



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA - ITEC
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E BIOMÉDICA

YGOR PEREIRA VAZ

Recomposição e Desenvolvimento de Manuais e Procedimentos Operacionais de Bancada Dinâmica para Simulação de Geração.

BELÉM-PA
2026

YGOR PEREIRA VAZ

Recomposição e Desenvolvimento de Manuais e Procedimentos Operacionais de Bancada Dinâmica para Simulação de Geração.

Monografia submetida à Banca Examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Petrônio Vieira Júnior

BELÉM-PA
2026

**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)**

V393r Vaz, Ygor Pereira.
Recomposição e desenvolvimento de manuais e
procedimentos operacionais de bancada dinâmica para
simulação de geração / Ygor Pereira Vaz. — 2026.
158 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia
Elétrica, Belém, 2026.

1. Bancada de ensino e pesquisa. 2. Motor CC. 3.
Gerador CA. 4. Inversor. 5. Conversor CA/CC. I. Título.

CDD 621.3191

YGOR PEREIRA VAZ

Recomposição e Desenvolvimento de Manuais e Procedimentos Operacionais de Bancada Dinâmica para Simulação de Geração.

Monografia submetida à Banca Examinadora do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: 25 / FEVEREIRO / 2026

Conceito: EXCELENTE

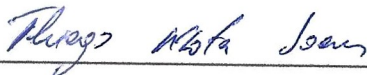
Banca Examinadora



Prof. Dr. Petrônio Vieira Júnior
Orientador – FEEB / ITEC / UFPA



Prof. Dr. Walter Barra Junior
FEEB / ITEC / UFPA



Prof. Dr. Thiago Mota Soares
FEEB / ITEC / UFPA

BELÉM-PA
2026

RESUMO

Uma das necessidades dos cursos de engenharia refere-se aos laboratórios, já que estes representam a parte prática do curso que permite oferecer segurança aos discentes na sua formação como engenheiros. Este trabalho descreve a recomposição de uma bancada desenvolvida como projeto de pesquisa permitindo sua utilização também como uma bancada de ensino. Utilizada como uma base de ensino se faz necessário a produção de manuais de operação detalhados e inequívocos pois não se trata de um material a ser pesquisado. O objetivo deste trabalho é a descrição da recomposição de uma bancada para utilização em práticas de ensino de acionamentos, geração de energia e controle. Inicialmente é apresentada a concepção original da bancada. Após sua apresentação são descritos seus principais equipamentos e por fim a proposta de recomposição com as alterações dos circuitos de força e comando. É oferecido como principais produtos deste trabalho os Procedimentos Operacionais apoiados por uma Referência Descritiva da Bancada, que devido as suas extensões são apresentados como apêndices. Estes produtos são essenciais para quem for operar a bancada. Para a avaliação dos Apêndices não é necessária sua leitura pois seus conteúdos são apresentados ao longo do trabalho.

Palavras-chave: Bancada de Ensino e Pesquisa. Motor CC, Gerador CA, Inversor, Conversor CA/CC, Comandos Eletrônicos, Regulação de Velocidade.

ABSTRACT

One of the fundamental requirements in engineering programs concerns laboratory infrastructure, as laboratories represent the practical component of the curriculum, providing students with the necessary confidence in their professional training as engineers.

This work describes the refurbishment of a test bench originally developed as a research project, enabling its use as a teaching platform. Since it is intended for instructional purposes, the development of detailed and unambiguous operating manuals is required, as it is not merely a research-oriented setup.

The objective of this work is to describe the refurbishment of a test bench for educational applications in electric drives, power generation, and control systems. Initially, the original design of the test bench is presented. Subsequently, its main equipment is described, followed by the proposed refurbishment, including modifications to the power and control circuits.

The main outcomes of this work include the Operational Procedures supported by a Descriptive Reference of the Test Bench. Due to their length, these documents are presented as appendices. These materials are essential for proper operation of the test bench. Reading the appendices is not mandatory for understanding this work, as their contents are discussed throughout the text.

Keywords: Teaching and Research Test Bench; DC Motor; AC Generator; Inverter; AC/DC Converter; Electronic Control; Speed Regulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama conceitual original ilustrando os principais sistemas que compõem a Bancada Dinâmica.....	20
Figura 2 – Parte da instalação original da Bancada Dinâmica com destaque para o circuito de comando, inversor e conversor.....	21
Figura 3 – (a) Máquinas elétricas da Bancada: Motor CC e o Gerador; (b) Banco de resistências utilizadas para simular carga no gerador.....	22
Figura 4 —Bancada Dinâmica parcialmente montada em nova configuração.....	26
Figura 5 — Conversor CA/CC da Bancada Dinâmica.....	28
Figura 6 — Etiqueta de identificação do Conversor CA/CC da Bancada Dnâmica.....	29
Figura 7 — Interface Homem-Máquina do Conversor CA/CC.....	30
Figura 8 — Motor CC da Bancada Dinâmica.....	31
Figura 9 — Placa de identificação do Motor CC.....	32
Figura 10 — (a) Motor CC com a tampa de inspeção dos bornes conexões de força aberta; (b) Bornes de conexão do Motor CC.....	32
Figura 11 – Esquema de ligação dos termostatos do Motor CC.....	33
Figura 12 — Sistema de ventilação forçada do Motor CC.....	34
Figura 13 — placa de identificação do motor do sistema de ventilação forçada do Motor CC.....	34
Figura 14 — Gerador da Bancada Dinâmica.....	35
Figura 15 — Placa de identificação do Gerador.....	35
Figura 16 — Inversor da Bancada Dinâmica.....	37
Figura 17 — Etiqueta de identificação do Inversor da Bancada Dinâmica.....	37
Figura 18 — Interface humano-máquina do Inversor.....	39
Figura 19 — Exemplar de um dos resistores de potência que compõem a Carga Resistiva Trifásica da Bancada Dinâmica.....	40
Figura 20 – (a) Diagrama de força do Conversor CA/CC; (b) Circuito de força do Inversor.....	42
Figura 21 — Diagrama de comando.....	43
Figura 22 – Descrição dos componentes que compõe o acionamento do Conversor e do Inversor no configuração original dela em 2007.....	44
Figura 23 – Chaves de habilitação na configuração original da Bancada Dinâmica em 2007.....	44
Figura 24 – Foto das Portas XC1 do Conversor CA/CC na configuração mais recente da Bancada Dinâmica.....	45
Figura 25 — Chaves de habilitação.....	45
Figura 26 – (a) Chaves de habilitação na nova instalação; (b) Botoeiras de comando na nova instalação parcial.....	47
Figura 27 – (a) Visão frontal da chave seccionadora geral da Bancada Dinâmica, localizada no LabEP; (b) Vista interna da Chave Seccionadora geral da Bancada Dinâmica.....	48

Figura 28 – (a) Placa de circuito principal do Conversor CA/CC; (b) Placa de circuito de controle auxiliar -do Inversor.	49
Figura 29 – Conjunto que forma uma das fases da carga Resistiva trifásica	51
Figura 30 — (1) Diagrama de ligação dos resistores de potência que formam cada uma das fases da carga; (2) Diagrama simplificado da Carga Resistiva Trifásica	51
Figura 31 – Motor CC com suas tampas de inspeção e sistema de ventilação forçada removidos. ..	52
Figura 32 – (a) Indicação em vermelho do limite máximo de desgaste da escova de grafite; (b) Face de contato da escova de grafite com o comutador.	53
Figura 33 – (a) Duas escovas de grafite em seus pontos de encaixe no porta-escovas; (b) Filme de grafite sobre o comutador.	54
Figura 34 – Parâmetro de aceitabilidade para formação do filme de grafite.	55
Figura 35 – (a) Gerador parcialmente desmontado com seu eixo principal; (b) Rolamento do Gerador encaixado no eixo.	56
Figura 36 – Formas de onda de tensão e corrente na saída do Gerador, sem energização do Inversor.	58
Figura 37 – Fusíveis de proteção geral do circuito de força da Bancada Dinâmica.....	59
Figura 38 – Circuito de atualizado após a alteração do ponto de ligação de F100A.....	60
Figura 39 – Tensão (a) e Corrente (b) na saída do inversor de frequência.....	61
Figura 40 – Modulação PWM.....	61
Figura 41 – (a) Placa de identificação do Indutor de potência; (b) Conjunto que forma uma das fases da carga LR trifásica.	62
Figura 42 – (a) Diagrama de ligação dos resistores de potência e do indutor de potência que formam cada uma das fases da carga RL trifásica; (b) Diagrama simplificado da Carga RL Trifásica.....	63
Figura 43 – Medição de tensão e corrente na carga trifásica RL.	64
Figura 44 – (a) Foto do relé térmico SR-225 instalado jusante na contatora K3; (b) Relé no Circuito de Força, identificado como FV.....	66
Figura 45 – Circuito de comando atualizado com o relé FV	67
Figura 46 – (a) Botoeira dupla SBG; sendo a primeira das cinco botoeiras; (b) Contatora KBG instalado junto com as demais; (c) Diagrama elétrico atualizado do circuito de comando do Bloqueio Geral ...	69
Figura 47 – Circuito auxiliar de proteção térmica do Motor CC e RF integrados à lógica de comando de Bloqueio Geral.....	70
Figura 48 – (a) Foto dos fusíveis FC-F; (b) Fusíveis FC-F adicionados ao diagrama elétrico do circuito de comando.....	72
Figura 49 – (a) Foto do fusível Diazed ao lado da tampa de porta-fusível; (b) Foto do local de instalação dos porta-fusíveis Diazed na Bancada.	73
Figura 50 – Fusíveis Diazed Diagrama elétrico do circuito de comando	74
Figura 51 – Velocidade medida Vs Velocidade esperada.	79
Figura 52 – Gráfico Tensão x Frequência padrão do Inversor	80
Figura 53 - Curva V/F Ajustável e seus parâmetros.	81
Figura 54 – Curva V/F "Customizada".	83

Figura 55 – Impedância da carga RL na faixa de operação de interesse da curva V/F personalizada.	84
Figura 56 – Gráfico tensão de saída x frequência, na fase R	85
Figura 57 – Gráfico corrente de saída x frequência, na fase R	85
Figura 58 – Indicação do tempo de rampa total e efetivo.	87
Figura 59 – Visão geral da Bancada Dinâmica	95
Figura 60 – Visão lateral do Motor CC.	98
Figura 61 – placa de identificação do Motor.	99
Figura 62 – conexões de força do Motor.	99
Figura 63 – placa de identificação do Ventilador do Motor CC	100
Figura 64 – Foto com indicação do sentido de giro correto do ventilador.	100
Figura 65 – Esquema de ligação dos termostatos do Motor CC	101
Figura 66 — Gerador da Bancada Dinâmica	101
Figura 67 — Placa de identificação do Gerador	102
Figura 68 – Circuito de força da Bancada Dinâmica	104
Figura 69 – Circuito de comando da Bancada Dinâmica	105
Figura 70 — Conversor CA/CC da Bancada Dinâmica	106
Figura 71 — Etiqueta de identificação do Conversor CA/CC da Bancada Dinâmica	106
Figura 72 – Localização do display, leds e teclas da HMI	108
Figura 73 – Funções básicas das teclas presentes na HMI	108
Figura 74 – Tampa do conversor.	109
Figura 75 – Fotos e indicações do processo de abertura da tampa.	110
Figura 76 – Foto do Cartão CCW4.	111
Figura 77 – Portas XC1 do Conversor CA/CC.	112
Figura 78 – Portas X1 do Conversor CA/CC.	112
Figura 79 – Inversor.	113
Figura 80 – Etiqueta de identificação do Inversor da Bancada Dinâmica	114
Figura 81 – Representação do painel HMI do Inversor.	115
Figura 82 – Indicação do processo de abertura da Tampa do Inversor.	118
Figura 83 – Foto do Inversor com a tampa aberta, mostrando seu interior.	118
Figura 84 – foto das conexões de controle do Inversor.	119
Figura 85 – foto das conexões de potência do Inversor.	119
Figura 86 – fotos da Chave Geral da Bancada Dinâmica nas posições aberta e fechada	120
Figura 87 – Foto das Botoeiras de Comando SBG e S1-S4.	121
Figura 88 – foto indicando os conjuntos de fusíveis utilizados na Bancada, junto de seus respectivos nomes de referência.	122
Figura 89 – foto indicando os conjuntos de contadoras utilizados na Bancada, junto de seus respectivos nomes de referência.	123
Figura 90 – foto do relé térmico de proteção da ventilação do Motor CC, montado a jusante da contadora.	125

Figura 91 – Foto das Chaves de Habilitação SE2-SE4, todas desabilitadas.	126
Figura 92 – Ilustração de uma Chave de Habilitação habilitada, indicada por ON, e desabilitada, indicada por OFF.	126
Figura 93 – Carga RL Trifásica.	127
Figura 94 – (a) Diagrama de ligação dos resistores de potência que formam cada uma das fases da carga; (b) Diagrama simplificado da Carga Resistiva Trifásica.	127
Figura 95 – Foto com indicação do sentido de giro correto do ventilador do Motor.	133
Figura 96 – Referência para o ajuste do ganho proporcional e integral de corrente.	135
Figura 97 – Referência para o ajuste de P043.	135
Figura 98 – Referência para ajuste de P039 e P040	136
Figura 99 – Possíveis comportamentos do sinal I_c , no cartão CCW4.	136
Figura 100 – Esquema simplificado do Cartão CCW4, somente com possíveis pontos de interesse.	142
Figura 101 – Curva V/F "Customizada"	147
Figura 102 – Indicação do tempo de rampa total e efetivo.	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Descrição das características do Conversor CA/CC conforme o código de Identificação	29
Tabela 2 — Descrição das características do Gerador conforme sua nomenclatura	36
Tabela 3 — Descrição das características do Inversor conforme o código de Identificação	38
Tabela 4 – Funções das portas XC1 presentes no diagrama elétrico original da Bancada Dinâmica.	46
Tabela 5 – Ganho a atenuação para diferentes frequências em um filtro passa-baixa com frequência de corte de 175Hz.	63
Tabela 6 – Parâmetros básicos da configuração definida do CTW-04	77
Tabela 7 – Parâmetros utilizados para personalização da Curva V/F Personalizada	82
Tabela 8 — Descrição das características do Gerador conforme sua nomenclatura.	103
Tabela 9 — Descrição das características do Conversor CA/CC conforme o código de Identificação	107
Tabela 10 — Descrição das características do Inversor conforme o código de Identificação	114
Tabela 11 – Funções dos botões da HMI do Inversor.....	116
Tabela 12 – nomes de referência e especificação dos conjuntos de fusíveis associados à Bancada Dinâmica.....	122
Tabela 13 – Nome, descrição de uso e indicações de formas de acionamento das contadoras da Bancada Dinâmica.	124
Tabela 14 – Tabela de configuração de parâmetros do Conversor CTW-04.....	138
Tabela 15 – Ajustes preparativos para restauração dos ajustes da WEG de fábrica p/60Hz	150
Tabela 16 – Ajustes necessários após a solicitação da restauração dos ajustes de fábrica para 60Hz	150
Tabela 17 – Ajustes dos parâmetros para configuração do Inversor para alimentação da Carga RL Trifásica da Bancada Dinâmica.....	153

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Descrição do Problema.....	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral.....	16
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Metodologia	18
1.5	Estrutura do Trabalho	18
2	APRESENTAÇÃO DA BANCADA DINÂMICA.....	20
2.1	Introdução.....	20
2.2	Visão geral	20
2.2.1	Descrição funcional.....	20
2.2.2	Instrumentação para monitoramento e aquisição de dados	23
2.3	Aplicações experimentais	24
2.3.1	Simulação de geração	24
2.3.2	Simulação de carga	25
2.3.3	Sistema de monitoração	25
2.4	Estado inicial da Bancada Dinâmica.....	26
2.5	Considerações finais.....	27
3	CARACTERIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA.....	28
3.1	Introdução.....	28
3.2	Conversor CA/CC	28
3.3	Motor CC	30
3.3.1	Circuito de proteção térmica	33
3.3.2	Sistema de ventilação forçada.....	33
3.4	Gerador.....	35

3.5	Inversor	37
3.6	Carga resistiva trifásica.....	39
3.7	Considerações finais.....	41
4	RECOMPOSIÇÃO DA BANCADA DINÂMICA	42
4.1	Introdução.....	42
4.2	Revisão do material circuito de força e comando originais	42
4.2.1	Circuitos de Força e Comando	42
4.2.2	Circuito de habilitação.....	44
4.2.3	Comparação com a configuração atual	46
4.3	Inspeção geral de cabos e elementos do circuito de acionamento	47
4.4	Inspeção do Conversor CA/CC e do Inversor	48
4.5	Carga resistiva trifásica.....	50
4.5.1	Inspeção e manutenção dos resistores de potência	50
4.5.2	Montagem da carga	51
4.6	Inspeção das máquinas girantes	52
4.6.1	Motor CC	52
4.6.2	Ventilação do Motor CC	55
4.6.3	Gerador.....	56
4.7	Montagem final e teste de acionamento	57
4.8	Considerações finais.....	58
5	ALTERAÇÕES NO CIRCUITO DE FORÇA E COMANDO	59
5.1	Introdução.....	59
5.2	Alteração do posicionamento do fusível F100A.....	59
5.3	Ajuste de carga elétrica na emulação de Carga	60
5.3.1	Adaptação da carga resistiva trifásica em carga LR trifásica.....	62
5.3.2	Confirmação da eficácia da correção.....	64
5.4	Proteção de sobrecarga na ventilação do Motor CC	65

5.4.1	Corrente máxima de sobrecarga.....	65
5.4.2	Instalação de relé de sobrecarga.....	65
5.5	Alteração do circuito de comando do Bloqueio Geral do Conversor CA/CC	67
5.5.1	Substituição da chave com retenção mecânica por retenção lógica via selo	68
5.5.2	Integração de intertravamentos de proteção	70
5.6	Adição de fusíveis de proteção do Circuito de comando	71
5.6.1	Introdução de fusíveis de proteção do relé de falha do Conversor CA/CC	72
5.6.2	Introdução de fusíveis de proteção geral do circuito de comando	73
5.7	Considerações finais.....	74
6	ATUALIZAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO E MANUAIS	75
6.1	Introdução.....	75
6.2	Parametrização do Conversor CA/CC	75
6.2.1	Configuração escolhida	75
6.2.2	Listagem dos parâmetros	76
6.2.3	Otimização dos reguladores	77
6.2.4	Confirmação do controle de velocidade.....	78
6.3	Parametrização do Inversor	80
6.3.1	Ajuste da curva V/F.....	80
6.3.2	Ajuste da rampa de aceleração	85
6.4	Produção material de apoio e POPs de uso	88
6.4.1	Referência Descritiva	88
6.4.2	Procedimento Operacional da Parametrização do Conversor CA/CC ..	88
6.4.3	Procedimento Operacional do Controle de Velocidade do Motor CC ..	89
6.4.4	Procedimento Operacional da Parametrização do Inversor.....	89
6.4.5	Procedimento Operacional para Controle da Carga do Gerador	89

6.5	Considerações finais.....	89
7	CONCLUSÃO	90
7.1	Trabalhos Futuros.....	91
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A.....	94
A.1	OBJETIVO.....	95
A.2	VISÃO GERAL DA BANCADA DINÂMICA	95
A.3	MÁQUINAS ROTATIVAS.....	98
A.4	DIAGRAMAS ELÉTRICOS.....	104
A.5	EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA	106
A.6	ELEMENTOS DE COMANDO E PROTEÇÃO	119
A.7	FATORES DE LIMITAÇÃO DA CORRENTE MÁXIMA NA CARGA.....	128
	APÊNDICE B.....	129
B.1	OBJETIVO.....	130
B.2	REQUISITOS	131
B.3	PROCEDIMENTOS.....	131
B.4	MATERIAL COMPLEMENTAR.....	138
	APÊNDICE C	143
C.1	OBJETIVO	144
C.2	REQUISITOS	144
C.3	PROCEDIMENTOS.....	144
	APÊNDICE D	146
D.1	OBJETIVO	147
D.2	REQUISITOS	148
D.3	PROCEDIMENTOS.....	149
D.4	MATERIAL COMPLEMENTAR.....	153
	APÊNDICE E.....	155

E.1 OBJETIVO.....	156
E.2 REQUISITOS	156
E.3 PROCEDIMENTOS.....	156

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Problema

A produção de energia elétrica global depende principalmente de turbinas elétricas: máquinas rotativas que convertem a energia mecânica captada de fluidos em movimento em energia elétrica (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024). Usadas em usinas elétricas a vapor, hidrelétricas, eólicas, entre outras, essas máquinas requerem manutenção preventiva e inspeções regulares para assegurar seu pleno funcionamento (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

A inspeção física dessas máquinas costuma ser um desafio por muitas vezes estarem em locais de difícil acesso, como no topo de grandes torres para captação da energia dos ventos no caso de aerogeradores, ou submersos para captação do movimento da água no caso de geradores hídricos.

Buscando encontrar novas formas de monitorar o estado físico de turbinas hidrelétricas de forma remota e durante serviço, foi criado um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) das Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - ELETRONORTE em conjunto com o Grupo de Tecnologia e Automação (GTA) da UFPA. O projeto visava criar uma ferramenta capaz de realizar simulações de carga e controle de geração de energia elétrica, assim como o monitoramento das grandezas elétricas e mecânicas envolvidas, como corrente, tensão, vibração e rotação, permitindo a comprovação experimental dos estudos.

Um produto deste projeto de P&D foi o desenvolvimento e implementação da Bancada Dinâmica de Simulação e Geração, doravante chamada simplesmente de Bancada Dinâmica (BD), implementada pelo GTA no ano de 2007, com esse projeto servindo como base para monografia de Conclusão de Curso do discente Vitor Hugo Souza intitulado “Projeto e Implementação de uma Bancada de Máquinas Elétricas Rotativas para Monitoração da Geração e Diagnóstico” (SOUZA, 2007).

A Bancada Dinâmica permite realizar simulações de carga por meio do acionamento eletrônico de um motor de corrente contínua que tem seu eixo conectado ao eixo de um gerador trifásico: o acionamento do motor faz com que ele atue como uma máquina primária ao fornecer o torque necessário para o acionamento do gerador. Para controle da corrente de carga têm-se um inversor de frequência alimentando um banco de resistores. Através do ajuste da tensão de saída do Inversor,

pode-se controlar a energia dissipada nos resistores, sendo essa quantidade de energia proporcional à potência fornecida pelo Gerador. Por fim, a Bancada também permite a implementação de sistema supervisório através de diversos dispositivos conectados ao gerador como medidores de corrente, tensão de saída, de rotação de eixo e de vibração de sua carcaça.

Ao longo dos anos a Bancada Dinâmica passou por alterações e remontagens, sem registros, alterando o projeto original concebido em 2007. Além disso, a Bancada Dinâmica passou por longos períodos de desuso, com equipamentos como o Motor, Gerador, Conversor CA-CC e Inversor de Frequência sem registros de limpeza ou manutenção.

Embora haja o interesse em colocar a Bancada Dinâmica em pleno funcionamento novamente, há obstáculos a serem superados:

- a) Não há manuais de inspeção ou de ensaios para avaliação de desempenho e funcionamento dos equipamentos que compõem a Bancada;
- b) As mudanças não registradas feitas na Bancada impedem o uso do projeto original dela como guia exclusivo para inspeção e remontagem dela;
- c) O projeto original carece de informações detalhadas quanto à parametrização do conversor CA/CC e do inversor de frequência da Bancada.

Os fatores mostrados acima, entre outras dificuldades, destacam a necessidade de um trabalho de recomposição abrangente e criterioso, feito em conjunto com produção de documentação técnica de apoio à Bancada.

Assim, este trabalho tem a necessidade realizar uma revisão do sistema de força e comando de energia da Bancada Dinâmica, de seus projetos e estudo da teoria de funcionamento dos equipamentos que a compõem, para, a partir deles, fazer a análise técnica, inspeção e verificação da conformidade operacional do sistema, junto de aprimoramentos no projeto associados da produção de manuais técnicos de inspeção, ensaios e procedimentos de operação padrão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Descrever a recomposição de uma bancada de pesquisa para utilização também em práticas de ensino de acionamentos, geração de energia e controle

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar e detalhar os componentes da Bancada Dinâmica relacionados à simulação de carga e geração;
- b) Revisar a instalação elétrica da Bancada com base no projeto original e dos manuais dos equipamentos associados, propondo e aplicando correções caso os critérios de segurança e as metas de simulações não sejam atendidos;
- c) Elaborar documentação técnica de apoio para Bancada, incluindo manuais de montagem, inspeção e procedimentos de operação padrão (POP) para operação da Bancada em simulação de carga.

