>	InR	3630	127,1	9,62	1222,702	81,50%
<b>scope 93</b>	InS	3630	126,9	9,66	1225,854	82,78%
<b>scope 94</b>	InT	3630	126,9	9,65	1224,585	83,83%
<b>scope 95</b>	OutU	3630	52,6	19,05	1002,03	
<b>scope 96</b>	OutV	3630	53,2	19,22	1022,504	
<b>scope 97</b>	OutW	3630	53	19,38	1027,14	
<b>scope 98</b>	InR	3640	126,5	10,98	1388,97	81,95%
<b>scope 99</b>	InS	3640	126,3	11,02	1391,826	83,41%
<b>scope 100</b>	InT	3640	126,63	11,03	1396,7289	83,88%
<b>scope 101</b>	OutU	3640	56,9	20,39	1160,191	
<b>scope 102</b>	OutV	3640	57	20,56	1171,92	
<b>scope 103</b>	OutW	3640	56,7	20,77	1177,659	
<b>scope 104</b>	InR	3650	125,8	12,45	1566,21	83,53%
<b>scope 105</b>	InS	3650	125,7	12,5	1571,25	84,20%
<b>scope 106</b>	InT	3650	125,2	12,44	1557,488	84,32%
<b>scope 107</b>	OutU	3650	60	21,65	1299	
<b>scope 108</b>	OutV	3650	60,65	21,86	1325,809	
<b>scope 109</b>	OutW	3650	60,27	22	1325,94	
<b>scope 113</b>	OutU	3660	63,6	23,02	1464,072	82,94%
<b>scope 114</b>	OutV	3660	64,3	23,22	1493,046	84,38%
<b>scope 115</b>	OutW	3660	64	23,41	1498,24	85,13%
<b>scope 116</b>	InR	3670	125,2	15,66	1960,632	
<b>scope 117</b>	InS	3670	124,3	15,77	1960,211	
<b>scope 118</b>	InT	3670	124,4	15,66	1948,104	

<b>scope 119</b>	OutU	3670	67,3	24,35	1638,755	83,02%
<b>scope 120</b>	OutV	3670	68	24,55	1669,4	84,40%
<b>scope 121</b>	OutW	3670	67,8	24,77	1679,406	85,29%
<b>scope 122</b>	InR	3680	124,3	17,45	2169,035	
<b>scope 123</b>	InS	3680	124,1	17,51	2172,991	
<b>scope 124</b>	InT	3680	124,11	17,4	2159,514	
<b>scope 125</b>	OutU	3680	71	25,58	1816,18	83,58%
<b>scope 126</b>	OutV	3680	71,8	25,79	1851,722	85,16%
<b>scope 127</b>	OutW	3680	71,46	26,02	1859,3892	86,21%
<b>scope 128</b>	InR	3690	124	19,15	2374,6	
<b>scope 129</b>	InS	3690	123,9	19,25	2385,075	
<b>scope 130</b>	InT	3690	123,5	19,15	2365,025	
<b>scope 131</b>	OutU	3690	74,1	26,8	1985,88	83,73%
<b>scope 132</b>	OutV	3690	75	27,05	2028,75	85,22%
<b>scope 133</b>	OutW	3690	74,9	27,25	2041,025	86,10%
<b>scope 134</b>	InR	3700	123,3	21,06	2596,698	
<b>scope 135</b>	InS	3700	123,6	21,18	2617,848	
<b>scope 136</b>	InT	3700	123,22	21,03	2591,3166	
<b>scope 137</b>	OutU	3700	77,9	28,08	2187,432	83,63%
<b>scope 138</b>	OutV	3700	78,95	28,31	2235,0745	85,06%
<b>scope 139</b>	OutW	3700	78,35	28,58	2239,243	86,30%