1.3 Justificativa

A Bancada Dinâmica, resultado da aplicação prática de diversas áreas de conhecimento de Engenharia Elétrica, é um valioso recurso de ensino e estudo, principalmente nas áreas de acionamento eletrônico, instalações elétricas, instrumentação eletrônica e sistemas de potência, com principal foco em suas capacidades de simulação de geração e carga. Ela oferece aos alunos de graduação e pós-graduação do curso de Engenharia Elétrica uma oportunidade única de experimentação e aprendizado em um contexto que simula condições industriais reais.

Para que esse recurso seja bem explorado não é suficiente que a Bancada esteja somente funcional, é necessário que ela tenha uma documentação atualizada e completa. Tal documentação deve conter listagem dos materiais e equipamentos utilizados, manuais contendo seus circuitos de força e comando, POPs de inspeção e operação, além das justificativas técnicas para as decisões envolvidas no projeto. A ausência de uma documentação atualizada da Bancada Dinâmica apresenta um obstáculo para futuros usuários, que ficam dependentes do auxílio de uma pessoa familiarizada com ela, ou os obrigando a operá-la ou realizar modificações sem uma referência sólida e confiável. Sem um histórico que justifique as decisões tomadas no projeto e registre eventuais problemas e melhorias, tentativas de aprimoramento do projeto poderão acarretar um grande gasto de tempo e esforço para redescobrir e documentar novamente todo o funcionamento do projeto. Suposições erradas e a falta do conhecimento geral de todas as partes que a compõem podem resultar no surgimento de problemas já previamente solucionados em possíveis novas alterações.

Dessa forma, esse trabalho visa ser um primeiro passo na atualização e modernização da Bancada, tornando os sistemas de Simulação de Geração e Carga plenamente operacionais e documentando as condições e modificações atuais da Bancada em comparação ao projeto original, com esta monografia fornecendo uma base confiável para futuros aprimoramentos e novos projetos.

1.4 Metodologia

Inicialmente foi feita a identificação dos elementos da bancada em conjunto com uma busca pelos documentos referente ao projeto P&D como relatórios, manuais dos equipamentos e trabalhos acadêmicos associados. Em seguida foi analisado o material e estudados os manuais. Paralelamente, a bancada foi desmontada para verificar os estados de conservação de suas partes como rolamentos, acoplamentos, conexões etc.

1.5 Estrutura do Trabalho

Capítulo 1: Introdução ao tema abordado, contextualizando-o, e apresentando a justificativa e a metodologia utilizada na organização deste trabalho.

Capítulo 2: Apresenta de forma breve a Bancada Dinâmica, explicando suas funcionalidades, aplicações experimentais e descrevendo seu estado geral no início deste trabalho.

Capítulo 3: Descreve os componentes que compõem a Bancada Dinâmica, abordando suas características físicas, especificações técnicas e fazendo uma revisão pontual da teoria de seus princípios de funcionamento.

Capítulo 4: Apresenta o projeto original da Bancada Dinâmica, o qual é utilizado como base para a religação dos circuitos de força e comando dela na sua versão atual, assim como apresenta o processo de inspeção dos equipamentos e elementos associados.

Capítulo 5: Detalha alterações realizadas no projeto da Bancada Dinâmica para aprimoramento de funcionamento.

Capítulo 6: Descreve a nova parametrização do Conversor CA/CC e do Inversor de frequência CA/CA, adequando-os às alterações realizadas no projeto, elaborando os objetivos gerais a serem alcançados nas simulações de carga e controle de

geração, e termina com a produção da documentação técnica atualizada para a Bancada Dinâmica.

Capítulo 7: Contém as conclusões finais.

Ao final deste trabalho está incluída, no apêndice, a documentação de apoio atualizada produzida para a Bancada Dinâmica.

2 APRESENTAÇÃO DA BANCADA DINÂMICA

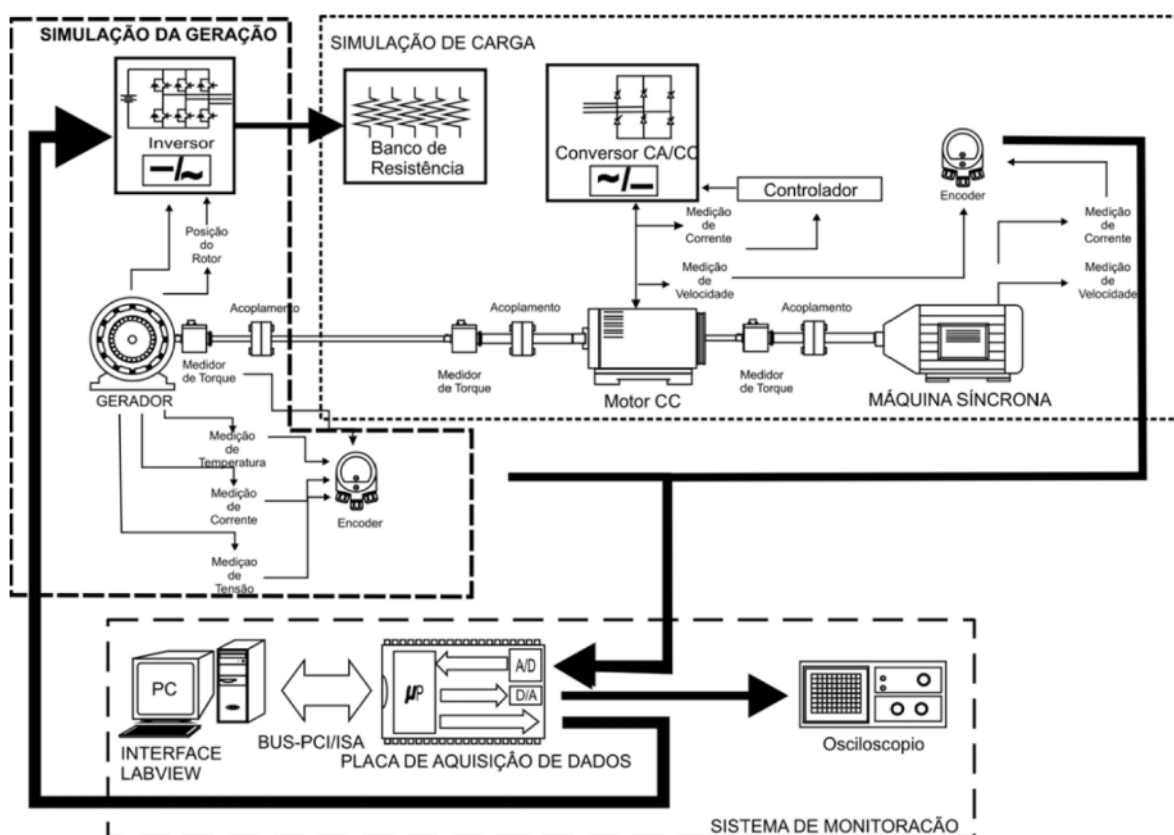
2.1 Introdução

Neste capítulo será realizado uma breve apresentação da Bancada Dinâmica, exibindo registros do seu diagrama conceitual original e da sua primeira implementação, descrevendo de forma geral seus elementos, sistemas e aplicações. Por fim, será exibido o estado da bancada quando se iniciou este trabalho.

2.2 Visão geral

O diagrama conceitual exibido na Figura 1 ilustra os principais sistemas que compõem a Bancada Dinâmica, assim como seus principais equipamentos e dispositivos, com suas funções específicas sendo exploradas nos tópicos a seguir.

Figura 1 – Diagrama conceitual original ilustrando os principais sistemas que compõem a Bancada Dinâmica.



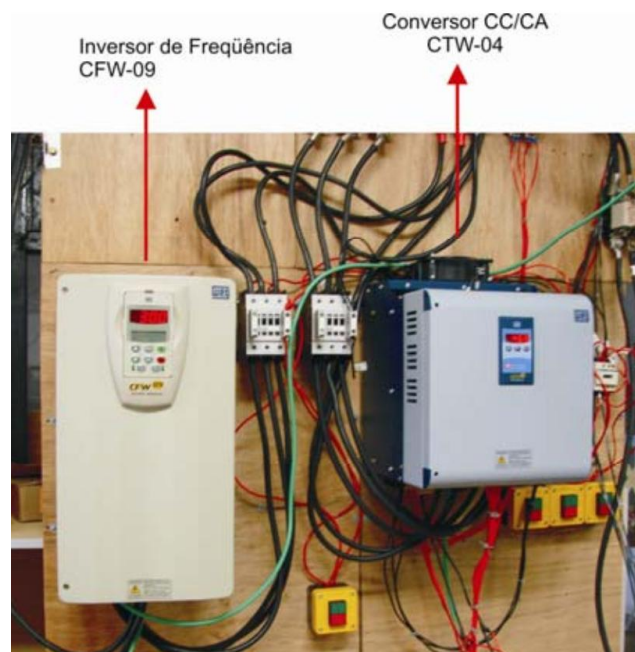
Fonte: TEIXEIRA; VIEIRA JR.; BARATA, 2012.

2.2.1 Descrição funcional

As figuras 2 e 3 exibem os principais equipamentos de potência que compõem a Bancada Dinâmica conforme sua implementação original, sendo eles:

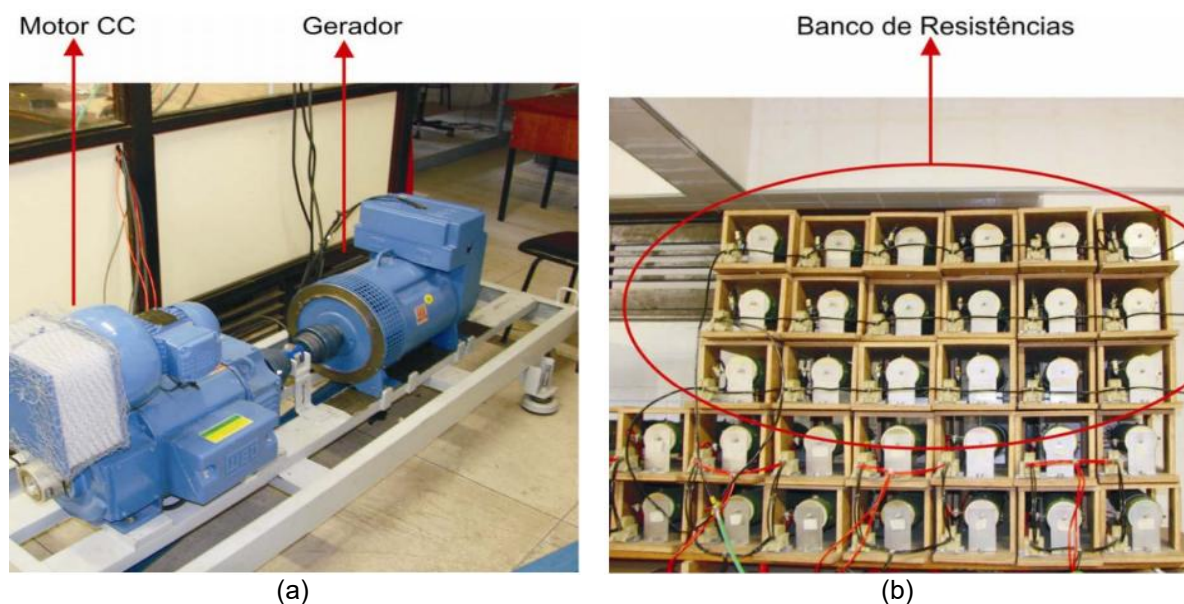
- Conversor CA/CC;
- Motor de corrente contínua (Motor CC);
- Gerador trifásico síncrono (Gerador);
- Inversor de frequência (Inversor);
- Banco de resistores.

Figura 2 – Parte da instalação original da Bancada Dinâmica com destaque para o circuito de comando, inversor e conversor.



Fonte: Adaptado de SOUZA, 2007.

Figura 3 – (a) Máquinas elétricas da Bancada: Motor CC e o Gerador; (b) Banco de resistências utilizadas para simular carga no gerador..



Fonte: Adaptado de (Souza, 2007).

No que se refere ao fluxo de energia eletromecânica da Bancada Dinâmica, a energia elétrica é inicialmente fornecida ao sistema por meio da alimentação do Conversor CA/CC, o qual realiza o acionamento do Motor CC, que converte a energia elétrica fornecida em energia mecânica na forma de torque e velocidade angular do eixo (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

Caso haja o interesse de perturbar de forma controlada o desempenho do Motor CC é possível acoplar ao seu eixo um motor síncrono ou de indução, que fornecerá diferentes níveis de carga mecânica para afetar a velocidade e o torque do eixo. Ressalta-se que, embora esse elemento conste no diagrama conceitual original, ele não foi implementado na montagem original da bancada de 2007.

Acoplado ao eixo do Motor CC está o Gerador, que converte a energia mecânica fornecida a ele pelo Motor CC em energia elétrica para a alimentação de um inversor de frequência. Enquanto a energia elétrica fornecida pelo Gerador é usualmente de tensão e frequência constante quando em regime permanente, o Inversor permite a conversão dela em energia elétrica de tensão e frequência variável em sua saída (FRANCHI, 2008), a qual é utilizada para alimentar o banco de resistores, onde a energia elétrica é dissipada na forma de energia térmica.

Embora o banco de resistores seja uma carga elétrica fixa, a partir do controle da saída do Inversor é possível ajustar a quantidade de potência elétrica inserida no

banco de resistores, com esse conjunto Inversor-Banco de resistências podendo então atuar como uma carga elétrica variável.

Quanto maior for a dissipação de energia elétrica na carga elétrica, maior será a potência mecânica exigida pelo gerador para manter sua tensão de saída nominal, com todo esse conjunto gerador-inversor-banco de resistências agindo como uma carga mecânica variável para o Motor CC.

Dessa forma, variações na potência elétrica consumida na carga ao final do sistema, por meio do controle do inversor de frequência, podem provocar respostas dinâmicas em todo o conjunto eletromecânico. Variações na potência elétrica inserida no banco de resistores implicam diretamente em variações da potência mecânica exigida pelo Gerador, refletindo-se no torque requerido no eixo e, conseqüentemente, na potência fornecida pelo Motor CC, sendo essas mudanças de demanda atendidas de forma automática ou manual pelo Conversor CA/CC.

2.2.2 Instrumentação para monitoramento e aquisição de dados

Para o acompanhamento do estado operacional da bancada dinâmica, diversos sensores estão instalados em pontos de interesses. A partir deles é possível obter e processar em tempo real medições de grandezas elétricas e mecânicas. Esses equipamentos integrantes da bancada são discriminados na lista abaixo:

- Sensor de velocidade de alta precisão. Acoplado ao eixo principal motor-gerador, especificamente na extremidade posterior do Motor CC;
- Sensores de vibração conectados às carcaças do Motor CC e do Gerador;
- Placa de circuito impresso com sensores de tensão e corrente, responsável pela medição das grandezas elétricas na saída do gerador;
- Sensor de torque, instalado entre os eixos do Motor CC e do Gerador, atuando como elemento de acoplamento mecânico entre ambos;
- Placa de aquisição de dados da *National Instruments®*;
- Computador: centraliza a obtenção, registro e processamento das saídas de dados dos sensores, permitindo o acompanhamento em tempo real ou análise posterior do estado da bancada através de software supervisorio em LabVIEW, desenvolvido especificamente para esta aplicação.

Ademais, também se faz o uso de diversos equipamentos auxiliares para a aquisição de dados complementares às realizadas pela instrumentação integrada, assim como medições independentes para fins de verificação e validação de dados. Essa instrumentação auxiliar consiste nos itens descritos na lista a seguir:

- Osciloscópio digital: utilizado para a visualização e análise temporal de sinais elétricos, permitindo a verificação de formas de onda, níveis de tensão e distorções, em diferentes pontos do sistema, tais como: nas placas de circuito impresso do Conversor CA/CC, do Inversor, na saída do Gerador e no banco de resistores;
- Medidor de temperatura à *laser*: equipamento portátil de uso manual, para medições pontuais da temperatura na superfície de diversos componentes da Bancada, como: Motor, Gerador, eixo, elementos de acoplamento;
- Medidor de velocidade à *laser*: equipamento portátil de uso manual, utilizado para a determinação da velocidade de rotação por meio da detecção do reflexo de seu *laser* em uma fita reflexiva fixada ao eixo em análise. É empregado principalmente na medição da velocidade do eixo principal do conjunto motor-gerador.

2.3 Aplicações experimentais

2.3.1 Simulação de geração

É caracterizada pelo conjunto Motor CC-Gerador-Inversor de frequência, com esse conjunto permitindo a reprodução controlada de diferentes condições de geração.

O motor atua como uma fonte de energia primária, representando a ação de uma correnteza fluvial ou de ventos, fornecendo potência mecânica ao eixo do gerador. O gerador, por sua vez, converte essa potência mecânica em energia elétrica, operando com tensão e frequência fixas em regime de funcionamento nominal (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

A energia elétrica então é condicionada pelo Inversor, possibilitando sua conversão para diferentes níveis de tensão e frequência, sendo sua saída definida, neste contexto, como o ponto de entrega do sistema.

Dos ensaios que podem ser realizados destacam-se dois:

- Ensaio de resposta do Gerador no decorrer de mudanças de demanda de energia elétrica do sistema;
- Ensaio de déficit de potência mecânica, ou seja, o estudo do comportamento do sistema quando a demanda de potência elétrica é maior do que a potência mecânica necessária no eixo do gerador para atendê-la.

Os ensaios possibilitados pela simulação de geração permitem o estudo do comportamento do Gerador e da rede elétrica simulada frente à diversos cenários reais emulados.

2.3.2 Simulação de carga

O conjunto Inversor-Banco de resistores emula uma carga elétrica variável frente ao gerador. Isso se dá pois, embora a carga resistiva alimentada pelo Inversor seja “fixa”, o Inversor permite o controle da tensão e frequência aplicadas à ela (RASHID, 2014). Dessa forma, a demanda de potência elétrica que o inversor exige do gerador pode ser ajustada.

O conjunto Gerador-Inversor-banco de resistores emula uma carga mecânica variável em relação ao eixo do Motor CC: variações na potência elétrica demandada pelo Inversor tem como resposta um aumento no torque eletromagnético resistente no eixo do Gerador, requerendo assim um aumento do torque que o Motor CC deve fornecer para manter sua velocidade nominal.

As variações na carga mecânica aplicadas ao eixo Motor CC podem ser utilizadas em ensaios com o Motor CC atuando com Velocidade Constante ou com Torque Constante, verificando assim o comportamento do sistema em diversos pontos de operação. As variações de carga elétrica no gerador podem ser utilizadas para estudar a resposta do fornecimento de energia do Gerador ao Inversor.

2.3.3 Sistema de monitoração

A aplicação de monitoração e aquisição de dados permite o acompanhamento experimental do comportamento da Bancada Dinâmica durante a realização dos ensaios. Por meio dos sensores instalados no sistema, são coletadas grandezas

elétricas e mecânicas, como tensão, corrente, velocidade, torque e vibração. Esses sinais são enviados à placa de aquisição de dados e processados em computador, possibilitando a visualização em tempo real e o armazenamento das informações para a posterior análise do desempenho do conjunto eletromecânico sob diferentes condições de operação.

2.4 Estado inicial da Bancada Dinâmica

No início do processo de readequação da Bancada referente a este trabalho, iniciado no ano de 2019, a Bancada Dinâmica encontrava-se parcialmente montada em uma nova instalação, diferente dos registros de Souza (2007), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 —Bancada Dinâmica parcialmente montada em nova configuração.



Fonte: Foto do autor.

Também foi constatado que não existia manual para a bancada, nem Procedimentos Operacionais Padrão (POP) específicos dela, nem registros técnicos oficiais de uso e alterações da Bancada ao longo dos anos.

A falta de uma documentação técnica de apoio confiável dificultou estimar o estado de funcionamento dos principais equipamentos de potência e máquinas girantes, assim como ficou incerto se o projeto original registrado no trabalho de Souza (2007) ainda poderia ser utilizado como base para inspeção e religação dos circuitos de comando e força e parametrização do Conversor CA/CC e do Inversor.

2.5 Considerações finais

A Bancada Dinâmica foi apresentada, junto da descrição do fluxo eletromecânico e da listagem de seus principais equipamentos, assim como suas possíveis aplicações práticas. Devido ao seu estado geral no início deste trabalho, há a necessidade de recomposição dela. Para dar início a este processo, é necessário identificar, de forma técnica e detalhada, as características dos principais equipamentos que a compõem, o que será visto no próximo capítulo

3 CARACTERIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE POTÊNCIA

3.1 Introdução

Neste capítulo são verificadas as características técnicas dos principais equipamentos que compõem os sistemas de simulação de geração e simulação de carga da Bancada Dinâmica.,

Através da verificação destes equipamentos será possível realizar a revisão das conexões, configurações e procedimentos para a readequação a ser desenvolvida nos próximos capítulos.

3.2 Conversor CA/CC

O Conversor CTW 04, apresentado na Figura 5, é um retificador controlado (RASHID, 2014) para uso com acionamento de motores de corrente contínua, sendo usado na Bancada Dinâmica para o acionamento do Motor CC.

Figura 5 — Conversor CA/CC da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

Na etiqueta de identificação do equipamento, exibida na Figura 6, consta que o modelo específico do conversor é o CTWA40090T22PESZ. As nomenclaturas e características específicas do modelo desse equipamento podem ser interpretadas de acordo com a Tabela 1.

Figura 6 — Etiqueta de identificação do Conversor CA/CC da Bancada Dnâmica

Fonte: Foto do autor.

Tabela 1 — Descrição das características do Conversor CA/CC conforme o código de Identificação

CTW A 4 0090 T 22 P E S Z	
CTW	Conversor CA/CC WEG
A	Antiparalelo: pode operar nos 4 quadrantes do plano de tensão-corrente ($V \times I$)
4	Série 4
0090	Corrente nominal de saída de armadura de 90 A
T	Alimentação de entrada trifásica
22	Tensão de alimentação da armadura em 220 Vac
P	Idioma do manual em português
E	"Empty". Versão simplificada do cartão de controle (sem <i>encoder</i> incremental e entrada e saída de 12 bits)
S	"Standard". Versão básica do conversor, sem recursos opcionais
Z	Dígito Indicador de final decodificação

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em 0899.5126 P-4: Manual do Conversor CA/CC, Série CTW-04, Software: versão 1.1x (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A, 2006).

Sendo do tipo antiparalelo, o Conversor CA/CC pode operar nos 4 quadrantes do plano tensão-corrente ($V \times I$), permitindo tanto a retificação com correntes positivas ou negativas quanto a inversão de potência, ou seja, a transferência de potência do lado CC para CA que geralmente ocorre durante a frenagem do Motor (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

A etiqueta de identificação do Conversor CTW 04 fornece informações adicionais quanto às características desse modelo: a frequência nominal da alimentação de entrada é de 50/60Hz, a tensão de saída de armadura é de até 230Vcc e a tensão e corrente nominais de saída de campo são respectivamente 396Vcc e 18Acc.

A forma básica de interação do operador com o conversor é feita por meio de sua Interface Homem-Máquina (HMI), mostrada na Figura 7.

Figura 7 — Interface Homem-Máquina do Conversor CA/CC



Fonte: Foto do autor.

3.3 Motor CC

Exibido na Figura 8, é o motor que atua como máquina primária no sistema de geração da Bancada Dinâmica. Ele é do tipo de corrente contínua com excitação independente, de modelo DNF 132 130 S da WEG, com ventilação forçada integrada.

Figura 8 — Motor CC da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

O acionamento do motor ocorre através da energização de suas bobinas de armadura e campo, sendo a primeira localizada no rotor girante e a segunda permanece fixa na estrutura interna do motor. A interação entre os campos eletromagnéticos gerados por cada bobina resulta em um torque que rotaciona o eixo principal, sendo o torque e a velocidade parâmetros dependentes da relação dessa interação (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

Pela placa de identificação do Motor CC, mostrada na Figura 9 consta que a potência do motor é de 15 kW e sua faixa de velocidade é de 20 até 2500 RPM. A tensão e a corrente nominal da bobina de armadura são, respectivamente, 260V e 64A, enquanto as de campo são 190V e 19A.

Figura 9 — Placa de identificação do Motor CC



Fonte: Foto do autor.

Por ser um motor de excitação independente, a alimentação das bobinas de campo e armadura é feita de forma individual, permitindo assim um controle preciso dos campos magnéticos gerados e conseqüentemente um controle preciso do torque e da velocidade dependentes da relação de interação entre ambos os campos magnéticos. Os bornes de alimentação do motor são mostrados na Figura 10.

Figura 10 — (a) Motor CC com a tampa de inspeção dos bornes conexões de força aberta; (b) Bornes de conexão do Motor CC.



(a)



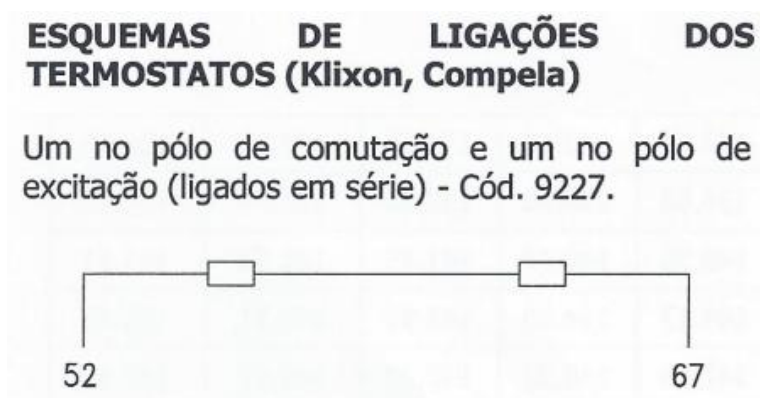
(b)

Fonte: Fotos do autor.

3.3.1 Circuito de proteção térmica

O Motor CC contém 2 contatos bimetálicos, com um deles localizado no polo de excitação junto à bobina de campo enquanto o outro está localizado no polo de comutação junto à bobina de armadura (WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS, 2013). Esses contatos estão ligados em série de forma a formar um circuito cujos pontos de conexão são acessíveis através dos bornes de ligação 56 e 67, conforme esquematizado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de ligação dos termostatos do Motor CC



Fonte: adaptado de WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS, 2013.

O superaquecimento do polo de excitação ou do polo de comutação resulta na abertura do respectivo contato presente neles, abrindo o circuito de proteção térmica. Essa ação não resulta diretamente na parada do motor, devendo assim esse circuito ser integrado à lógica de controle do acionamento do motor para que haja uma resposta apropriada.

3.3.2 Sistema de ventilação forçada

A ventilação do Motor CC é feita por um sistema de ventilação forçada integrado ativado por um motor trifásico com acionamento independente do Motor principal. O sistema de ventilação se encontra acoplado à parte superior do corpo principal do Motor CC, conforme a Figura 12.

Figura 12 — Sistema de ventilação forçada do Motor CC



Fonte: Foto do autor.

A entrada de ar da ventilação é protegida por filtros finos e filtros de malha grossa. Os filtros finos são capas de fibra responsáveis por impedir a passagem de poeira e detritos menores, enquanto os filtros de malha grossa são malhas de metal que agem principalmente como uma barreira de proteção mecânica para os filtros finos contra detritos e objetos maiores (WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS, 2013).

Pela placa de identificação do motor da ventilação, exibida na Figura 13, tem-se que ele é de indução trifásico tipo gaiola. Opera em 220V com corrente nominal de 0,95A quando em configuração tipo triângulo e opera em 380V e corrente nominal 0,55-0,58A quando em configuração tipo estrela. Em ambas as configurações o fator de serviço (FS) é de 1,15.

Figura 13 — placa de identificação do motor do sistema de ventilação forçada do Motor CC



Fonte: Foto do autor.

3.4 Gerador

Mostrado na Figura 14, consiste em um gerador elétrico síncrono trifásico de 4 polos, classe de isolamento H, fator de potência de 0.8, baixa tensão, 60Hz 1800rpm, 21kVA (16,8kW) para ligação de 220 – 240 V.

Figura 14 — Gerador da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

A Figura 15 ilustra a placa de identificação do Gerador. Nela pode-se observar que seu modelo específico é o GTA 160 SI 13, com parte de suas características elétricas e mecânicas podendo ser interpretadas de acordo com a Tabela 2.

Figura 15 — Placa de identificação do Gerador



Fonte: Foto do autor.

Tabela 2 — Descrição das características do Gerador conforme sua nomenclatura

GERADOR WEG MODELO GTA160SI130						
Tipo de Máquina	Característica	Tipo de Refrigeração	Carcaça – IEC	Comprimento da Carcaça	Aplicação	Código Complementar
G	T	A	160	S	I	13
Tipo de Máquina: <u>G</u> T A 1 6 0 S I 1 3						
G – Máquina Síncrona – Linha G						
Característica: G <u>T</u> A 1 6 0 S I 1 3						
T – Gerador Brushless com bobina auxiliar		P – Gerador Brushless com excitatriz auxiliar		S – Gerador Brushless sem bobina auxiliar e sem excitatriz auxiliar		
Tipo de Refrigeração: G T <u>A</u> 1 6 0 S I 1 3						
A – Aberto auto-ventilação			F – Fechado com trocador de calor ar-ar			
Carcaça: IEC: G T A <u>1 6 0</u> S I 1 3						
160 mm						
Comprimento da Carcaça: G T A 1 6 0 <u>S</u> I 1 3						
S, M, L, A, B, C, D, E, F						
Aplicação: G T A 1 6 0 S <u>I</u> 1 3						
I – Industrial	M - Marinizado	T – Telecomunicações		N – Naval	E - Especial	
Código Complementar: G T A 1 6 0 S I <u>1 3</u>						
Código referente à potência do gerador						

Fonte: Adaptada de SOUZA (2007).

Sendo um gerador do tipo síncrono, a frequência da sua tensão de saída depende diretamente da velocidade de rotação do seu eixo principal, sendo essa uma relação linear expressa através da Equação 1 (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014), onde f é a frequência da tensão gerada, N é a velocidade de rotação do rotor e P é o número de polos.

$$f = \frac{N * P}{120} \quad (1)$$

Dessa forma, a frequência de saída nominal de 60Hz só é mantida se a velocidade de rotação do eixo do gerador estiver estável em 1800RPM.

O gerador é do tipo autoventilado, onde a ventilação do equipamento está diretamente atrelada ao acionamento do mesmo, sem a necessidade de ventilação forçada externa. No Gerador esse processo é realizado a partir de hélices que estão acopladas diretamente ao seu eixo principal, de forma que ao ser rotacionado as

hélices provoquem o deslocamento de ar que resfriem o equipamento, com a intensidade da ventilação variando diretamente com a velocidade.

3.5 Inversor

O Inversor CFW09 da Bancada Dinâmica, apresentado na Figura 16, é um inversor de frequência do tipo CA/CA, fornecendo uma tensão de saída de amplitude e frequência controlável a partir de uma alimentação de tensão e frequência fixa. Embora sua aplicação usual para o acionamento de motores trifásicos, seu uso na Bancada é para a alimentação de uma carga resistiva trifásica, onde justos atuam como o sistema de simulação de carga elétrica.

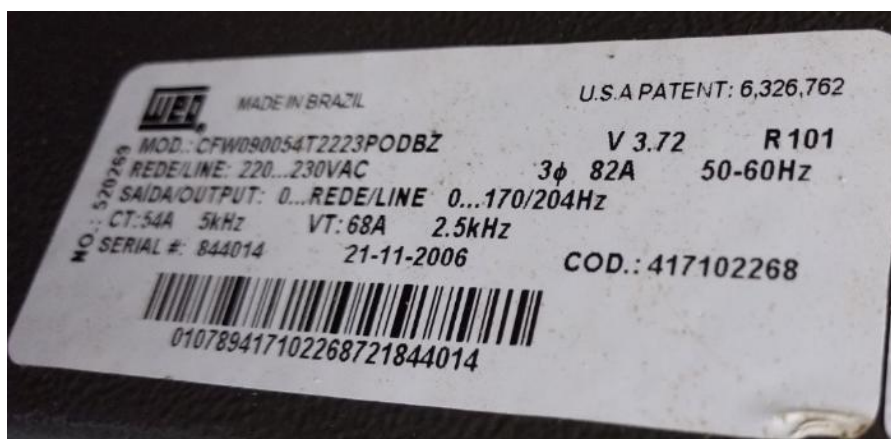
Figura 16 — Inversor da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

A Figura 17 exibe a etiqueta de identificação do Inversor, constando nela que seu modelo específico é o CFW090054T2223PODBZ. As nomenclaturas e características específicas do modelo desse Inversor podem ser interpretadas de acordo com a Tabela 3.

Figura 17 — Etiqueta de identificação do Inversor da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

Tabela 3 — Descrição das características do Inversor conforme o código de Identificação

CFW09 0054 T 2223 P O DB Z	
CFW09	Inversor de Frequência WEG Série 09
T	T = Alimentação trifásica de entrada
0054	Corrente nominal de saída para torque constante (CT): 0054 = 54A (PARA EQUIPAMENTOS EM 220-230V)
2223	Tensão de alimentação de entrada: 2223 = 220 a 230V
P	Idioma do manual: P = PORTUGUÊS
O	Opcionais: O = Com opcionais
DB	Recurso opcional de frenagem: DB = Frenagem Reostática
Z	Dígito Indicador de final decodificação

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Manual do Inversor de Frequência (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A, 2011).

O modelo utilizado na Bancada tem a capacidade de ser utilizado tanto em modo de torque constante (“CT”, *Constant Torque*) quanto em modo de torque variável (“VT”, *Variable Torque*) (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A, 2011). Em modo CT o torque proporcionado pelo inversor ao motor em um determinado ponto de velocidade de operação desejado é constante mesmo que ele seja inferior ao necessário para manter essa velocidade, enquanto em modo VT o Inversor ajusta o torque fornecido ao Motor de acordo com a necessidade, podendo fornecer correntes maiores por curtos períodos para compensar perdas de velocidade na ocorrência de variações de carga. As correntes nominais de entrada e saída para esses modos são de 65A e 54A para o modo CT e 82A e 68A para o modo VT. Assim, operando em 220V em modo CT esse inversor consegue fornecer uma potência próxima de 21 kVA.

O Inversor conta com o recurso opcional de Frenagem Reostática. Quando ativado, a partir das devidas configurações e preparações, esse recurso permite um controle mais preciso do processo de frenagem, dissipando através de resistores de potência externos a energia elétrica excedente retornada pelo motor ao Inversor.

Exibidos na Figura 18 estão os displays e botões que juntos compõem a interface humano-máquina (HMI) presente na tampa frontal do Inversor, sendo este o meio mais básico de configuração e controle do Inversor.

Figura 18 — Interface humano-máquina do Inversor



Fonte: Foto do autor.

3.6 Carga resistiva trifásica

É um banco de resistores de potência, onde os resistores estão conectados em uma configuração que resulta em uma carga resistiva trifásica. Seu propósito é atuar como carga para o Inversor, dissipando predominantemente na forma de calor a energia elétrica fornecida por ele. Um exemplar dos resistores que formam o conjunto é mostrado na Figura 19.

Figura 19 — Exemplar de um dos resistores de potência que compõem a Carga Resistiva Trifásica da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

Os resistores de potência utilizados são nominalmente iguais, de resistência $2,75\Omega$ e potência máxima de 1000 W . Por essas características é possível encontrar que a corrente máxima de cada resistor é de aproximadamente 19 A , conforme mostrado nas equações 2 e 3.

$$P_{max} = R * I_{max}^2 \quad (2)$$

$$I^2 = P_{max} / R \quad (3)$$

$$I_{max} = \sqrt{(P_{max} / R)} = \sqrt{(1000\text{ W} / 2,75\Omega)} = \sqrt{(363,63\text{ A})} = 19,06\text{ A}$$

3.7 Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentadas as características técnicas dos principais equipamentos de potência da Bancada. A compreensão do funcionamento desses dispositivos é essencial para o entendimento do sistema como um todo, uma vez que cada elemento desempenha um papel crucial na conversão e controle de energia.

O conhecimento das funções e características de cada um desses equipamentos serve como base para o entendimento mais aprofundado do funcionamento da Bancada como um todo, trazendo assim o domínio necessário para avaliar o projeto original e compará-lo ao estado em que a Bancada foi encontrado. Essa avaliação permitirá dar início a readequação da Bancada, conforme será visto nos capítulos à seguir.

4 RECOMPOSIÇÃO DA BANCADA DINÂMICA

4.1 Introdução

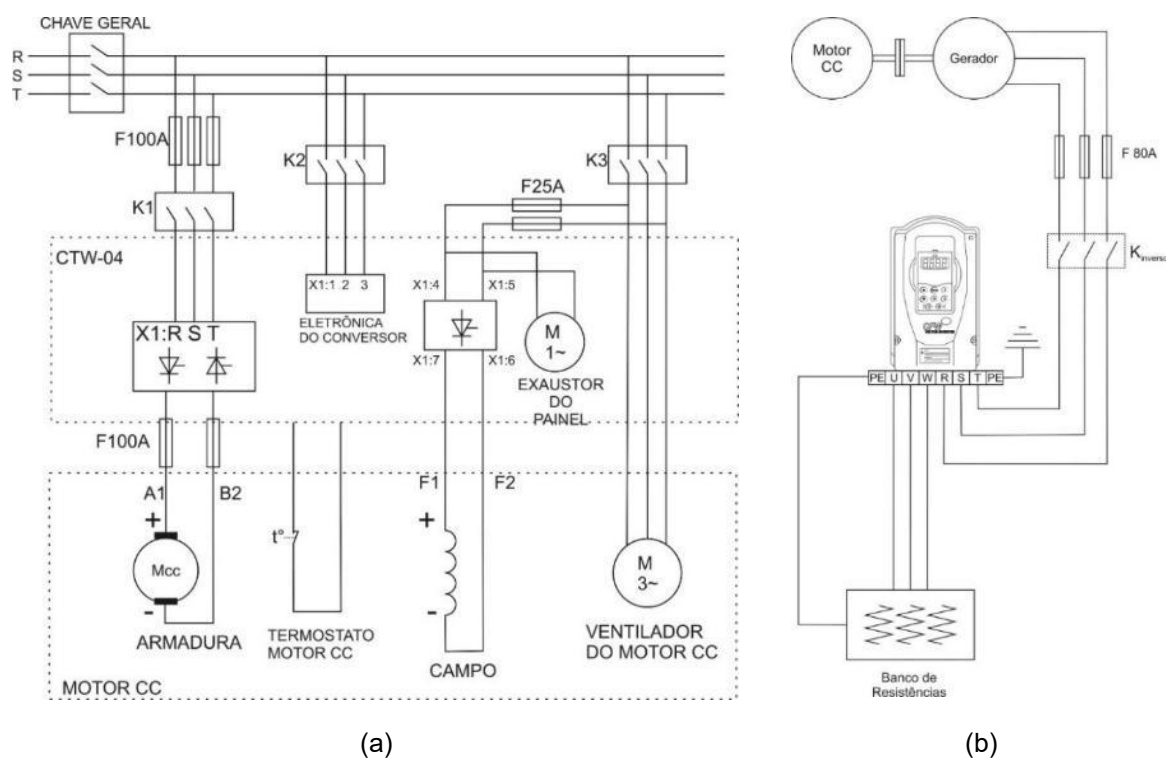
Com o objetivo de tornar a Bancada Dinâmica operacional novamente, foi feito um estudo da implementação do projeto original conforme registrado no trabalho de SOUZA (2007), com o intuito de usá-lo como base para a readequação da Bancada. Durante a remontagem, foi feita uma inspeção geral da Bancada Dinâmica, dos equipamentos que a compõem, do espaço LabEP e das ligações elétricas, verificando o estado de conservação e realizando a limpeza e testes de verificação de funcionamento dos diversos equipamentos. Neste capítulo será descrito este processo.

4.2 Revisão do material circuito de força e comando originais

Para a revisão dos circuitos de força e comando originais, foi feito inicialmente o estudo completo dos manuais do Conversor CA/CC (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006) e do Inversor (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011), verificando seus parâmetros e acionamentos sugestivos.

4.2.1 Circuitos de Força e Comando

Figura 20 – (a) Diagrama de força do Conversor CA/CC; (b) Circuito de força do Inversor

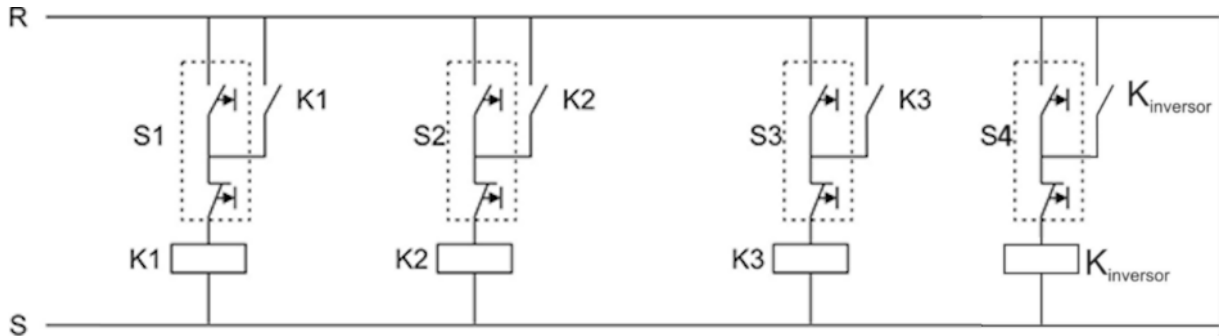


(a)

(b)

Fonte: Adaptado de SOUZA (2007).

Figura 21 — Diagrama de comando

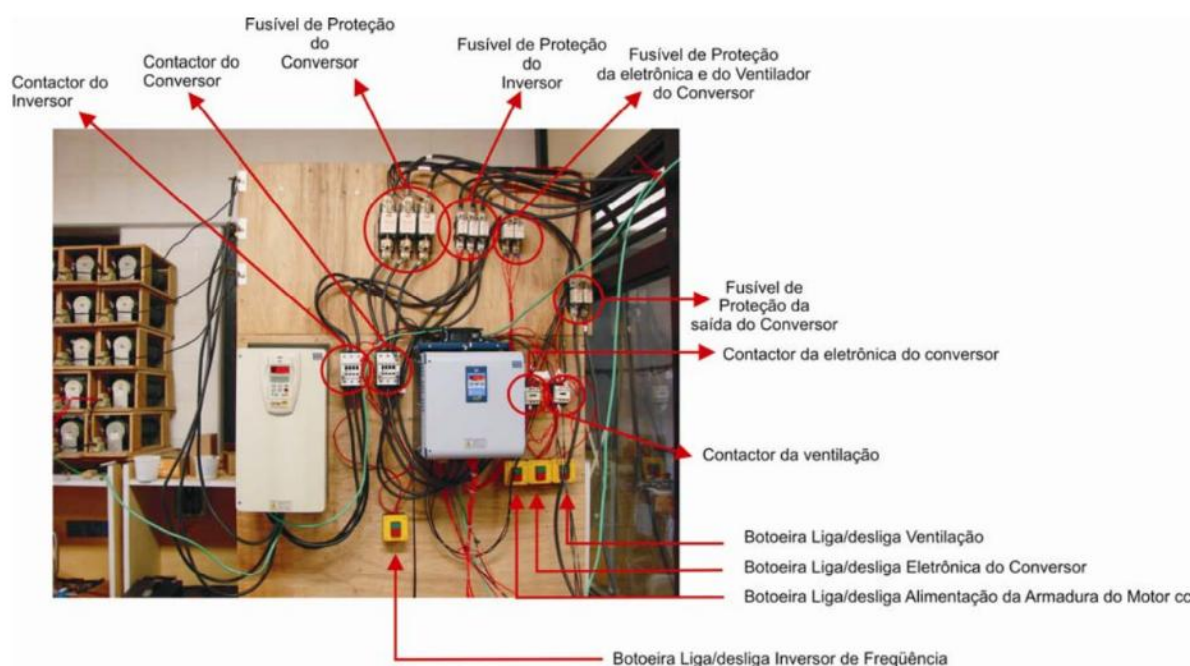


Fonte: Adaptado de SOUZA (2007).

Pela análise dos diagramas de força e comando apresentados nas figuras 20 e 21, constatou-se que a lógica de acionamento básica é a apresentada a seguir:

- A contatora K1, acionada pela botoeira S1, quando está ativa alimenta a entrada do retificador de armadura do Conversor CA/CC.
- A contatora K2, acionada pela botoeira S2, quando está ativa alimenta a eletrônica do Conversor CA/CC, inicializando-o junto de sua HMI.
- A contatora K3, acionada pela botoeira S3, quando está ativa alimenta a entrada do retificador de campo do Conversor CA/CC, que acionamento juntamente o exaustor do equipamento. Essa contatora também aciona a ventilação forçada do Motor CC.
- A contatora $K_{inversor}$, acionada pela botoeira S4, quando está ativa permite a alimentação do Inversor pelo Gerador.

Figura 22 – Descrição dos componentes que compõe o acionamento do Conversor e do Inversor no configuração original dela em 2007.

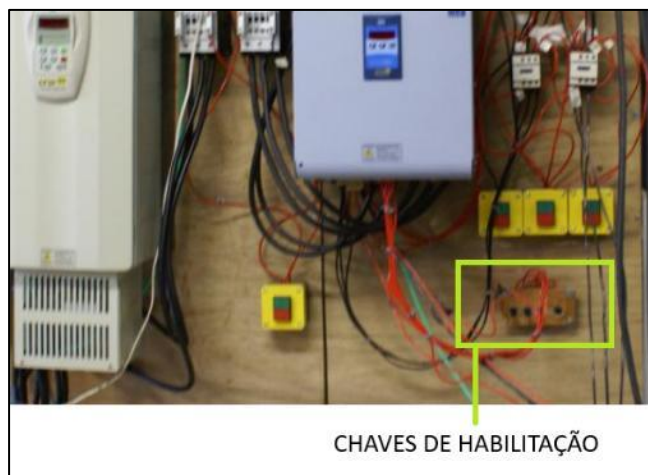


Fonte: Adaptado de SOUZA, 2007.

4.2.2 Circuito de habilitação

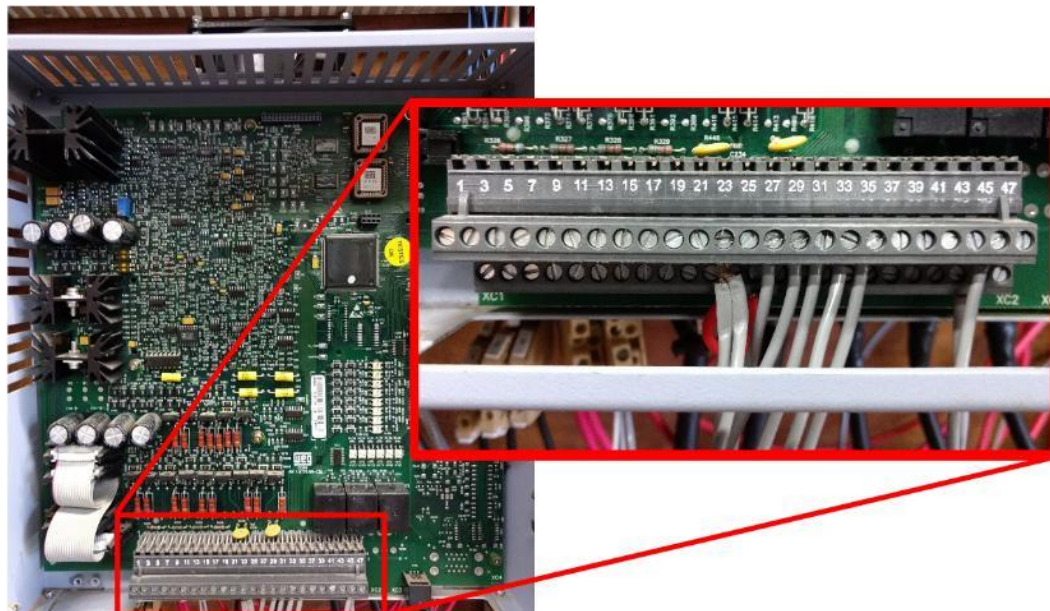
As chaves de habilitação, indicadas na Figura 23., são chaves com retenção mecânica, onde seu estado só é alterado de forma manual (FRANCHI, 2008). Seus usos na Bancada Dinâmica são no controle do estado das portas XC1 da eletrônica do Conversor CA/CC, acessíveis conforme a Figura 24. O diagrama elétrico das conexões do projeto original pode ser visto na Figura 25.

Figura 23 – Chaves de habilitação na configuração original da Bancada Dinâmica em 2007.