## Anexo – Programação SCILAB

### Determinação do Gráfico Tensão de Saída x Velocidade (RPM) – Linhas de Código

```
// Lookup table data and plot

voltage_X = [0 6.37 9.45 13.34 17.60 21.50 25.70 29.80 33.60 37.90 41.00 45.00 49.00
52.60 56.90 60.00 63.60 67.30 71.00 74.10 77.90];

velocity_Z = [3500 3510 3520 3530 3540 3550 3560 3570 3580 3590 3600 3610 3620
3630 3640 3650 3660 3670 3680 3690 3700];

figure()

plot(voltage_X, velocity_Z,'LineWidth',3)

xgrid()

xlabel('$\text{Tensão} \quad [\text{V}]$', 'fontsize',3)

ylabel('$\text{Velocidade} \quad [\text{RPM}]$', 'fontsize',3)
```

### Determinação do Gráfico Corrente de Saída x Velocidade (RPM) – Linhas de código

```
// Lookup table data and plot

current_X = [0 1.54 3.13 4.82 6.55 8.16 9.16 11.28 12.90 14.40 14.95 16.33 17.72
19.05 20.39 21.65 23.02 24.35 25.58 26.80 28.08];

velocity_Z = [3500 3510 3520 3530 3540 3550 3560 3570 3580 3590 3600 3610 3620
3630 3640 3650 3660 3670 3680 3690 3700];

figure()

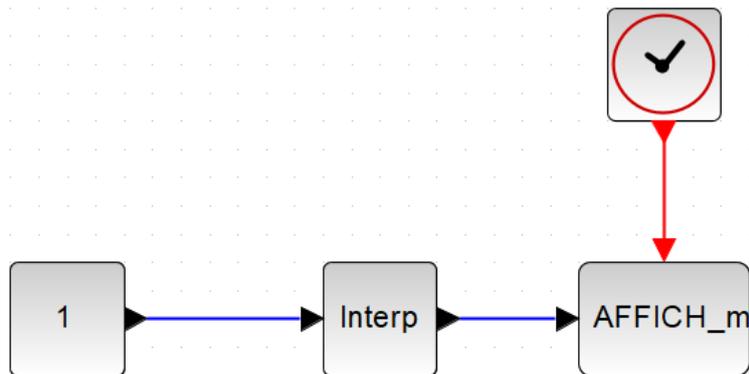
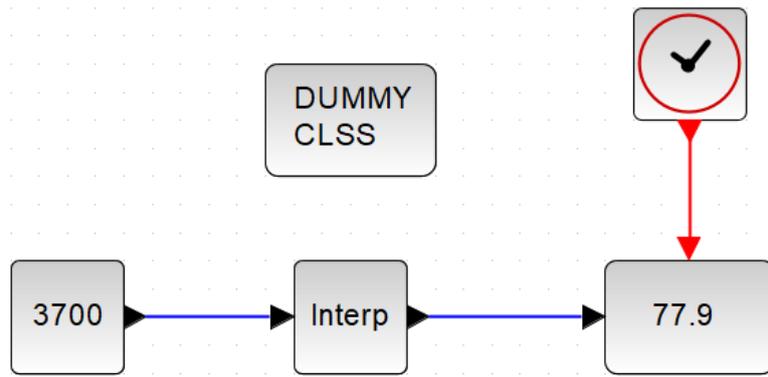
plot(current_X, velocity_Z,'LineWidth',3)

xgrid()

xlabel('$\text{Corrente} \quad [\text{A}]$', 'fontsize',3)

ylabel('$\text{Velocidade} \quad [\text{RPM}]$', 'fontsize',3)
```

## Diagrama de Blocos SCILAB



Onde:

Bloco Const\_m (setado para 1) – Valor constante de entrada, neste caso, insere-se o valor de velocidade (em RPM) desejada, para se obter a saída desejada;

Bloco Interp (Interpolação\_1D) – Bloco que realiza a interpolação dos dados obtidos experimentalmente;

Bloco AFFICH\_m – Bloco que retorna o valor obtido na saída da interpolação, durante a simulação;

Bloco CLOCK\_C – Bloco responsável por delimitar os períodos de leitura e tempo de inicialização;

Bloco DUMMY CLSS – Bloco que deve ser colocado em qualquer diagrama de blocos que contenha um bloco de cruzamento zero, mas nenhum sistema com estado contínuo.

A exemplo, têm-se que para 3700RPM, o valor lido de tensão na saída é de 77.90V.