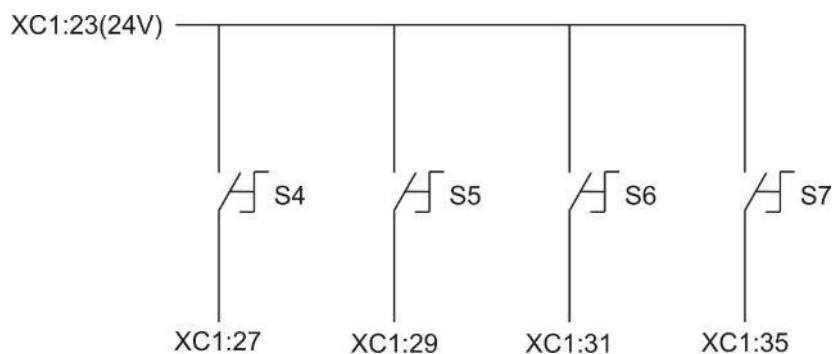
Fonte: Adaptado de Souza, 2007.

Figura 24 – Foto das Portas XC1 do Conversor CA/CC na configuração mais recente da Bancada Dinâmica.



Fonte: Foto do autor.

Figura 25 — Chaves de habilitação



Fonte: SOUZA, 2007.

Assim, sempre que as chaves S4-7 estão na posição fechada, elas definem os níveis das portas XC1:27,29,31,35 em 24Vcc. As funções desempenhadas por cada porta são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Funções das portas XC1 presentes no diagrama elétrico original da Bancada Dinâmica.

PORTA XC1	FUNÇÃO
23	Fornece alimentação em 24Vcc
27	Em 0Vcc ativa a função de Bloqueio Geral do conversor, impedindo o acionamento do Motor. Em 24Vcc desativa o Bloqueio Geral.
29	Sua função depende da parametrização do Conversor. Pode servir de comando do bloqueio das rampas de aceleração e desaceleração do Motor. Também pode ser usado como “botão” que acelera o Motor, quando em 24Vcc, caso a origem da referência de velocidade do Conversor esteja definido no modo “potenciômetro eletrônico”.
31	Caso a fonte de referência de velocidade do conversor esteja definida para ser feita por leitura do sinal de portas XC1 analógicas, a porta XC1:31 alterna quais portas analógicas são utilizadas como referência de velocidade: em 0Vcc a referência é lida por meio das portas XC1:3,5. Em 24Vcc pelas portas XC1:7,9. Caso a fonte de referência de velocidade outras fontes de origem de referência de velocidade, esta porta não tem função.
35	Define o sentido de giro do motor, sendo 0Vcc o sentido horário e 24Vcc o sentido anti-horário.

Fonte: feita pelo autor com base em (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006).

4.2.3 Comparação com a configuração atual

Utilizando como base os registros nas figuras 22 e 23 da instalação original, e comparando-os com o estado geral da Bancada no início deste trabalho, conforme as figuras 4 e 26, foi constatado que os mesmos elementos de acionamento estão presentes nas duas instalações.

Figura 26 – (a) Chaves de habilitação na nova instalação; (b) Botões de comando na nova instalação parcial.



(a)

(b)

Fonte: Fotos do autor.

Verificando a ligação parcial dos cabos na configuração atual e comparando suas ligações ao diagrama elétrico do projeto original, pode-se concluir que a nova instalação estava sendo montada de acordo com o projeto original. Assim, os diagramas originais foram considerados válidos, podendo ser utilizados como base direta a qual poderia finalizar a montagem da instalação atual.

4.3 Inspeção geral de cabos e elementos do circuito de acionamento

Foi realizada a limpeza da estrutura da Bancada, das contadoras, canaletas, cabos etc. removendo poeira e detritos. Os elementos de acionamento, como botoeiras, contadoras e fusíveis, foram verificados quanto à sua integridade física geral através de uma inspeção visual. Da mesma forma, os cabos parcialmente instalados foram inspecionados quanto à falhas, quebras de isolamento ou oxidação de seus condutores expostos, os quais não apresentaram sinais significantes de deterioração.

Com o auxílio de um multímetro, foram testados a continuidade dos itens descritos, confirmando que os fusíveis não estavam queimados, as botoeiras estavam comutando corretamente, as bobinas das contadoras apresentavam continuidade e que os cabos não estavam partidos internamente.

Foi realizada a religação do circuito de comando, reconectando as botoeiras, fusíveis e contadoras conforme o projeto nos diagramas elétricos, sem ainda religar nenhum dos equipamentos de potência. Para a alimentação de energia geral da Bancada Dinâmica, ela foi religada à Chave Seccionadora Geral do LabEP, exibida na Figura 27, sendo esta chave de uso exclusivo da Bancada Dinâmica.

Figura 27 – (a) Visão frontal da chave seccionadora geral da Bancada Dinâmica, localizada no LabEP; (b) Vista interna da Chave Seccionadora geral da Bancada Dinâmica.



Fonte: foto do Autor.

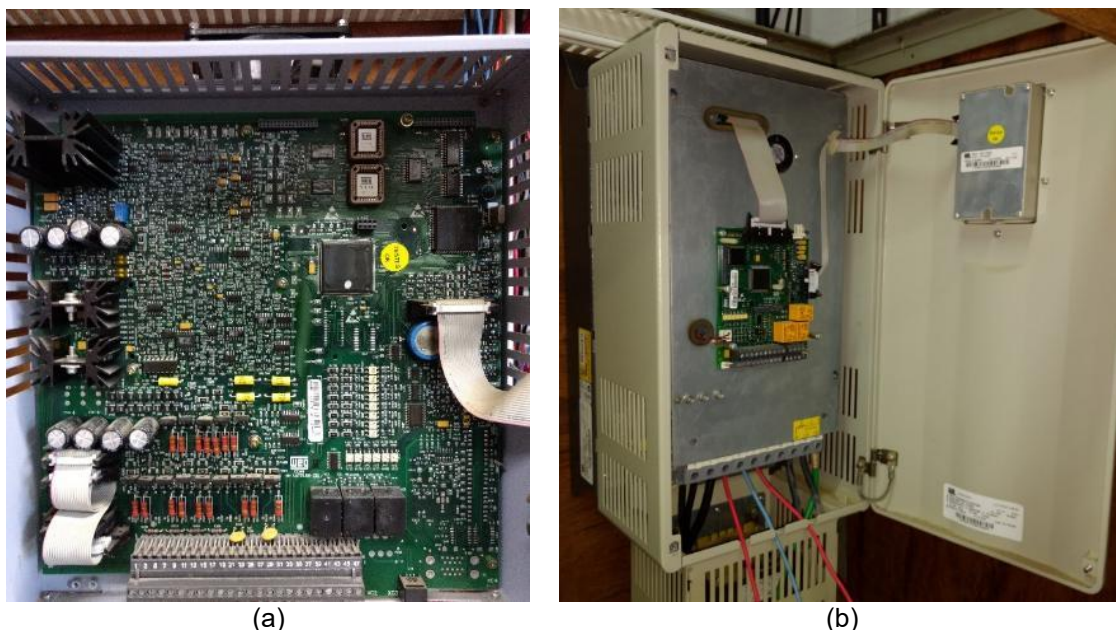
Com o circuito de comando reenergizado, foram feitos testes de acionamento das contadoras, onde foi confirmado o funcionamento esperado do circuito.

4.4 Inspeção do Conversor CA/CC e do Inversor

Foi feita a inspeção visual externa dos equipamentos, constatando-se assim a presença de poeira e detritos pequenos acumulados, principalmente em suas ventoinhas externas de refrigeração, que foram removidos para uma limpeza geral externa.

Ambos os equipamentos tiveram suas tampas de acesso frontal abertas para uma inspeção interna, onde não foram encontrados detritos, manchas ou acúmulo significativo de poeira na placa de circuitos expostas, conforme a Figura 28.

Figura 28 – (a) Placa de circuito principal do Conversor CA/CC; (b) Placa de circuito de controle auxiliar -do Inversor.



Fonte: Fotos do autor.

Com o auxílio de um multímetro foi confirmado a continuidade dos seus fusíveis de eletrônica e de potência.

Por fim, foi feita a religação dos cabos de força e de controle dos equipamentos conforme os diagramas elétricos do projeto original da Bancada. Porém, devido ao Inversor depender do Gerador para sua energização, que não estava operacional no momento desta inspeção, foi realizado um arranjo temporário para garantir a energização do Inversor, com a alimentação de força da contatora $K_{inversor}$ sendo derivado a jusante dos circuitos de força principais da Bancada.

Para uma confirmação inicial do estado de funcionamento deles, foi então realizada as suas energizações a partir do acionamento de suas contadoras. Foi verificado que suas HMI ligaram e estavam com seus botões de controle respondendo normalmente, assim como suas ventoinhas de refrigeração estavam em operação normal.

Após a confirmação de funcionamento, o arranjo temporário de alimentação do Inversor foi desfeito, retornando-o à configuração conforme o projeto.

4.5 Carga resistiva trifásica

Pela Figura 3-(b) apresentada anteriormente, estima-se que o banco de resistores do projeto original é formado por uma carga resistiva trifásica em estrela, com cada fase composta por 6 resistores de $2,75\Omega$ em série. Entretanto, a foto não mostra a totalidade da ligação, criando incerteza.

SOUZA (2007) não apresenta diagrama esquemático ou informações definitivas que confirmem o arranjo estimado, com o banco de resistores sendo comentado somente como carga para o gerador, sem maiores especificações.

Assim, o processo de remontagem da carga resistiva trifásica foi realizado considerando o número de resistências e sua configuração específica como previamente indefinida.

4.5.1 Inspeção e manutenção dos resistores de potência

Os resistores de potência de $2,75\Omega/1.000W$, utilizados para formar o banco de resistores, estavam armazenados em prateleiras no LabEP. Foi feita a remoção da poeira acumulada neles, assim como a religação elétrica dos resistores que estavam desconectados de suas borneiras. Por fim, o total de resistores identificados em estado adequado para uso foi de 28 unidades.

4.5.2 Montagem da carga

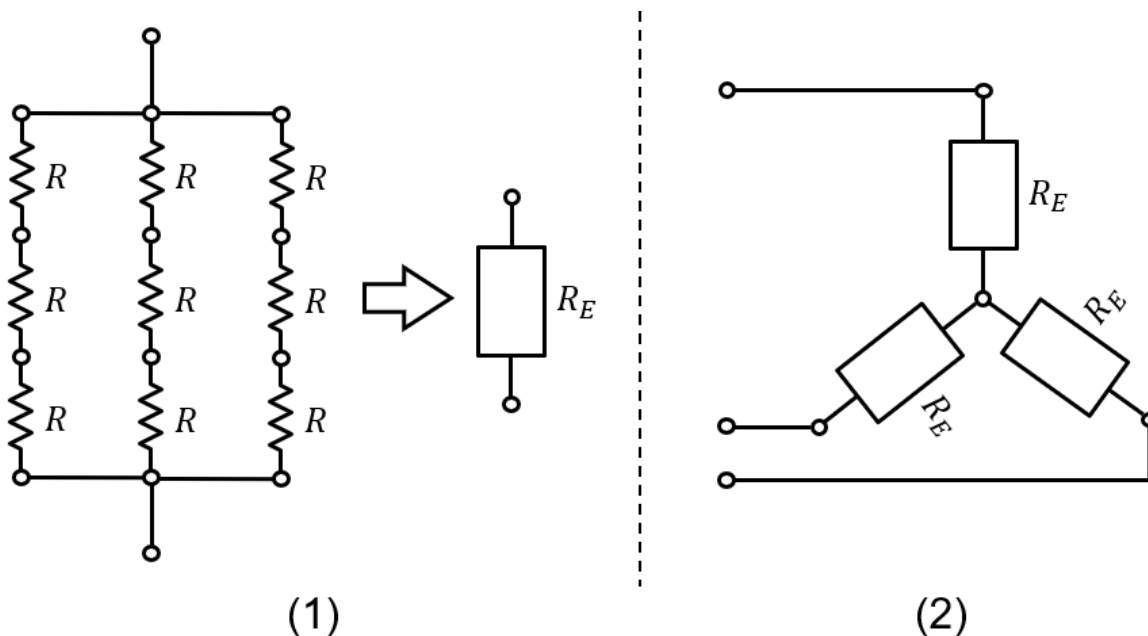
Para a formação da carga resistiva trifásica, foi adotado um arranjo por fase de 9 resistores, organizados em 3 ramos em paralelo, com cada ramo formado por 3 resistores em série.

Figura 29 – Conjunto que forma uma das fases da carga Resistiva trifásica



Fonte: Foto do autor.

Figura 30 — (1) Diagrama de ligação dos resistores de potência que formam cada uma das fases da carga; (2) Diagrama simplificado da Carga Resistiva Trifásica



Fonte: Autoria própria

Para o circuito resistivo mostrado na Figura 30 (1), tem-se que a resistência equivalente é igual a $2,75\Omega$, como demonstrado nas equações a seguir:

$$R_{ramo} = 3R = 3 * 2,75 = 8,25$$

$$R_E = \frac{R_{ramo}}{N_{rp}} = \frac{8,25}{3} = 2,75\Omega$$

Devido os 3 ramos em paralelo terem a mesma resistência equivalente, a corrente total que circula pela carga é dividida igualmente entre cada ramo. Dessa forma, a corrente máxima em cada fase é de 3 vezes a corrente máxima de cada ramo:

$$I_{ramo,max} = I_{R,max} = 19,06A$$

$$I_{RE,max} = 3 * I_{ramo,max} \cong 57,18A$$

4.6 Inspeção das máquinas girantes

4.6.1 Motor CC

Foi realizada uma inspeção visual geral do motor, onde constatou-se que a pintura da carcaça apresentava poucos sinais de desgastes no geral, como falhas na parte frontal do rotor. O sistema de ventilação e as tampas de inspeção do Motor CC foram removidas para verificação interna das bobinas, comutadoras e das escovas de grafite, vide a Figura 31.

Figura 31 – Motor CC com suas tampas de inspeção e sistema de ventilação forçada removidos.



Fonte: Fotos do autor.

O rotor foi girado manualmente, primeiramente com as escovas de grafite acopladas na comutadora e depois com elas desacopladas. Verificou-se que, em ambos os casos o motor girava livremente e sem resistência para os dois sentidos de rotação. Percebeu-se um ruído de baixa intensidade somente quando testado com as escovas acopladas, proveniente do contato das escovas com a comutadora.

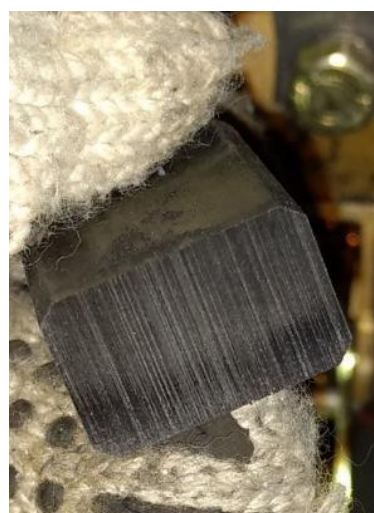
O fim da vida útil das escovas de grafite é representada por um risco fundo em relevo próximo do seu texto de identificação, indicado próximo da linha vermelha na Figura 32-(a), devendo as escovas serem trocadas caso seu comprimento total tenha se reduzido até se aproximar da linha (BORGES, 2007). Após uma verificação das 8 escovas de grafite do Motor CC, foi constatado que todas apresentam mais que o dobro do comprimento mínimo, não havendo necessidade de troca considerando este aspecto.

A Figura 32 exibe uma das escovas de grafitem, enquanto a Figura 33 exibe em seu item (a) seus pontos de acoplamento na estrutura do comutador e em seu item (b) a camada de depósito de grafite formada sob a comutadora.

Figura 32 – (a) Indicação em vermelho do limite máximo de desgaste da escova de grafite; (b) Face de contato da escova de grafite com o comutador.



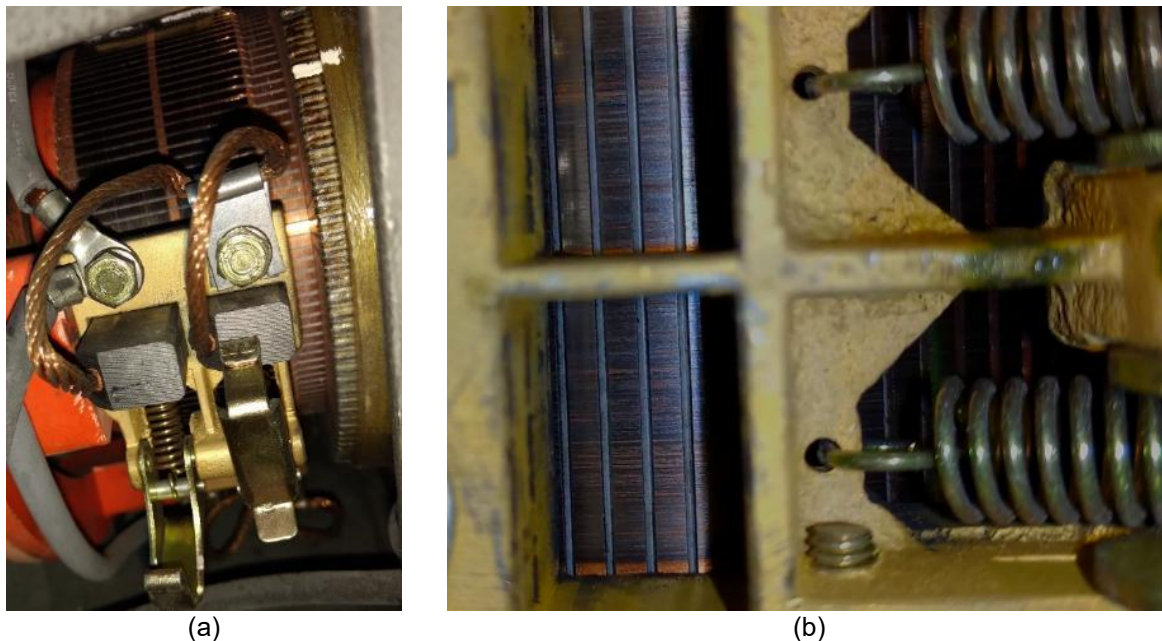
(a)



(b)

Fonte: Fotos do autor.

Figura 33 – (a) Duas escovas de grafite em seus pontos de encaixe no porta-escovas; (b) Filme de grafite sobre o comutador.






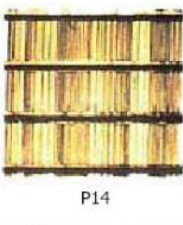


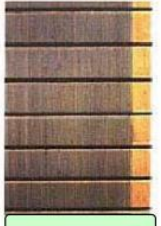

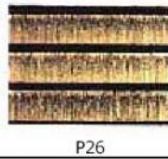



Fonte: Fotos do autor.

Foi observado que suas aparências são uniformes, sem falhas ou quebras nas escovas e sem grandes linhas de descontinuidade nelas ou nos depósitos de grafite em toda a extensão do comutador. Conforme BORGES (2007), um dos principais indicativos de boa operação das escovas sobre o comutador é a aparência uniforme do filme de grafite acumulado, sem trechos intermitentes e sem aparência fortemente reflexiva, conforme discriminado na Figura 34. Conclui-se então que, durante usos passados do Motor CC, não houve danos prévios à escova nem há indicativos de desníveis ou desgastes no comutador.

Embora o tom do depósito de filme de grafite não sirva como fator determinante para possíveis problemas, tons muito escuros podem significar pressão excessiva das molas das escovas ou sobrecarga de corrente de armadura (WEG, 2013), havendo necessidade de investigação futura.

Figura 34 – Parâmetro de aceitabilidade para formação do filme de grafite.

Intensidade de Coloração	Aspectos de Depósitos	Manchas de Origens Mecânicas	Manchas de Origens Elétricas
 BOM	 P12	 P22	 P42
 BOM	 P14	 P24	 P46
 BOM	 P16	 P26	
		 P28	

Fonte: Adaptado de BORGES, 2007.

4.6.2 Ventilação do Motor CC

Inspecionando visualmente, constatou-se que o sistema de ventilação estava com sua estrutura externa empoeirada. Dessa forma, foi feita sua limpeza. A pintura estava em bom estado, sem sinais de desgastes significativos.

Como inspeção inicial, primeiramente foi feito o giro manual do rotor do motor de ventilação, onde foi verificado que o rotor estava girando livremente e sem resistência.

Sua alimentação foi religada à contatora K3, conforme definido no circuito de força. O acionamento da contatora teve como efeito a sua partida direta de forma correta.

Com o auxílio de um alicate amperímetro foi monitorada a corrente de linha do motor durante 5 minutos, onde verificou-se que ela se manteve estável em uma faixa de 0,90A a 0,97A, dentro do esperado considerando a sua corrente nominal de 0,95A quando em 220V. Durante o funcionamento, o ruído feito pelo motor se manteve estável e constante, sem sinais anormais percebidos.

4.6.3 Gerador

Era de informação conhecida que o Gerador da Bancada Dinâmica havia sido utilizado em testes experimentais, durante o desenvolvimento do projeto de pesquisa, onde um de seus rolamentos havia sido intencionalmente trincado, a fim de realizar testes de monitoramento de vibração. Após estes testes não havia registros se o rolamento havia sido substituído por um íntegro.

Por conta disso, houve a necessidade de desmontagem parcial do Gerador para confirmação da integridade dos rolamentos utilizado.

Após processo de desmontagem, feito com conjunto dos membros do laboratório sob a supervisão do professor responsável Petrônio Vieira Junior, constatou-se que os rolamentos utilizados estavam íntegros. Uma foto do Gerador com seu eixo principal desacoplado e um dos seus rolamentos é exibida na Figura 35.

Figura 35 – (a) Gerador parcialmente desmontado com seu eixo principal; (b) Rolamento do Gerador encaixado no eixo.



(a)



(b)

Fonte: Fotos do autor.

Embora o rolamento estivesse íntegro, foram verificados sinais de oxidação superficiais em sua estrutura, havendo assim a necessidade futura de ensaios de verificação de integridade mais profundos (WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS, 2005).

Após a inspeção e limpeza interna e externa, feita por membros do Grupo de Tecnologia da Automação associados ao LabEP, foi considerado que o gerador estava adequado para uso, embora haja a necessidade de realizar ensaios mais completos de verificação de seu funcionamento no futuro.

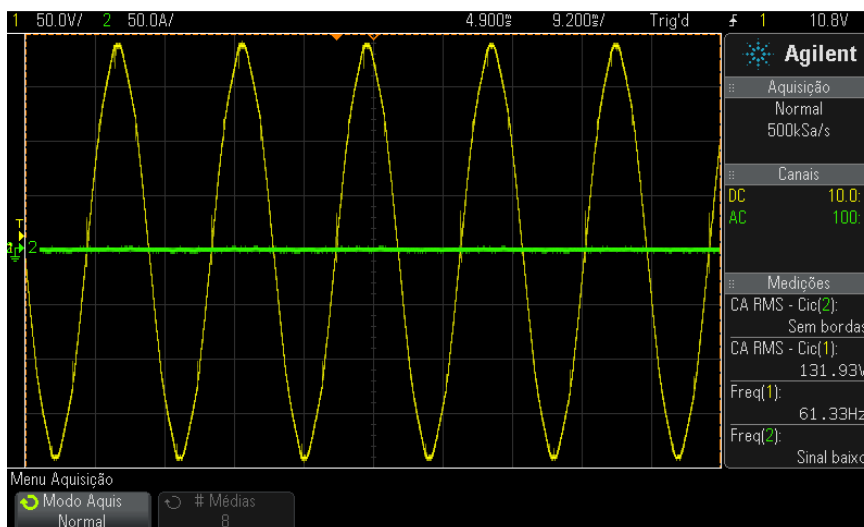
Com o fim da inspeção interna, o motor foi remontado. Seu rotor foi rotacionado manualmente, confirmando giro livre sem resistência notada em seu eixo além do próprio peso de seu rotor.

4.7 Montagem final e teste de acionamento

Após a confirmação do estado das máquinas girantes, elas foram religadas conforme o circuito de força, finalizando assim a ligação elétrica geral da Bancada Dinâmica.

Para teste de funcionamento, o Conversor CA/CC foi parametrizado de acordo com os registros de Souza (2007). Nesta parametrização, não há o controle preciso de velocidade do Motor CC. Por conta disto, foi utilizado um tacômetro à laser para medir a frequência de rotação do Motor CC enquanto ele era acelerado até a velocidade nominal do Gerador de 1800RPM. Enquanto se mantinha a contatora $K_{inversor}$ aberta, para não haver a alimentação do Inversor pelo gerador, se confirmou com o auxílio de um osciloscópio que sua forma de onda gerada de tensão era uma senoide próxima de 60Hz a $\sim 132V_{fase}$, conforme mostra a Figura 36.

Figura 36 – Formas de onda de tensão e corrente na saída do Gerador, sem energização do Inversor.



Fonte: foto do Autor.

Sendo a tensão de fase produzida pelo Gerador dentro dos limites adequados para a alimentação do Inversor, a contatora K3 foi acionada, permitindo sua energização, o que resultou na ativação de sua HMI e de sua ventilação conforme o esperado.

4.8 Considerações finais

Após a revisão do material disponível relacionado à Bancada Dinâmica e seus elementos, foi confirmada a viabilidade da sua recomposição. Seus equipamentos, máquinas girantes e elementos de acionamento foram inspecionados e confirmado que estavam adequados para operação, o que foi seguido da recomposição da Bancada Dinâmica. Após a confirmação do funcionamento esperado do circuito de comando, foi realizado um teste breve de acionamento do conjunto Motor CC- Gerador, e finalizado com a alimentação do Inversor pelo Gerador.

Os resultados obtidos demonstram o funcionamento esperado da Bancada Dinâmica, permitindo assim continuar o processo de aprimoramento de seu projeto, que será visto no próximo capítulo.

5 ALTERAÇÕES NO CIRCUITO DE FORÇA E COMANDO

5.1 Introdução

Após a finalização da montagem e acionamento de teste da Bancada Dinâmica, que foram acompanhados da revisão dos manuais dos equipamentos e de trabalhos acadêmicos relacionados, foram verificados diversos pontos do projeto que poderiam ser alterados para aprimorar o funcionamento da Bancada Dinâmica.

Assim, neste capítulo serão descritas as alterações realizadas no projeto, resultantes dos problemas identificados e das soluções propostas para sua correção, e listará a documentação produzida referente ao projeto atualizado.

5.2 Alteração do posicionamento do fusível F100A

Identificados no circuito de força da Bancada Dinâmica como “F100A”, a proteção do circuito de armadura do Conversor CA/CC é feita por 3 fusíveis de 100A, do tipo NH1, classe aR, de atuação ultrarrápida, conforme exibido na Figura 37. São dimensionados para condução de corrente elevada, compatíveis com os condutores e cargas do circuito de potência e de uso adequado para proteção de eletrônica em circuitos sujeitos a sobrecarga de pouca duração (RASHID, 2014).

Figura 37 – Fusíveis de proteção geral do circuito de força da Bancada Dinâmica

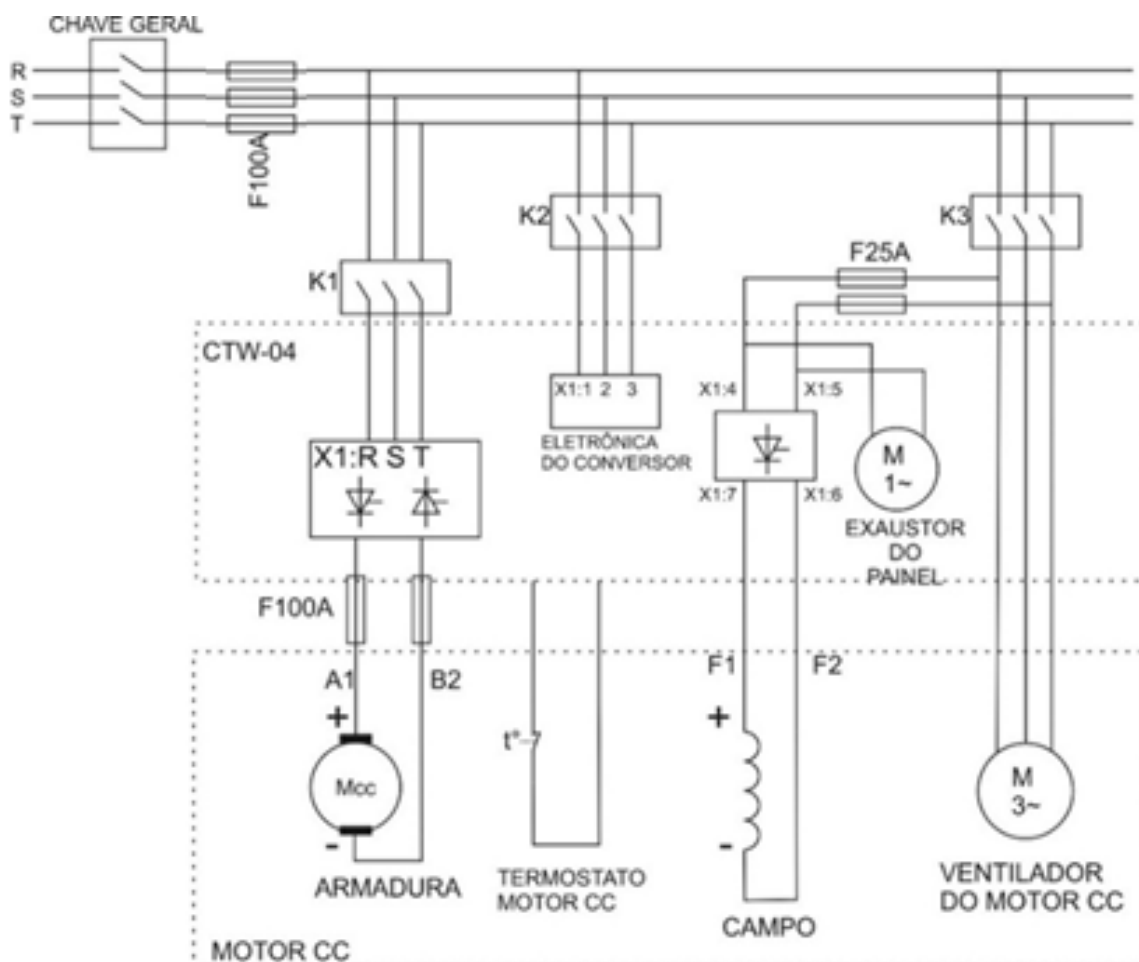


Fonte: Foto do autor.

Embora no circuito de força original da Bancada Dinâmica eles sejam utilizados para proteção somente da alimentação de armadura do Conversor CA/CC, no acionamento sugestivo presente em seu manual é recomendado que ele esteja ligado como proteção geral do circuito de força do equipamento e do Motor CC, protegendo

também seus circuitos de alimentação de entrada de campo e da alimentação da ventilação do Motor CC. Dessa forma, houve um ajuste das ligações do circuito de força a adequá-lo à recomendação, conforme é ilustrado na Figura 38.

Figura 38 – Circuito de atualizado após a alteração do ponto de ligação de F100A.



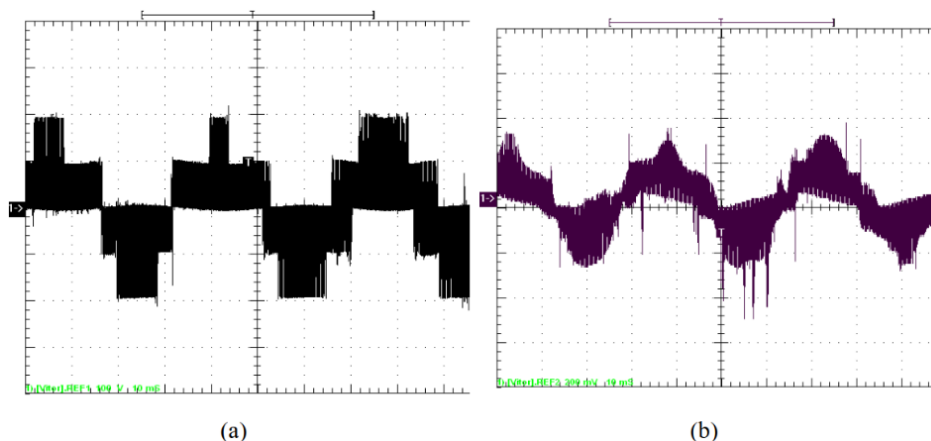
Fonte: Feita pelo autor com base em SOUZA, 2007.

5.3 Ajuste de carga elétrica na emulação de Carga

Testes experimentais realizados alimentando a carga resistiva trifásica indicaram que durante sua operação, o Inversor produzia um ruído forte interno acompanhado de vibração anormal quando comparado à operação normal de acionamento de motores trifásicos. Isso apresentava possível risco ao equipamento se operado nesta condição durante longos períodos devido ao possível estresse físico e eletrônico. Ademais, suas medições de tensão e corrente da saída, conforme visualizadas pela HMI de seu painel principal, estavam incorretas, sendo geralmente muito abaixo da saída real.

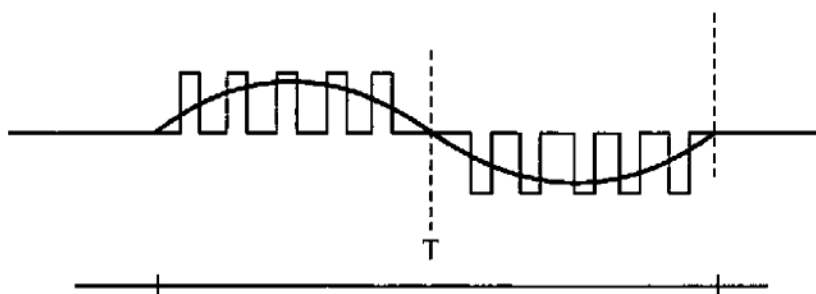
Tal problema é decorrente da ausência de filtragem da saída do Inversor (SOUZA, 2007). Isso se dá, pois ele produz uma tensão alternada de amplitude e frequência controláveis por meio de modulação por largura de pulso (PWM), gerando em sua saída uma forma de onda composta por pulsos de alta frequência cuja componente fundamental é senoidal, conforme mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Tensão (a) e Corrente (b) na saída do inversor de frequência



Fonte: SOUZA, 2007.

Figura 40 – Modulação PWM.



Fonte: RASHID, 2014.

Quando utilizado para o acionamento usual de um motor trifásico, as bobinas elétricas internas deste apresentam características indutivas naturais que atuam como um filtro passa-baixa (RASHID, 2014). Como consequência, há a filtragem das componentes de alta frequência associadas ao chaveamento utilizado na geração da onda PWM de saída, geralmente na ordem de kHz, sem atenuar de forma significativa componentes de baixa frequência. Dessa forma, a corrente resultante segue a componente fundamental da senoide equivalente.

O uso de uma carga resistiva no lugar do motor faz com que não haja a filtragem das componentes de alta frequência. Dessa forma, o resultado é uma corrente de saída que replica a forma de onda dos próprios pulsos de tensão do chaveamento de alta frequência do Inversor, ao invés de seguir a componente fundamental senoidal.

Devido o Inversor estar medindo uma corrente muito diferente da efetiva real, se cogitou a possibilidade da falha na atuação das medidas de proteção configuradas em sua parametrização devidos aos erros de sua estimativa.

Assim, houve a necessidade de alterar a carga alimentada pelo inversor para uma que apresentasse o comportamento de filtro passa-baixa esperado na saída do Inversor, evitando a operação fora das condições de uso previstas do mesmo.

5.3.1 Adaptação da carga resistiva trifásica em carga LR trifásica

O filtro passa-baixa precisa ter uma frequência de corte alta o suficiente para não atenuar de forma significativa a componente fundamental de 60Hz, sendo esta a frequência nominal usual de operação de motores trifásicos (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014), e baixa o suficiente para garantir a forte atenuação das componentes de alta frequência provocadas pelo chaveamento dos IGBT do inversor, sendo de 5kHz na configuração padrão do Inversor da Bancada.

Assim, a carga resistiva foi alterada, introduzindo indutores de 2,5mH que suportam uma corrente máxima de 35A. A Figura 41 mostra a placa de identificação do Indutor e o conjunto montado que forma uma das fases da carga. A Figura 42 mostra o esquemático da carga trifásica LR.

Figura 41 – (a) Placa de identificação do Indutor de potência; (b) Conjunto que forma uma das fases da carga LR trifásica.



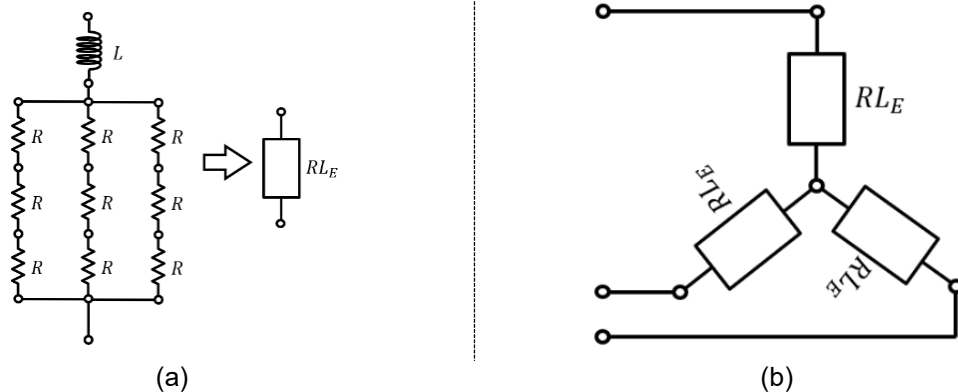
(a)



(b)

Fonte: Fotos do autor.

Figura 42 – (a) Diagrama de ligação dos resistores de potência e do indutor de potência que formam cada uma das fases da carga RL trifásica; (b) Diagrama simplificado da Carga RL Trifásica



Fonte: Autoria própria.

A configuração do indutor com as resistências de cada fase da carga introduz a função de filtro passa-baixa à carga. Através da equação 4 (RASHID, 2014), encontra-se que a frequência de corte f_c do filtro é de aproximadamente 175Hz.

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} = \frac{2,75}{2\pi * (2,5 * 10^{-3})} \cong 175Hz \quad (4)$$

A magnitude da função de transferência do filtro RL pode ser expressa de acordo com a Equação 5 (RASHID, 2014). A partir dela, estimou-se o ganho do circuito para diferentes frequências de interesse, com os resultados exibidos na

Tabela 5. Para as componentes de frequência em 60Hz ou menor há baixa atenuação. Porém, para componentes próximas de 5Khz, frequência de chaveamento dos IGBT do inversor, há forte atenuação.

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/175)^2}} \quad (5)$$

Tabela 5 – Ganho a atenuação para diferentes frequências em um filtro passa-baixa com frequência de corte de 175Hz.

Frequência (f)	Ganho ($ H $)	Ganho (dB)	Atenuação (%)
30 Hz	0,986	-0,12	1,4%
60 Hz	0,946	-0,48	5,4%
5 kHz	0,035	-29,12	96,5%

Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Confirmação da eficácia da correção

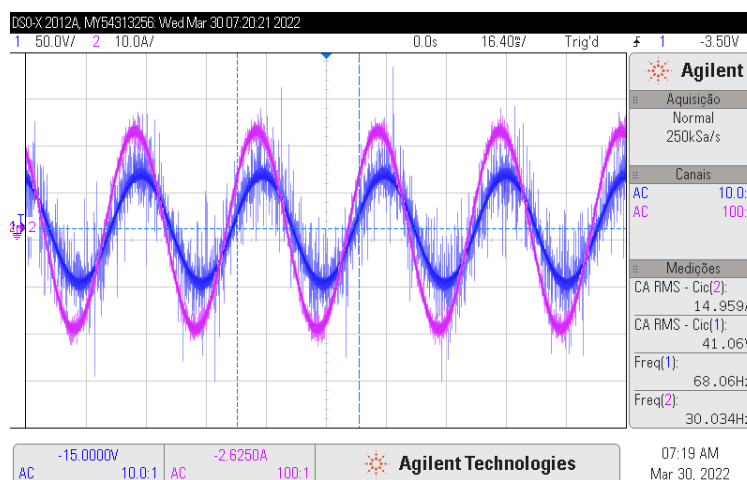
Foi realizado uma nova parametrização para o Inversor, levando em consideração as características da nova carga RL. Os detalhes da parametrização serão elaborados de forma mais detalhada no tópico 6.2.

Utilizando a nova parametrização, a saída do Inversor foi ajustada de forma a obter uma tensão e frequência de saída esperados de 41V e 30Hz, respectivamente. Nesta frequência, a impedância calculada da carga seria de $2,79\Omega$, resultando em uma corrente calculada de 14,7A.

A saída real encontrada, utilizando osciloscópio com garras de tensão e de corrente para realizar as medições na carga, foi de 41.06V e 14,96A, conforme mostrado na Figura 43. Percebe-se que, embora ainda haja certo nível de ruído, ambas formas de onda se aproximam de uma senoide.

Ademais, a tensão e corrente visualizadas na HMI do Inversor passaram a ser as esperadas para a sua configuração ativa junto à nova carga. Também não foram mais constatados as vibração e ruídos anormais com o equipamento em operação.

Figura 43 – Medição de tensão e corrente na carga trifásica RL.



Fonte: Autoria própria.

5.4 Proteção de sobrecarga na ventilação do Motor CC

A ventilação forçada do Motor CC funciona a partir de um motor trifásico de indução, conforme apresentado no tópico 3.3.2.

Conforme o projeto original da Bancada Dinâmica, a ventilação é acionada pela contatora K3, que também é responsável por permitir a alimentação de entrada de campo do Conversor CA/CC.

A ligação da ventilação é feita de forma direta, sem nenhum dispositivo de proteção específico para ela. Com a ausência de proteção contra situações como sobrecarga ou falta de partida por rotor bloqueado, existe o risco de superaquecimento, queima do motor e até incêndio.

Para evitar os riscos apresentados, foi planejado a adição de um dispositivo para realizar a proteção térmica do circuito do motor da ventilação.

5.4.1 Corrente máxima de sobrecarga

A corrente máxima I_{max} admissível que um motor pode operar considerando seu fator de serviço é determinada pelo produto da corrente nominal de operação com o seu Fator de Serviço (F_s) (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

Conforme a placa de identificação do motor da ventilação, exibida previamente na Figura 13, sua corrente nominal I_n em 220V é 0,95A e seu F_s igual a 1,15. Com esses dados é possível achar que I_{max} é 1,1A, conforme a equação 6.

$$\begin{aligned} I_{max} &= I_n * F_s \\ I_{max} &= 0,95A * 1,15 = 1,1A \end{aligned} \tag{6}$$

5.4.2 Instalação de relé de sobrecarga

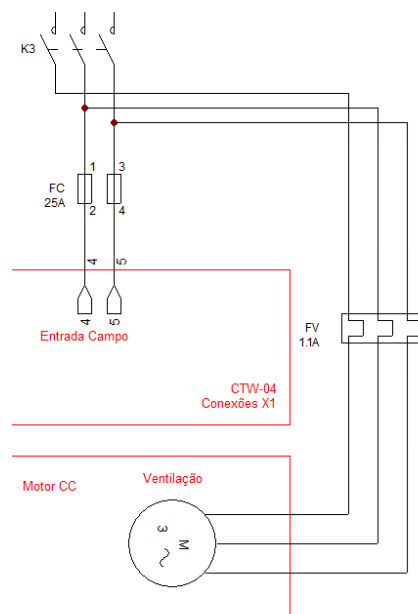
Para realizar a proteção térmica foi introduzido um relé térmico de proteção contra sobrecorrente. O relé térmico modelo SR-225, da fabricante STECK, com faixa de ajuste de 1 a 1,6A foi instalado na saída da contatora K3 em série somente com a alimentação do circuito da ventilação.

Seu seletor de corrente de sobrecarga foi ajustado para a máxima calculada do motor de 1,1A e seu seletor de rearme para o modo manual. A Figura 42 exibe o relé montado à contatora K3 e a sua posição no circuito de força atualizado, onde está identificado como “FV”.

Figura 44 – (a) Foto do relé térmico SR-225 instalado jusante na contatora K3; (b) Relé no Circuito de Força, identificado como FV



(a)

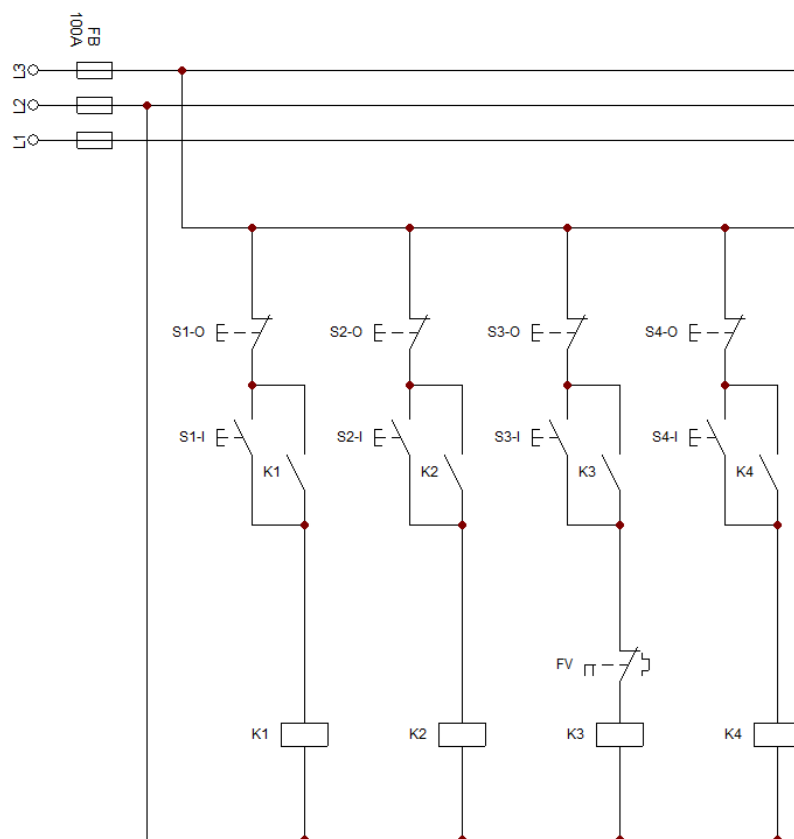


(b)

Fonte: Autoria própria.

Para a atuação da proteção, o contato auxiliar normalmente fechado do relé foi interligado com o selo de ativação da contatora K3, abrindo a contatora e interrompendo a alimentação da ventilação em caso de disparo do relé, conforme mostrado no esquema de ligação exibido na Figura 45.

Figura 45 – Circuito de comando atualizado com o relé FV



Fonte: Autoria própria.

Devido a contatora K3 também fazer parte do circuito que alimenta a entrada de campo do Conversor, a sobrecarga da ventilação provocará a abertura e consequentemente a perda da alimentação de campo do Conversor. A perda de campo provocará o estado de falha F09 no Conversor CA/CC (Falha na Malha da Corrente de Campo), que responderá de forma imediata interrompendo a alimentação da armadura do conversor, permitindo a ele a rotação livre até sua parada completa (WEG, 2006).

5.5 Alteração do circuito de comando do Bloqueio Geral do Conversor CA/CC

O Bloqueio Geral é uma das funções de controle do Conversor CA/CC. Quando ativo, ele impede o acionamento do motor conectado, interrompendo sua alimentação de corrente de armadura e, dependendo da parametrização do Conversor, a corrente de campo. Caso o Conversor esteja acionando o motor no momento que o Bloqueio Geral se torna ativo ele irá primeiro desacelerar o motor de forma controlada até a parada total antes da interrupção de sua alimentação (WEG, 2006).

Assim, a desativação do Bloqueio Geral faz parte da rotina de operação normal do Conversor CA/CC, devendo ele ser intencionalmente desativado sempre que o Motor CC precisar ser acionado.

Conforme sugerido pelo manual do equipamento, o Bloqueio Geral deve ser ativado de forma manual sempre que o Motor não estiver em uso, ou de forma automática na ocorrência de situações anormais, a partir da integração de intertravamentos de proteção ao seu circuito de comando.

O controle do Bloqueio Geral é solicitado ao Conversor definindo o nível da porta XC1:27 de sua eletrônica em “alto”, isso é, recebendo 24Vcc. No projeto original da Bancada Dinâmica o circuito de comando do Bloqueio Geral é comandado de forma direta pela chave de habilitação S4, conforme o diagrama exibido previamente na Figura 25, com a desativação do Bloqueio Geral ocorrendo sempre que a chave está fechada.

Circuitos de intertravamento de proteção podem ser integrados ao circuito de comando para que haja a ativação automática do Bloqueio Geral em resposta a anomalias de operação. Entretanto, o fato da chave S4 ter retenção mecânica pode resultar em uma possível desativação subsequente do Bloqueio Geral de forma automática e inadvertida, resumindo a operação do Motor CC durante possíveis situações de risco. Esse cenário aconteceria caso os intertravamentos de proteção que inicialmente abrem o circuito venham a restabelecer sua condição normal enquanto a chave S4 ainda esteja na posição fechada.

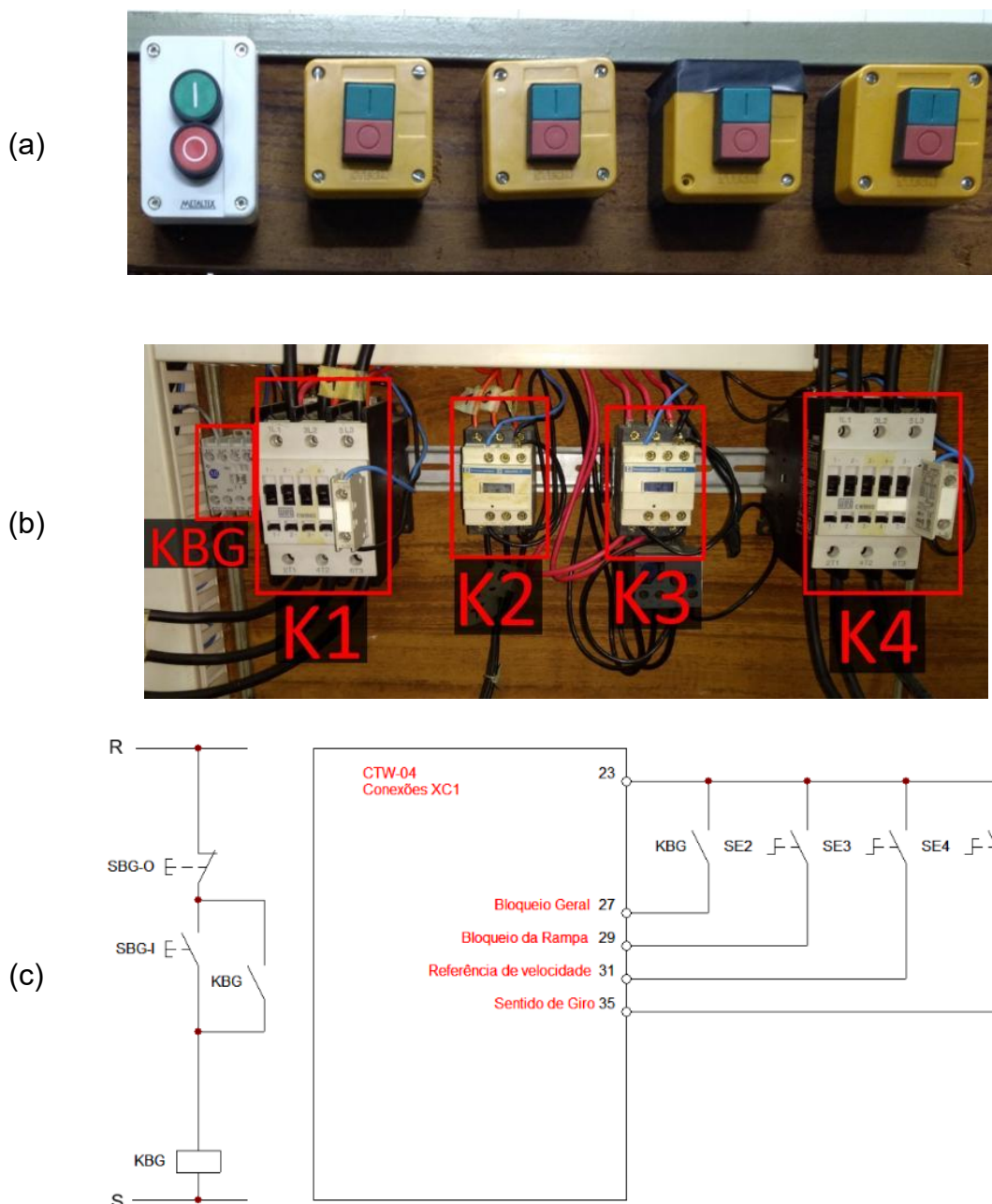
Dessa forma, houve a necessidade de alterar o circuito de controle do Bloqueio Geral de forma que, ao ser aberto ele mantenha este estado de forma indefinida até que haja seu rearmamento manual, impedindo desativações não intencionais do Bloqueio Geral.

5.5.1 Substituição da chave com retenção mecânica por retenção lógica via selo

Para garantir a retenção do estado aberto do circuito de comando do Bloqueio Geral em caso de abertura automática, a chave S4 foi inicialmente desconectada do circuito. Foram instaladas a nova contatora KBG e a botoeira dupla identificada SBG, com esses elementos integrados ao circuito de comando como um selo de retenção, de forma que o Bloqueio Geral seja desabilitado quando o selo for formado.

A Figura 46 exibe o local de instalação da botoeira SBG, da contatora KBG e o diagrama esquemático atualizado do circuito de comando do Bloqueio Geral.

Figura 46 – (a) Botoeira dupla SBG; sendo a primeira das cinco botoeiras; (b) Contatora KBG instalado junto com as demais; (c) Diagrama elétrico atualizado do circuito de comando do Bloqueio Geral .



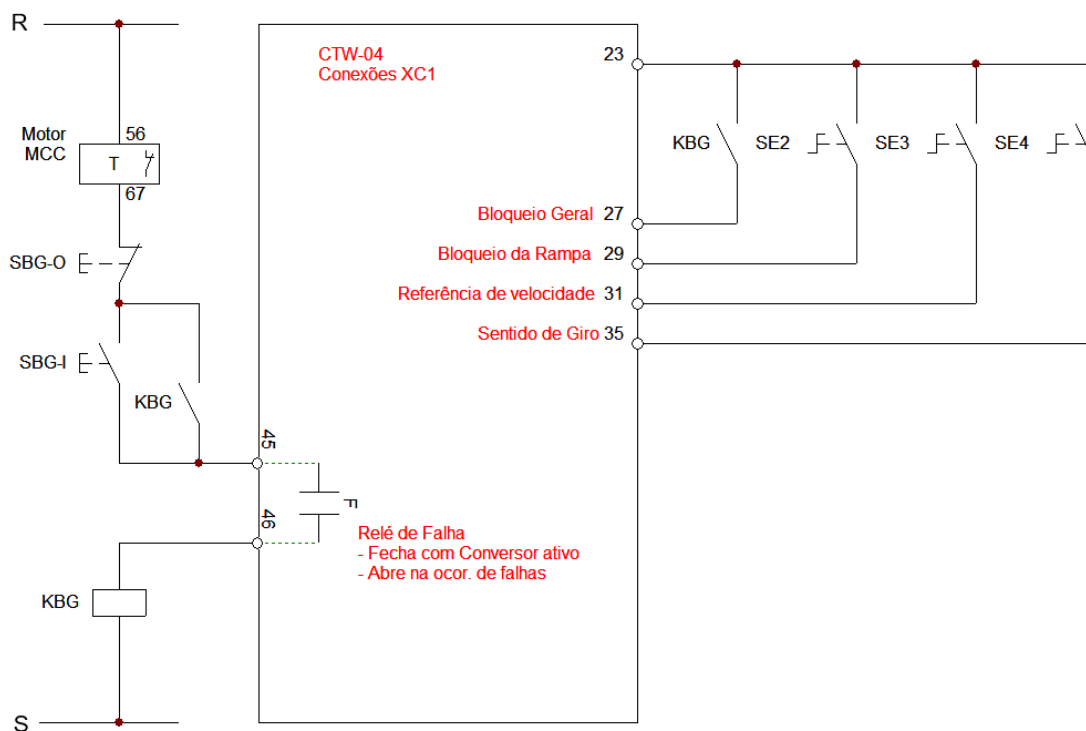
Fonte: Autoria própria.

5.5.2 Integração de intertravamentos de proteção

Com o circuito de comando do BG retendo seu estado em caso de desativação, o que caracteriza a capacidade de memória de falha, tornou-se adequada a integração de intertravamentos de proteção à lógica dele. Assim, conforme e a Figura 47, foram integrados:

- Circuito auxiliar de proteção térmica do Motor CC;
- Relé de Falha (F) do Conversor CA/CC.

Figura 47 – Circuito auxiliar de proteção térmica do Motor CC e RF integrados à lógica de comando de Bloqueio Geral



Fonte: Autoria própria.

5.5.2.1 Circuito auxiliar de proteção térmica do Motor CC

Como verificado previamente no tópico 3.3.1, é um circuito normalmente fechado que abre caso ocorra o estado de superaquecimento do Motor CC.

A integração dessa proteção à lógica de comando do Bloqueio Geral garante a resposta adequada do Conversor em situação de superaquecimento, evitando a operação do Motor CC que estaria em risco de danos permanentes, como: a degradação do isolamento, redução da vida útil e risco de falha grave devido ao calor excessivo (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

5.5.2.2 Relé de falha do Conversor

O Conversor CA/CC entra em estado de falha na ocorrência de certas situações fora da operação normal, como: sobrecarga do motor, rotor bloqueado, subtensão da rede, falta de fase, entre outros (WEG, 2006).

A maioria das falhas resulta diretamente no bloqueio de operação do conversor e a interrupção de alimentação do Motor. Porém, tal bloqueio pode ser temporário devido a possibilidade de certos estados de falha serem encerrados sem intervenção externa, o que poderia resultar no resumo imprevisto da operação do Motor CC dependendo do estado do Bloqueio Geral.

Para que estados de falha resultem, mesmo após sua normalização, em uma parada indefinida até a interação manual do usuário da Bancada, é necessário que elas resultem diretamente na abertura do circuito de comando do Bloqueio Geral, reativando-o.

A ocorrência de falha pode ser detectada externamente pela abertura do Relé de Falhas do Conversor (RF), acessível pelas portas XC1:45 e XC1:46. Este relé é do tipo normalmente aberto, sendo acionado após a inicialização bem-sucedida do equipamento e caso não haja nenhum estado de falha ativo.

Devido ao relé de falha só fechar com o Conversor CA/CC ligado e operando em estado normal, ele também impede a formação do selo do circuito de comando do BG com o conversor desligado.

5.6 Adição de fusíveis de proteção do Circuito de comando

A jusante dos fusíveis gerais F100A é feita a derivação direita da alimentação destinada ao circuito de comando. Este circuito é composto por dispositivos relés, bobinas de contadores e demais elementos de controle, os quais operam com correntes significativamente inferiores às do circuito de força e utilizam condutores de bitola menor.

Embora os fusíveis F100A ofereçam proteção adequada para o circuito de força, sua corrente nominal elevada não garante a proteção efetiva do circuito de comando. Neste ramo derivado do circuito, é possível a ocorrência de uma sobrecorrente suficientemente baixa para não ocasionar a atuação dos fusíveis de 100A, porém alta

o suficiente para danificar equipamentos ou oferecer risco térmico aos condutores presentes.

Diante dessa análise, verificou-se a necessidade da implementação de fusíveis dedicados a proteção do circuito de comando.

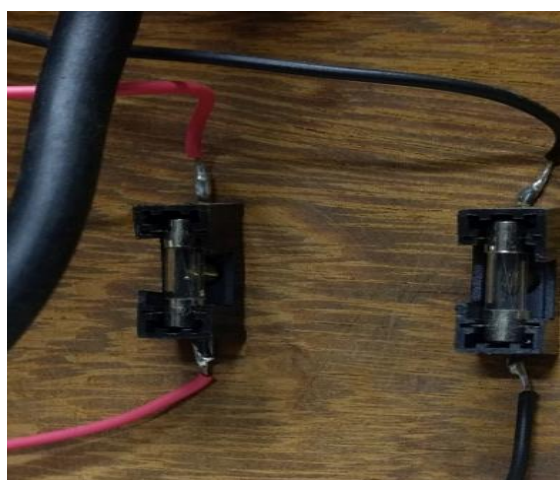
5.6.1 Introdução de fusíveis de proteção do relé de falha do Conversor CA/CC

O relé de falha do Conversor CA/CC, utilizado como intertravamento de proteção do circuito de comando de Bloqueio Geral, tem como corrente máxima suportada de 1A conforme o manual do equipamento (WEG, 2006).

Como esse relé faz parte de um circuito de acionamento de contatora, onde há a ocorrência de correntes de *inrush* ou curto-circuito, constatou-se a necessidade de uma proteção específica para esse relé.

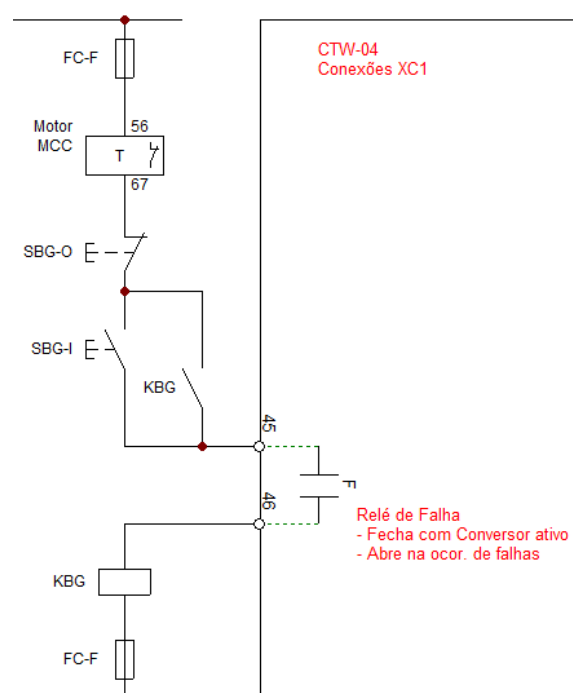
Assim, foram instalados 2 fusíveis de vidro de proteção de 1A de ação rápida, identificados como FC-F, para a proteção do circuito de comando do Bloqueio Geral do qual o relé faz parte. A Figura 48 mostra uma foto dos fusíveis FC-F e diagrama elétrico atualizado do circuito de comando de Bloqueio Geral com a inclusão deles.

Figura 48 – (a) Foto dos fusíveis FC-F; (b) Fusíveis FC-F adicionados ao diagrama elétrico do circuito de comando de comando.



(a)

Fonte: Autoria própria.



(b)

5.6.2 Introdução de fusíveis de proteção geral do circuito de comando

Para realizar a proteção térmica geral dos condutores do circuito de comando foi planejada a adição de fusíveis do tipo Diazed de 4A. Esses tipos de fusíveis são usados com frequência em circuitos de comando por estarem disponíveis em modelos com baixa corrente nominal de atuação, para proteção de condutores de bitolas pequenas, porém terem alta capacidade de interrupção de curto-circuito.

A Figura 49 exhibe um dos fusíveis utilizados e o local de instalação dos porta-fusíveis na Bancada. A Figura 50 contém o diagrama elétrico atualizado com a inclusão dos fusíveis, nomeados como “FCom”.

Figura 49 – (a) Foto do fusível Diazed ao lado da tampa de porta-fusível; (b) Foto do local de instalação dos porta-fusíveis Diazed na Bancada.



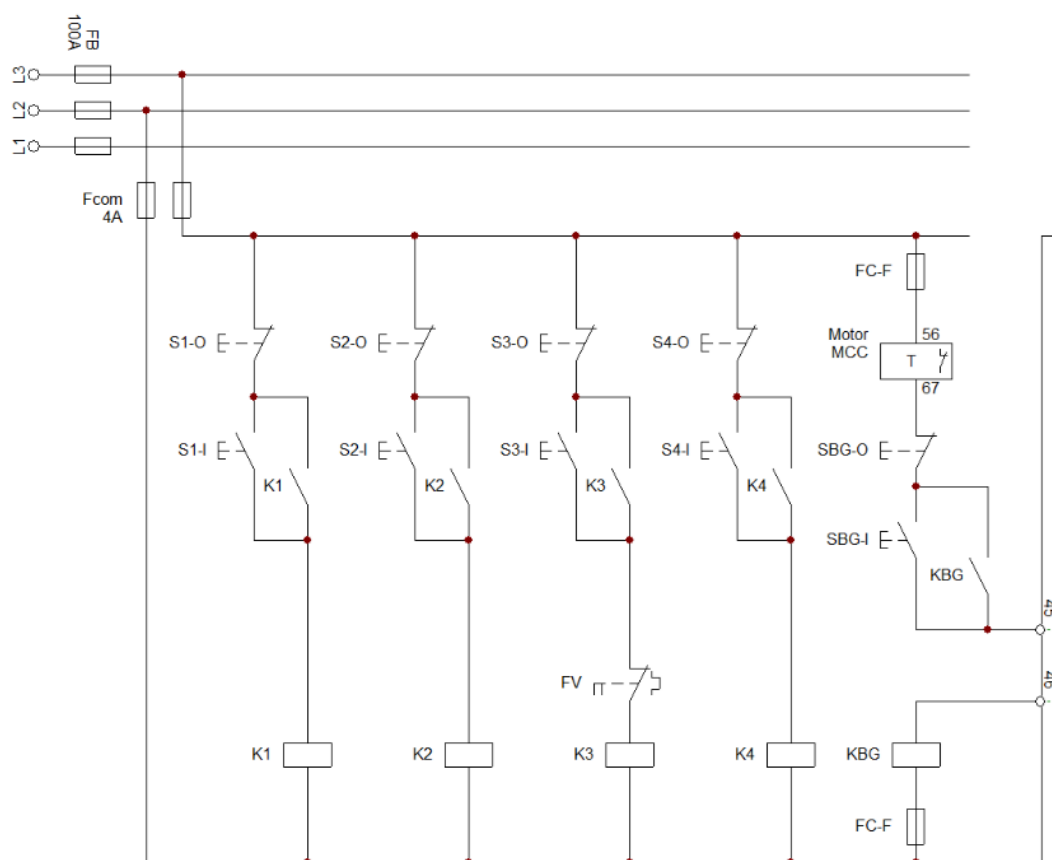
(a)



(b)

Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Fusíveis Diazed Diagrama elétrico do circuito de comando



Fonte: Autoria própria.

5.7 Considerações finais

As alterações realizadas nos circuitos de força e comando, com o objetivo de aumentar a segurança do uso da Bancada Dinâmica, foram consideradas satisfatória, garantindo melhor proteção dos equipamentos, e maior compatibilidade entre o projeto elétrico e as condições de uso experimental.

Por conta das alterações, há a necessidade de atualizar a parametrização do Conversor CA/CC e do Inversor para que se adequem ao projeto atualizado, assim como documentá-lo junto de registros da forma correta de operação da Bancada Dinâmica atualizada, como será visto no próximo capítulo.

6 ATUALIZAÇÃO DA PARAMETRIZAÇÃO E MANUAIS

6.1 Introdução

Devido às mudanças no projeto da Bancada, as parametrizações prévias registradas no trabalho de SOUZA (2007) para o Conversor CA/CC e o Inversor foram consideradas obsoletas, necessitando assim a realização de uma nova parametrização destes equipamentos.

Neste capítulo serão descritas e justificadas as novas parametrizações definidas, comentando os problemas enfrentados e como foram solucionados.

Por fim, será descrita a nova documentação de apoio feita para a Bancada, comentando brevemente seus usos.

6.2 Parametrização do Conversor CA/CC

Para que a tensão e frequência produzidas pelo Gerador se mantenham estáveis, é necessário garantir a sua frequência de rotação nominal de 1800RPM, conforme visto no tópico 3.4. Para isso, foi realizada a parametrização do Conversor CA/CC para o acionamento do Motor CC em modo de controle de velocidade, que atuará para manter fixa a frequência de rotação definida pelo usuário, mesmo diante de mudanças de carga.

6.2.1 Configuração escolhida

6.2.1.1 Controle de velocidade

Das formas de controle de velocidade disponíveis no Conversor, foi escolhida a opção de controle pela medição da Força Contra Eletromotriz (FCEM). Neste modo, o Conversor estima a velocidade do Motor CC a partir da medição da tensão induzida em seus rolamentos que se opõe a tensão principal (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2014).

Sendo um motor de médio porte, foram definidas rampas de aceleração e desaceleração conservadoras de quatro segundos, permitindo partida e mudanças de velocidade suaves, evitando estresse elétrico e mecânico.

A referência de velocidade, isto é, a forma de se definir a velocidade desejada de acionamento do Motor, foi definida para controle direto por sua HMI, através de parâmetros que podem ser ajustados antes ou durante o acionamento do Motor.

Por fim, caso a velocidade definida para o Motor CC seja tão baixa a ponto de ser considerada nula, foi definido que o Conversor não atue para manter o eixo do Motor CC parado, permitindo sua rotação livre.

6.2.1.2 Controle da alimentação armadura e campo

A tensão e corrente máximas de armadura do Motor CC são de 260Vcc e 64A, respectivamente. Entretanto, devido ao modelo específico do Conversor e por ser do tipo antiparalelo, a tensão e corrente máximas de alimentação 230Vcc e 63A, respectivamente. Assim, foi ajustado a tensão máxima de armadura para o máximo suportado de 230Vcc.

A alimentação de corrente de campo do motor será realizada diretamente pelo conversor, ao invés de depender de uma alimentação externa. Embora a corrente nominal de campo do Motor CC seja de 19A, o conversor tem como corrente máxima de alimentação de campo 18A.

Foi definida a interrupção completa da corrente de campo caso o Bloqueio Geral esteja ativo. Importante salientar que a interrupção não ocorre de forma imediata caso o Motor CC esteja em acionamento no momento da ativação do Bloqueio Geral. Nessa situação, primeiro ocorrerá a parada controlada do motor seguindo a rampa de desaceleração, somente interrompendo a alimentação de campo quando a parada total for confirmada.

6.2.2 Listagem dos parâmetros

A Tabela 6 lista os números dos parâmetros e os valores a serem ajustados, baseados na configuração descrita no tópico anterior.

Tabela 6 – Parâmetros básicos da configuração definida do CTW-04

PARÂMETRO	EFEITO PARA O VALOR DEFINIDO
P002 = 0 Controle da corrente de Campo	Controle de campo feito pelo Conversor.
P007 = 0 Controle de Torque	Regulador de velocidade ativo.
P009 = 4 Tempo da Rampa de Desaceleração	A rampa de desaceleração está ativa e pode ser ajustada por P033.
P015 = 0 Bloqueio por Velocidade Nula (Lógica de Parada)	O Inversor deixará o rotor girar livremente se a referência de velocidade for considerada “nula”.
P024 = 4 Seleção da Referência de Velocidade	A Referência de Velocidade é ajustada diretamente pela HMI do Inversor, a partir do ajuste dos parâmetros P056 e P057.
P025 = 0 Seleção da Realimentação de Velocidade	Realimentação de velocidade por FCEM.
P027 = 2 Seleção da Corrente Nominal de Armadura	Corrente nominal de armadura do motor definida como 63A.
P032 = 4 Tempo de aceleração	Define o tempo total da rampa de aceleração como sendo de 4 segundos.
P033 = 4 Tempo de desaceleração	Define o tempo total da rampa de desaceleração como sendo de 4 segundos.
P056 = 0 Referência de Velocidade (via teclas)	Define a referência de velocidade desejada para o motor como sendo de 0%. Esse parâmetro vai de 0 a 100%, mudando com passo de 0,1%
P057 = 0 Referência de Velocidade (via teclas)	Define a referência de velocidade desejada para o motor como sendo de 0%. Esse parâmetro varia de 0 a 100%, mudando com passo de 1%
P060 = 18 (Corrente Nominal)	Corrente nominal de campo definida para 18A.
P100 = 0 (Corrente de economia)	Corrente de campo será de 0A quando o Bloqueio Geral está ativo.

Fonte: Elaborado pelo autor com base em WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

6.2.3 Otimização dos reguladores

Para a finalização da parametrização do Conversor CA/CC, foi realizado a otimização de seus reguladores. As instruções do processo são condicionadas à parametrização básica realizada anteriormente, mas sempre envolvem 4 etapas, sendo elas: ajuste do regulador de corrente; ajuste do regulador de velocidade, ajuste do regulador da corrente de campo e ajuste do regulador da FCEM.

A realização das etapas envolve a alteração de parâmetros específicos de regulação, seguidos de testes de habilitação do Conversor acionando o Motor CC. Em uma das etapas foi realizado o ajuste da tensão de saída máxima, equivalente a 100% da referência de velocidade, de forma que ela equivalesse à velocidade de 1800RPM.

Durante os acionamentos, deve-se verificar a forma de onda nos pontos de interesse indicados pelo manual, o que foi feito utilizando um osciloscópio. As formas de onda obtidas durante o teste são comparadas com as ideais ilustradas no manual, devendo-se ajustar os reguladores e repetir os testes até que a forma de onda obtida seja o mais próximo possível da esperada.

Ao fim da otimização dos reguladores o Conversor é considerado pronto para uso ótimo.

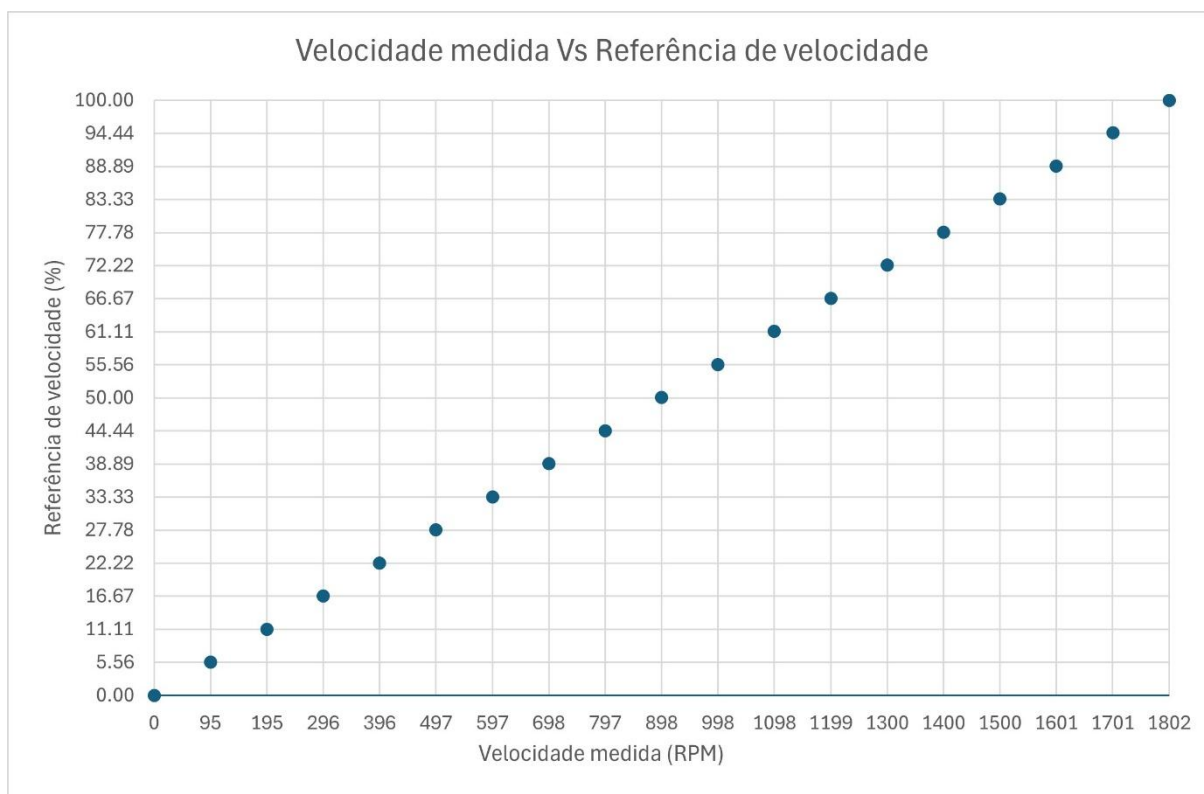
6.2.4 Confirmação do controle de velocidade

Com o conversor devidamente parametrizado, foi realizado um teste de acionamento para confirmar a frequência de rotação real do Motor CC, quando comparado à referência de velocidade escolhida.

Assim, foi feito o acionamento do Motor CC com ele considerado “à vazio”, sendo este estado considerado no contexto da Bancada Dinâmica como o acionamento do Motor CC acoplado ao Gerador, porém com este não alimentando nenhuma carga elétrica. A velocidade desejada foi definida através do ajuste dos parâmetros P056 e P057, os quais equivalem à porcentagem da velocidade desejada, sendo 100% equivalente a 1800RPM.

A referência de velocidade foi variada em intervalos de 5,56%, referente a variações de 100RPM. Com o auxílio de um tacômetro à *laser*, foi medida a velocidade real do Motor CC. O gráfico da Figura 51 exibe um gráfico comparativo entre a velocidade real medida e a esperada.

Figura 51 – Velocidade medida Vs Velocidade esperada.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que embora em baixas frequências há diferenças de até 5 RPM entre o real e o esperado, as medições a partir de 497 RPM tem diferenças menores, de 3 RPM ou menos.

Após a parametrização do Inversor ser atualizada, como será visto no tópico 6.3, foi realizado o teste de controle de velocidade com variação de carga. Neste teste, foi constatado que a frequência de rotação do Motor caiu de 1802 RPM para 1770 RPM entre as situações sem e com carga máxima.

Após a revisão do manual do Conversor, verificou-se a necessidade de ajuste de P031 (Compensação da Resistência de Armadura), utilizado para corrigir o sinal de FCEM quando o motor está submetido à carga máxima. Foi realizado o ajuste deste parâmetro até que a velocidade real do Motor chegasse à 1800 RPM na situação de carga máxima, e após a remoção da carga confirmou-se que a velocidade se mantinha em 1802 RPM.

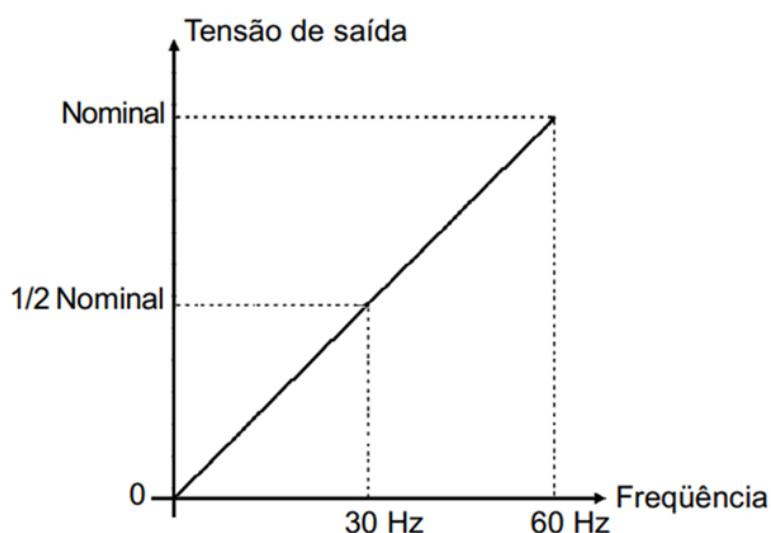
6.3 Parametrização do Inversor

Devido o Inversor estar alimentando uma carga RL trifásica, fora do seu uso convencional, foi realizado o ajuste de seus parâmetros para obter uma configuração que permita o controle linear de sua potência elétrica de saída.

6.3.1 Ajuste da curva V/F

O controle do Motor trifásico pelo Inversor é feito a partir do controle V/F, no qual a velocidade do motor acionado é controlada a partir do ajuste de sua tensão e frequência de alimentação, seguindo uma curva denominada Curva V/F, exemplificada na Figura 52.

Figura 52 – Gráfico Tensão x Frequência padrão do Inversor



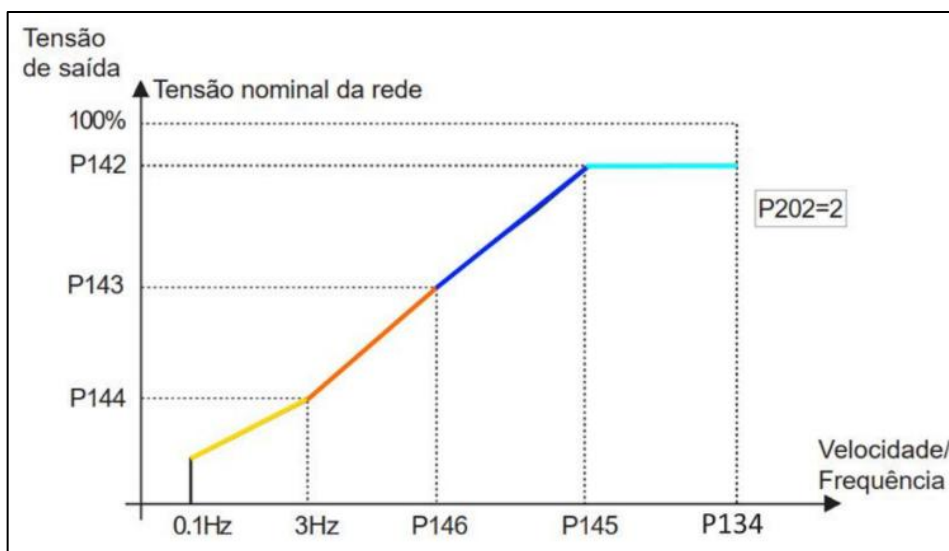
Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

Assim, a principal forma do controle da saída do Inversor se dá pelo ajuste, em RPM, da velocidade desejada de acionamento, com um aumento do ajuste de velocidade resultando no aumento da tensão e frequência de saída. Por conta da natureza da curva V/F do Inversor, não é possível realizar uma mudança linear de tensão sem haver junto uma mudança de frequência

Devido a carga RL apresentar características indutivas, a mudança de frequência de sua alimentação pelo Inversor resulta em uma mudança na impedância da carga, dificultando o controle da potência elétrica de saída.

Embora não seja possível o controle individual da tensão separado da frequência, uma das funcionalidades oferecidas pelo Inversor é a personalização da curva V/F, ativada ao ajustar P202 (Modo de Operação) para "2". A Figura 53 mostra a curva e seus parâmetros, com a descrição detalhada deles na Tabela 7.

Figura 53 - Curva V/F Ajustável e seus parâmetros.



Fonte: LOPES (2021, p. 51).

Tabela 7 – Parâmetros utilizados para personalização da Curva V/F Personalizada

Parâmetro	Informação adicional
P134 Referência de velocidade máxima	A velocidade máxima permitida, em RPM, de acionamento do motor
P142 Tensão de saída máxima	% da tensão de saída máxima com relação a tensão nominal de alimentação do Inversor
P143 Tensão de Saída Intermediária	Correlacionado com P146
P144 Tensão de Saída em 3Hz	Tensão de saída em 3Hz
P145 Velocidade de Enfraquecimento de Campo	Velocidade na qual o Inversor mantém a tensão de saída constante e passa a aumentar somente a frequência (aceleração por enfraquecimento de campo).
P146 Velocidade Intermediária	Correlacionada com P143

Fonte: Elaborado pelo autor com base em WEG (2011).

A partir do ajuste da curva V/F personalizada, é possível criar um intervalo de velocidade em que haja grande variação na tensão de saída com mínima variação de frequência.

Visto que, quanto maior a frequência maior a impedância, decidiu-se que a curva V/F seria manipulada de forma a manter uma frequência quase fixa em 30Hz. Nesta frequência, o nível de atenuação esperado da saída do Inversor é de aproximadamente -1,4%, como consta na Tabela 5. Embora fosse possível escolher uma região em torno de uma frequência menor, testes realizados com frequências mais baixas resultavam em maior ruído na forma de onda de tensão e corrente de saída do Inversor, assim foi mantido a zona em torno da frequência de 30Hz.

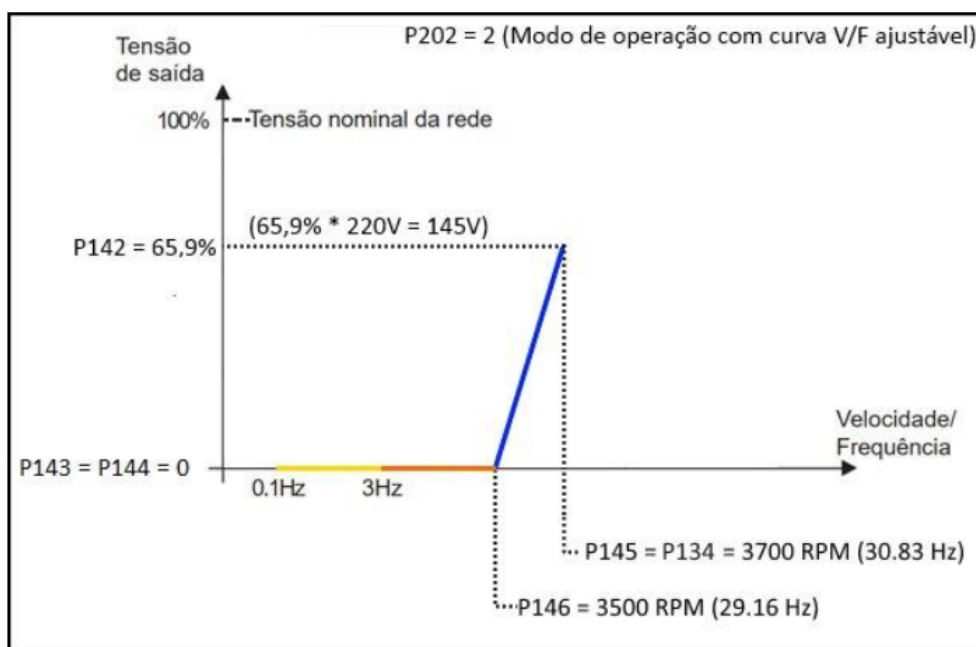
Para esta frequência, a impedância de uma das fases da Carga RL Trifásica equivale a 2,79 Ω . Devido as borneiras dos resistores só suportarem até aproximadamente 30A, para esta corrente a tensão de fase da Carga RL Trifásica em estrela precisa ser no máximo de 83,7V, o que equivale à uma tensão de linha de aproximadamente 145V.

Para fazer com que uma variação unitária de velocidade resultasse na menor variação possível de frequência, o inversor foi parametrizado como se estivesse acionando um motor com a maior frequência de rotação nominal para 60Hz, que seria

um motor de 7200RPM. Dessa forma, a variação de 1 RPM na velocidade de acionamento do inversor seria o equivalente a 0,0083Hz.

Foi então definida a Curva V/F personalizada conforme demonstrado na Figura 54, onde a região efetiva de controle da tensão de saída do Inversor é a região de 3500 a 3700RPM. Nesse intervalo, a frequência varia de 29,17Hz no ponto mínimo até 30,83Hz em seu ponto máxima, representando uma variação total de somente 1,66Hz. Em contrapartida, a tensão de linha varia de 0 até 145V.

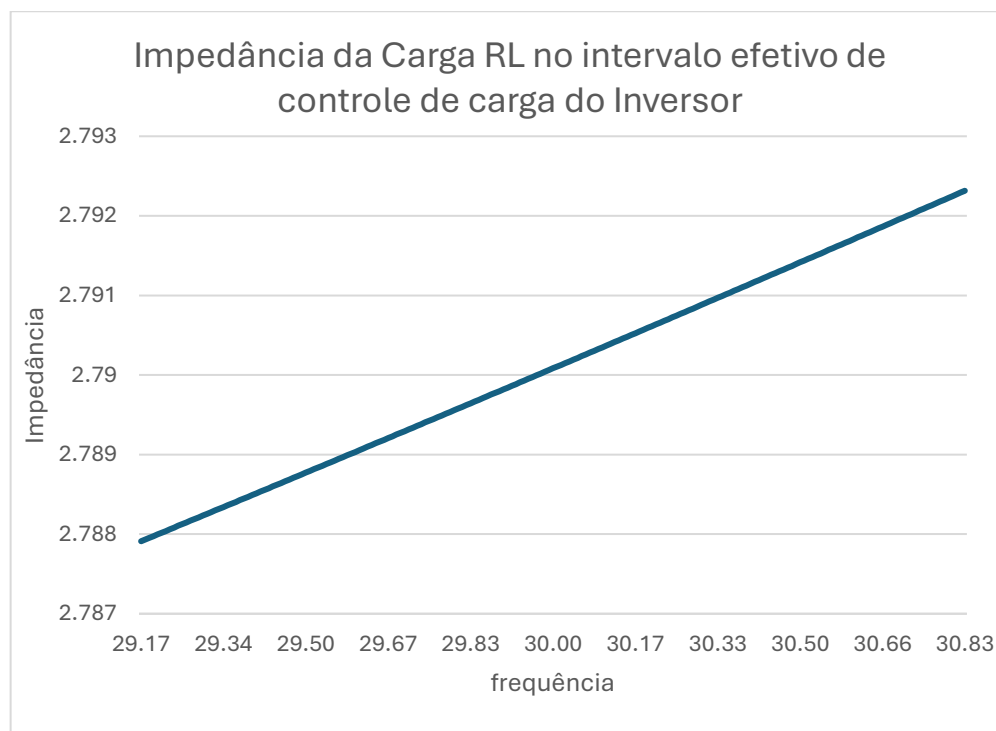
Figura 54 – Curva V/F "Customizada".



Fonte: LOPES (2021).

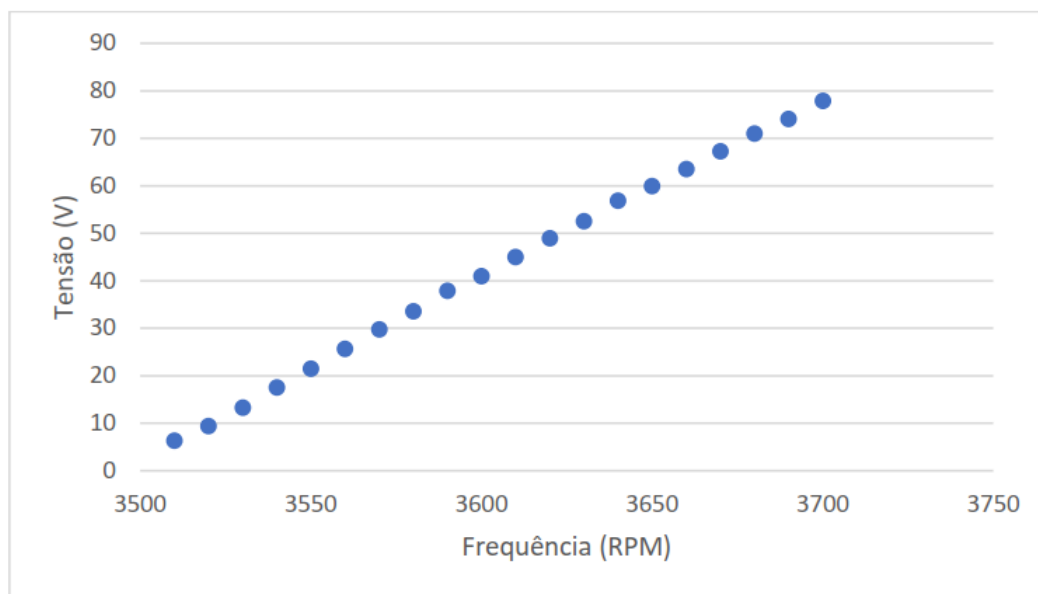
Neste intervalo, tem-se que os valores da impedância total da Carga RL varia de 2,788 a 2,792 Ω , sendo esta diferença de 0,004 Ω suficientemente baixa para que seja considerada desprezível. Assim, pode-se considerar que dentro da faixa efetiva de controle de carga do Inversor, cada fase da Carga RL tem impedância fixa de 2,79 Ω .

Figura 55 – Impedância da carga RL na faixa de operação de interesse da curva V/F personalizada.

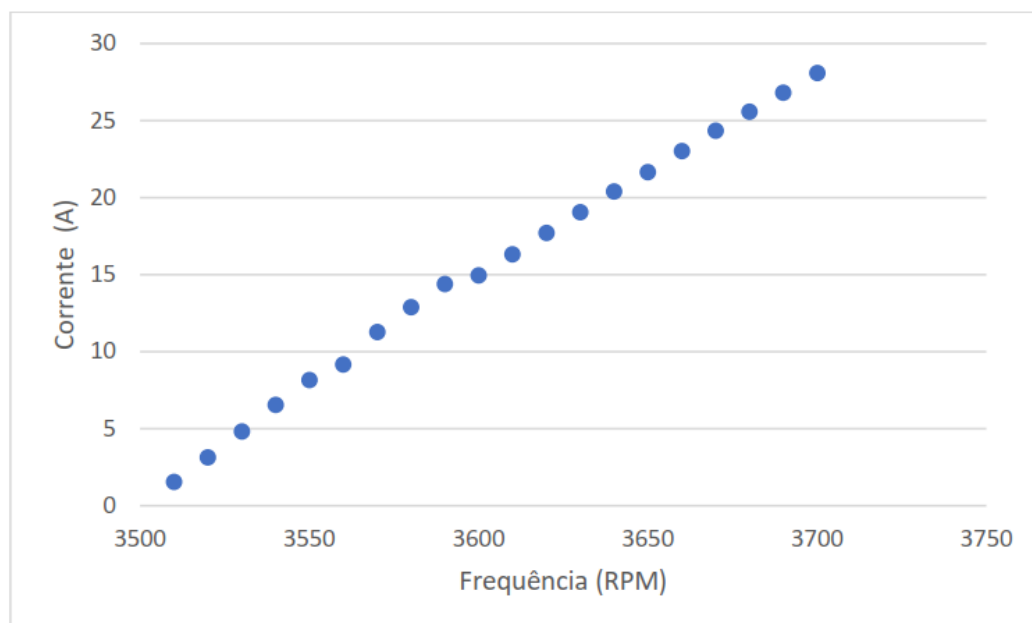


Fonte: Autoria própria.

LOPES (2024) analisou a emulação de carga utilizando o Inversor na configuração apresentada, obtendo dados em testes onde a velocidade de referência do Inversor foi ajustada em intervalos de 10 em 10RPM. Foi obtido que a tensão e a corrente de saída variaram de forma praticamente linear, conforme exibido nos gráficos nas figuras 56 e 57, referente aos valores medidos em uma das fases da Carga RL. Dessa forma, percebe-se a efetividade da parametrização definida no controle linear da potência de saída do Inversor.

Figura 56 – Gráfico tensão de saída x frequência, na fase R

Fonte: LOPES (2021).

Figura 57 – Gráfico corrente de saída x frequência, na fase R

Fonte: LOPES (2021).

6.3.2 Ajuste da rampa de aceleração

Embora a carga RL trifásica seja estática e possa responder de forma quase instantânea a mudanças realizadas pelo Inversor, mudanças na potência demandada precisam ser respondidas pelo Gerador. O aumento do torque resistente do gerador

causa uma mudança na carga mecânica que precisa de tempo para ser compensada pelo conjunto Conversor CA/CC-Motor CC.

O aumento rápido da potência demandada pelo Inversor pode resultar em uma perda significativa de velocidade de rotação do conjunto Motor CC-Gerador, ao ponto de que o Gerador não consiga manter seu nível de tensão nominal. Conseqüentemente, falhando em entregar a potência exigida pelo Inversor.

Esta situação pode provocar estados de erro “EXX” no Inversor, como os de “Subtensão/Falta de fase na alimentação” (E02) e de “Subtensão no Link CC” (E03) (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011). A ocorrência desses erros causa o bloqueio de operação do Inversor, resultando em um efeito cascata: ocorre a interrupção da energização de saída do Inversor, havendo perda quase total da carga elétrica frente ao Gerador, que diminui bruscamente a carga mecânica frente ao eixo do Motor. Dessa forma, é de vital importância que a rapidez máxima de variação de carga realizada pelo Inversor seja compatível com o tempo de resposta do conjunto Motor CC-Gerador.

Deseja-se que o menor tempo de variação entre o ajuste de carga mínima e carga máxima do conjunto Inversor-Carga RL Trifásica seja de 2 segundos, equivalente à metade da rampa de aceleração configurada no Conversor CA/CC, conforme visto no tópico 6.2.

No Inversor, o tempo de aceleração define quanto tempo se leva para variar a velocidade de referência do mínimo até a velocidade máxima. Se a referência de velocidade já estiver acima do mínimo, o tempo de aceleração será proporcional à diferença. No caso da desaceleração, o comportamento é o inverso, reduzindo a velocidade de forma proporcional até o mínimo.

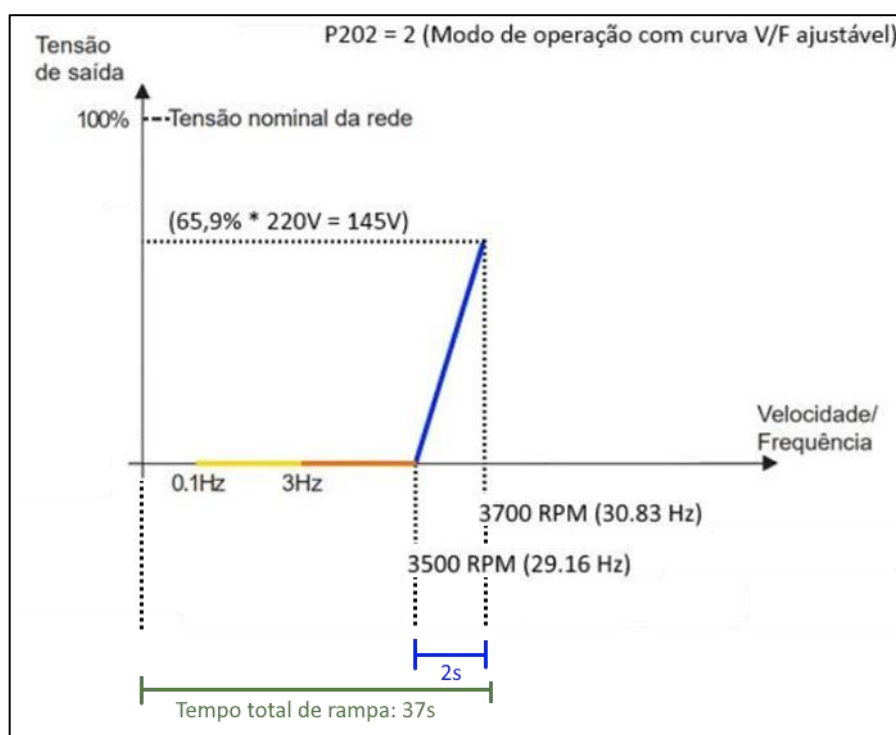
Estes ajustes da rampa de aceleração e da rampa de desaceleração são realizados, respectivamente, através dos parâmetros P100 (Tempo de aceleração) e P101 (Tempo de desaceleração), sendo estes tempos considerando o intervalo entre 0RPM e a velocidade máxima definida pelo parâmetro P134, igual a 3700RPM na configuração ativa da curva V/F personalizada.

É importante levar em consideração que o trecho de velocidade efetivo no controle da tensão de saída do Inversor é o destacado em azul na curva V/F

personalizada, como mostrado previamente na Figura 54, referente ao intervalo de 3500 a 3700RPM.

Assim, para se obter que uma mudança de velocidade entre 3500 e 3700RPM demore 2s, é necessário configurar rampas no intervalo total de 0 a 3700RPM que tenham o tempo de aceleração e desaceleração igual a 37s, conforme ilustrado na Figura 58.

Figura 58 – Indicação do tempo de rampa total e efetivo.



Fonte: Feito com base em LOPES (2021).

Após a realização dos ajustes, foi realizado um teste onde o Inversor, inicialmente energizado, mas desabilitado, teve sua referência de velocidade ajustada para 3700RPM, equivalente ao ponto onde a carga elétrica resultante é máxima.

O Inversor foi então habilitado, resultando em sua referência de velocidade efetiva gradualmente subindo de 0 até 3700RPM em um intervalo de 37 segundos. Nos primeiros 35 segundos, a tensão de saída do Inversor foi mantida em 0V conforme a Curva V/F personalizada. Após a referência de velocidade efetiva do equipamento chegar em 3500RPM, a tensão de saída do equipamento começou a aumentar de forma linear, chegando ao seu ponto máximo em 2s, momento em que a velocidade de referência efetiva alcançou a referência de velocidade ajustada. No intervalo em

que houve um aumento efetivo da carga elétrica não foram percebidas desacelerações significativas do conjunto Motor CC-Gerador, comprovando a eficácia da configuração aplicada.

6.4 Produção material de apoio e POPs de uso

Como forma de registro do projeto atualizado e da forma adequada de operação da Bancada Dinâmica, foram produzidos materiais de apoio, dos quais serão feitos uma breve descrição de seus usos nesta seção e que também estarão disponíveis como adendos deste trabalho.

6.4.1 Referência Descritiva

Incluso como Apêndice A, é um material listando, ilustrando e descrevendo todos os elementos que compõem os sistemas de simulação de Carga e simulação de geração da Bancada Dinâmica.

Nele, é feito a descrição das características técnicas de todos os equipamentos de potência. Os elementos de acionamento são identificados por nome, mostrados por meio de fotos, ilustrados por esquemas, e tem suas funções descritas de forma clara e objetiva.

Presentes neste material também estão os circuitos de força e comando atualizados.

Seu objetivo é ser um documento de referência geral da Bancada Dinâmica, e servindo de apoio a todos os demais POPs.

6.4.2 Procedimento Operacional da Parametrização do Conversor CA/CC

O objetivo deste POP, descrito no Apêndice B, é realizar a parametrização adequada do Conversor CA/CC para o acionamento do Motor CC em modo de controle de velocidade, mantendo velocidade definida mesmo diante de variação de carga.

Engloba as etapas que se iniciam na energização do conversor, sua parametrização inicial, o acionamento de teste do moto, a parametrização de regulação dos reguladores do conversor, o teste de velocidade à vazio e o ajuste de compensação de velocidade quando o motor está sujeito à carga nominal.

Este POP é, principalmente, uma adaptação das instruções presentes no manual do Conversor CA/CC, de forma a obter um passo-a-passo específico para

6.4.3 Procedimento Operacional do Controle de Velocidade do Motor CC

POP para a partida e controle de velocidade do Motor CC de 20 a 2500RPM, nos sentidos de rotação horário e anti-horário. O ajuste de velocidade é feito através do ajuste do parâmetro de referência de velocidade do Conversor CA/CC por meio das teclas de sua HMI. Está descrito no Apêndice C.

6.4.4 Procedimento Operacional da Parametrização do Inversor

POP, descrito no Apêndice D, para a parametrização do Inversor de forma a obter o controle linear da sua potência de saída em conjunto com a Carga RL trifásica.

Inicia na confirmação de tensão e frequência na saída do Gerador, que já deve estar em sua velocidade nominal de 1800RPM. Prossegue para a energização do inversor e da parametrização apropriada para a alimentação da Carga RL Trifásica.

6.4.5 Procedimento Operacional para Controle da Carga do Gerador

POP para a operação do Inversor de forma a obter o controle linear da carga mecânica variável sendo acionada pelo Motor CC.

Inicia na confirmação de tensão e frequência na saída do Gerador, que já deve estar em sua velocidade nominal de 1800RPM. Prossegue para o controle da potência elétrica dissipada pelo Inversor, de forma a aumentar a potência elétrica demandada ao Gerador, resultando no aumento em seu torque eletromagnético resistente,

6.5 Considerações finais

Pela nova parametrização do Conversor CA/CC, se tornou possível o controle preciso da velocidade de acionamento do Motor CC, mantendo a velocidade definida mesmo diante de variações de carga, conforme comprovado experimentalmente. Já pela parametrização atualizada do Inversor foi obtido o controle linear de sua potência elétrica de saída, o que também resulta na capacidade de controle linear de carga.

Como registro do resultado de todas as alterações realizadas no projeto da Bancada Dinâmica e também como guia para o uso adequado da mesma, foram produzidos materiais de apoio e POPs que permitem a padronização de seu uso, facilitando futuras intervenções, manutenções e aplicações experimentais.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como temática principal uma Bancada Dinâmica de Simulação de Geração que foi desenvolvida a partir de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. Dessa forma, inicialmente houve um levantamento e estudo do material associado à bancada, por meio do qual constatou-se que ela estava parcialmente montada, instalada em uma nova organização da qual não havia registros com relação às alterações em relação aos diagramas elétricos originais, sendo necessária uma recomposição.

Posteriormente, foi realizada a inspeção física dos principais equipamentos de potência, assim como os demais elementos associados ao seu sistema de acionamento e proteção, observando-se que todos estavam aptos para operação.

Além de deixar a bancada dinâmica novamente operacional, algumas alterações foram realizadas com o objetivo de tornar sua utilização mais segura para o usuário. Adicionalmente, equipamentos de proteção, como fusíveis para o circuito de comando e relé térmico de sobrecarga, foram adicionados, aumentando o nível de proteção dos equipamentos que compõem a bancada.

A transformação da carga resistiva trifásica em carga RL trifásica tornou-a mais adequada para uso com o inversor, resultando na filtragem das componentes de alta frequência presentes na tensão de saída, aproximando sua utilização das condições usuais de operação do equipamento.

Para se adequar às mudanças, houve necessidade de novas parametrizações, do Conversor CA/CC e do Inversor, configurando o conversor para o controle de velocidade mesmo com variação de carga, e o inversor para o controle linear de sua potência de saída.

Para documentar as mudanças e registrar os procedimentos corretos de uso da bancada, foi elaborado material de apoio atualizado da bancada dinâmica, visando ser referência central para o melhor entendimento de futuros usuários. Dos documentos produzidos, constam a referência descritiva que identifica os elementos da bancada, além de quatro procedimentos de operação. Assim, espera-se que, com os resultados deste trabalho, o conhecimento sobre a bancada e suas funcionalidades seja facilmente alcançado.

7.1 Trabalhos Futuros

Com a Bancada Dinâmica novamente operacional, se criou uma base para o desenvolvimento de novos estudos e experimentos. A partir desta estrutura, são sugeridos como possíveis trabalhos futuros os itens apresentados a seguir:

- **Recomposição do sistema de monitoramento da Bancada Dinâmica:** realizar a recomposição do sistema de monitoramento, reinstalando os sensores e tornando novamente operacional o sistema supervisorio, de forma a viabilizar estudos de diagnóstico, análise das grandezas elétricas e mecânicas associadas a operação da Bancada Dinâmica como vibração, temperatura, corrente e tensão, assim como estudos de manutenção preditiva.
- **Análise do comportamento transitório do Gerador sob variações de carga:** realizar estudo da resposta dinâmica do conjunto motor-gerador frente a variações de carga elétrica, analisando o comportamento do conjunto quanto a estabilidade, variações de tensão e frequência, com possível modelagem matemática e validação experimental.
- **Implementação de sistema de comando baseado em Controlador Lógico Programável:** realizar a reimplementação do circuito de comando com base em um Controlador Lógico Programável (CLP), incorporando intertravamentos lógicos, diagnósticos de falhas e possibilidade de integração com sistema supervisorio.
- **Determinação experimental das capacidades de torque do Motor CC:** levantar a curva característica torque-velocidade do motor, avaliando limites operacionais, capacidade de sobrecarga e comportamento térmico sob diferentes condições de carga.

REFERÊNCIAS

BORGES, Aldo Nonato. **Caracterização de escovas de grafite e avaliação do seu desempenho em função da microestrutura**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/items/83651055-9937-4c16-9e04-b55fba3bca80>. Acesso em: 10 jan. 2026.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2014.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2024**. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>. Acesso em: 28 jan. 2026.

JESUS, Keliene Maria Sousa de. **Relatório de procedimentos de desmontagem, montagem e troca dos rolamentos do gerador**. Relatório técnico interno. 23 f. Belém: Universidade Federal do Pará, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Grupo de Vibrações e Acústica, fev. 2007.

LOPES, Marcos Andrey da Silva. **Emulação de geração para geração usando inversor**. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Industrial) – Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.

SOUZA, Vitor H. P. de S. **Projeto e implementação de uma bancada de máquinas elétricas rotativas para monitoração da geração e diagnóstico**. 2007. 247 f. Trabalho de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

TEIXEIRA, Weldon Carlos Elias; VIEIRA JR., Petrônio; BARATA, Letícia Cristina da Silva. **Bancada dinâmica para supervisão e controle de geração de energia elétrica – uma interação entre a graduação e a pós-graduação**. In: XL

CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA (COBENGE), 2012, Belém. Anais [...]. Belém: COBENGE, 2012.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Manual do conversor CA/CC, série CTW-04: software versão 1.1x**. 0899.5126 P-4. [S.I.]: WEG Equipamentos Elétricos S.A., mar. 2006.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. **Manual do inversor de frequência: série CFW-09, software versão 4.4X**. 0899.5298/13. [S.I.]: WEG Equipamentos Elétricos S.A., fev. 2011. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h62/hdf/WEG-CFW09-user-manual-0899.5298-en-es-pt-de-fr-ru-nl-sv.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2025.

WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS. **Manual de instalação e manutenção – geradores síncronos – linha G**. 9300.0014 P/6. [S.I.]: WEG Indústrias S.A. – Máquinas, out. 2005.

WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS. **Manual de instalação e manutenção – motores corrente contínua**. 9300.0001 P/2. [S.I.]: WEG Indústrias S.A. – Máquinas, 2013.

APÊNDICE A**REFERÊNCIA DESCRITIVA**

APLICAÇÃO: Bancada Dinâmica de Simulação de Geração

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

REVISÃO: 0

ELABORADO POR: Ygor Pereira Vaz

REVISADO POR:

APROVADO POR:

DATA DE APROVAÇÃO:

A.1 OBJETIVO

Este material tem como objetivo apresentar a referência descritiva da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração instalada no Laboratório de Eletrônica de Potência (LabEP), detalhando seus principais equipamentos, componentes, ligações e características operacionais.

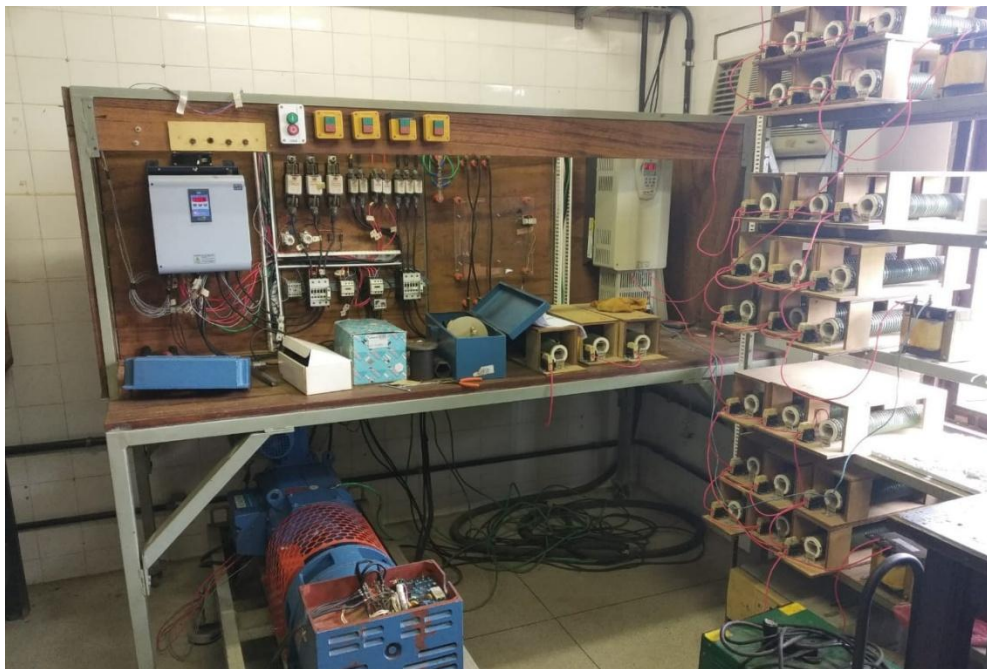
Este material também serve como base de auxílio para a compreensão e execução dos Procedimentos Operacionais Padrão (POPs) associados à bancada.

A.2 VISÃO GERAL DA BANCADA DINÂMICA

No que se refere aos principais equipamentos de potência, a Bancada Dinâmica, exibida na Figura 59, é composta por:

- Conversor CA/CC (Conversor CA/CC);
- Motor de corrente contínua (Motor CC);
- Gerador síncrono trifásico CA (Gerador);
- Inversor de frequência (Inversor CA/CA);
- Carga RL Trifásica.

Figura 59 – Visão geral da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

No que se refere ao fluxo de energia eletromecânica da Bancada Dinâmica, a energia elétrica é inicialmente fornecida ao sistema por meio da alimentação do conversor CA/CC, o qual realiza o acionamento do Motor CC, convertendo a energia elétrica em energia mecânica na forma de torque e velocidade angular do eixo.

Acoplado ao eixo do Motor CC está o Gerador, que converte a energia mecânica fornecida a ele em energia elétrica para a alimentação do Inversor. Enquanto a energia elétrica fornecida pelo gerador é usualmente constante quando em regime permanente, o inversor permite a conversão dela em energia elétrica de tensão e frequência variável em sua saída, sendo esta saída variável utilizada para alimentar uma Carga RL Trifásica equilibrada em configuração estrela. Embora a Carga RL Trifásica seja uma carga elétrica estática, por meio do controle do inversor é possível ajustar a quantidade de potência elétrica inserida nela, com o conjunto Inversor-Carga RL Trifásica podendo então atuar como uma carga elétrica variável.

Quanto maior for a dissipação de energia elétrica na carga elétrica, maior será a potência mecânica exigida pelo gerador para manter sua tensão de saída nominal, com todo esse conjunto gerador-inversor-banco de resistências agindo como uma carga mecânica variável para o Motor CC.

Dessa forma, variações na potência elétrica consumida na carga ao final do sistema, por meio do controle do inversor, podem provocar respostas dinâmicas em todo o conjunto eletromecânico. Variações na potência elétrica inserida na Carga RL Trifásica implicam diretamente em variações da potência mecânica exigida pelo gerador, refletindo-se no torque requerido no eixo e, conseqüentemente, na potência fornecida pelo Motor CC, sendo essas mudanças de demanda atendidas de forma automática ou manual pelo conversor CA/CC.

A.2.1 Aplicações experimentais

A.2.1.1 Simulação de geração

É caracterizada pelo conjunto Motor CC-Gerador-Inversor sendo utilizado na reprodução controlada de diferentes condições de geração.

O motor atua como uma fonte de energia primária, representando a ação de uma correnteza fluvial ou de ventos, fornecendo potência mecânica ao eixo do gerador. O

gerador, por sua vez, converte essa potência mecânica em energia elétrica, operando com tensão e frequência fixas em regime de funcionamento nominal.

A energia elétrica então é condicionada pelo inversor, possibilitando sua conversão para diferentes níveis de tensão e frequência, sendo sua saída definida, neste contexto, como o ponto de entrega do sistema.

Dos ensaios que podem ser realizados destacam-se dois:

- Ensaio de resposta do Gerador no decorrer de mudanças de demanda de energia elétrica do sistema;
- Ensaio de déficit de potência mecânica, ou seja, o estudo do comportamento do sistema quando a demanda de potência elétrica é maior do que a potência mecânica necessária no eixo do gerador para atendê-la.

Os ensaios possibilitados pela simulação de geração permitem o estudo do comportamento do Gerador e da rede elétrica simulada frente à diversos cenários reais emulados.

A.2.1.2 Simulação de carga

O conjunto Inversor-Banco de resistores emula uma carga elétrica variável frente ao gerador. Isso se dá pois, embora a carga resistiva alimentada pelo Inversor seja estática, o Inversor permite o controle da tensão e frequência aplicadas à ela. Dessa forma, a demanda de potência elétrica que o inversor exige do gerador pode ser ajustada.

O conjunto gerador-inversor-Carga RL Trifásica se comporta como uma carga mecânica variável em relação ao eixo do Motor CC: variações na potência elétrica demandada pelo Inversor tem como resposta um aumento no torque eletromagnético resistente no eixo do Gerador, requerendo assim um aumento do torque que o Motor CC deve fornecer para manter a velocidade nominal do Gerador.

As variações na carga mecânica aplicadas ao eixo do Motor CC podem ser utilizadas em ensaios com o Motor CC atuando com Velocidade Constante ou com Torque Constante, verificando assim o comportamento do sistema em diversos pontos

de operação. As variações de carga elétrica no gerador podem ser utilizadas para estudar a resposta do fornecimento de energia do Gerador ao Inversor.

A.3 MÁQUINAS ROTATIVAS

A.3.1 Motor CC

Motor CC, modelo DNF 132 130 S da WEG, exibido na Figura 60 e com sua placa de identificação na Figura 61. Por ser um motor de excitação independente, a alimentação das bobinas de campo e armadura é feita de forma individual, permitindo assim um controle preciso dos campos magnéticos gerados, e conseqüentemente um controle preciso do torque e da velocidade dependentes da relação de interação entre ambos os campos magnéticos.

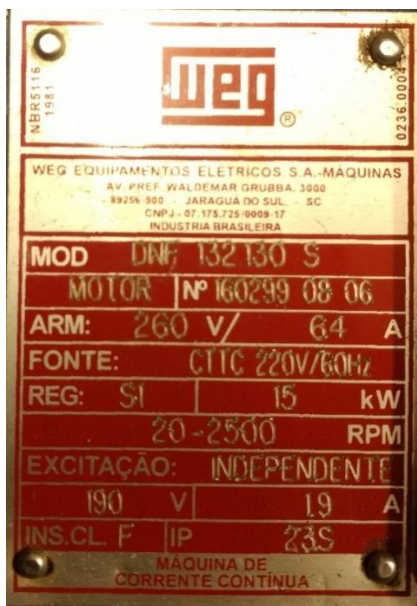
Seu acionamento é feito por meio do Conversor CA/CC e seus bornes de conexão estão ilustrados na Figura 62.

Figura 60 – Visão lateral do Motor CC.



Fonte: Foto do autor.

Figura 61 – placa de identificação do Motor.



Fonte: Foto do autor.

Figura 62 – conexões de força do Motor.



Fonte: Foto do autor.

A.3.1.1 Sistema de ventilação forçada

O Motor CC tem ventilação do tipo independente, com suas especificações mostradas na Figura 63.

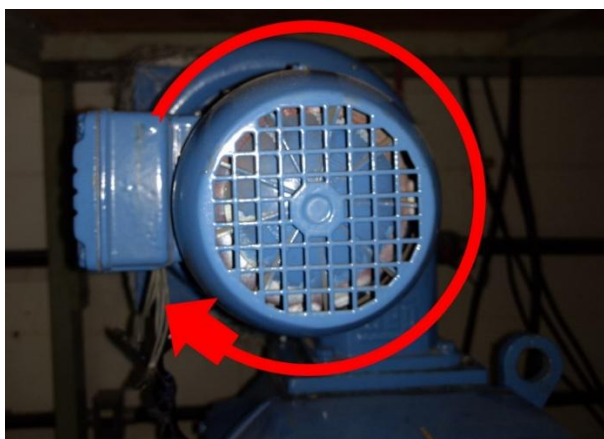
O sentido de giro correto do ventilador está indicado na Figura 64. Ligar o ventilador com sua rotação invertida fará com que o resfriamento do motor não seja feito de forma adequada.

Figura 63 – placa de identificação do Ventilador do Motor CC



Fonte: Foto do autor.

Figura 64 – Foto com indicação do sentido de giro correto do ventilador.



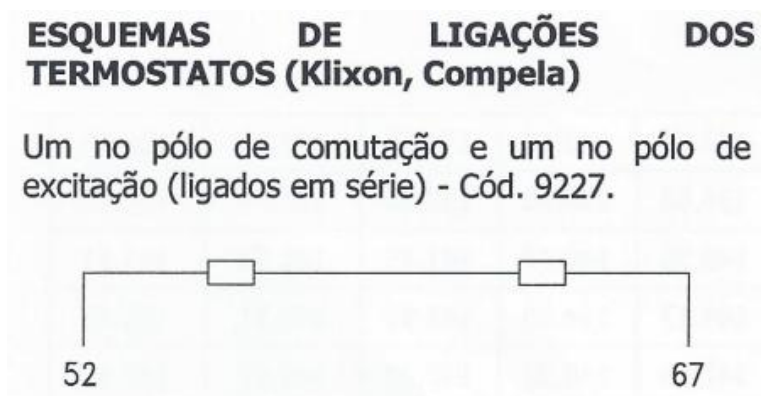
Fonte: Elaborada pelo autor.

A.3.1.2 Circuito auxiliar de proteção térmica

O Motor tem contatos bimetálicos internos que abrem em condições de superaquecimento. Tais contatos estão ligados internamente em série, com os pontos de conexão do circuito acessíveis pelos bornes 52 e 57, sendo estes conectados junto

ao circuito de comando de forma a reativar o Bloqueio Geral caso ocorra uma sobrecarga prolongada

Figura 65 – Esquema de ligação dos termostatos do Motor CC



Fonte: adaptado de WEG INDÚSTRIAS S.A. – MÁQUINAS, 2013.

A.3.2 Gerador

Consiste em um gerador elétrico síncrono trifásico de 4 polos, classe de isolamento H, fator de potência de 0.8, baixa tensão, 60Hz 1800rpm, 21kVA (16,8kW) para ligação de 220 – 240 V. Uma foto do Gerador é exibida na Figura 66.

Figura 66 — Gerador da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

A Figura 67 ilustra a placa de identificação do Gerador. Nela pode-se observar que seu modelo específico é o GTA 160 SI 13, com parte de suas características elétricas e mecânicas podendo ser interpretadas de acordo com a Tabela 8.

Figura 67 — Placa de identificação do Gerador



Fonte: Foto do autor.

Tabela 8 — Descrição das características do Gerador conforme sua nomenclatura.

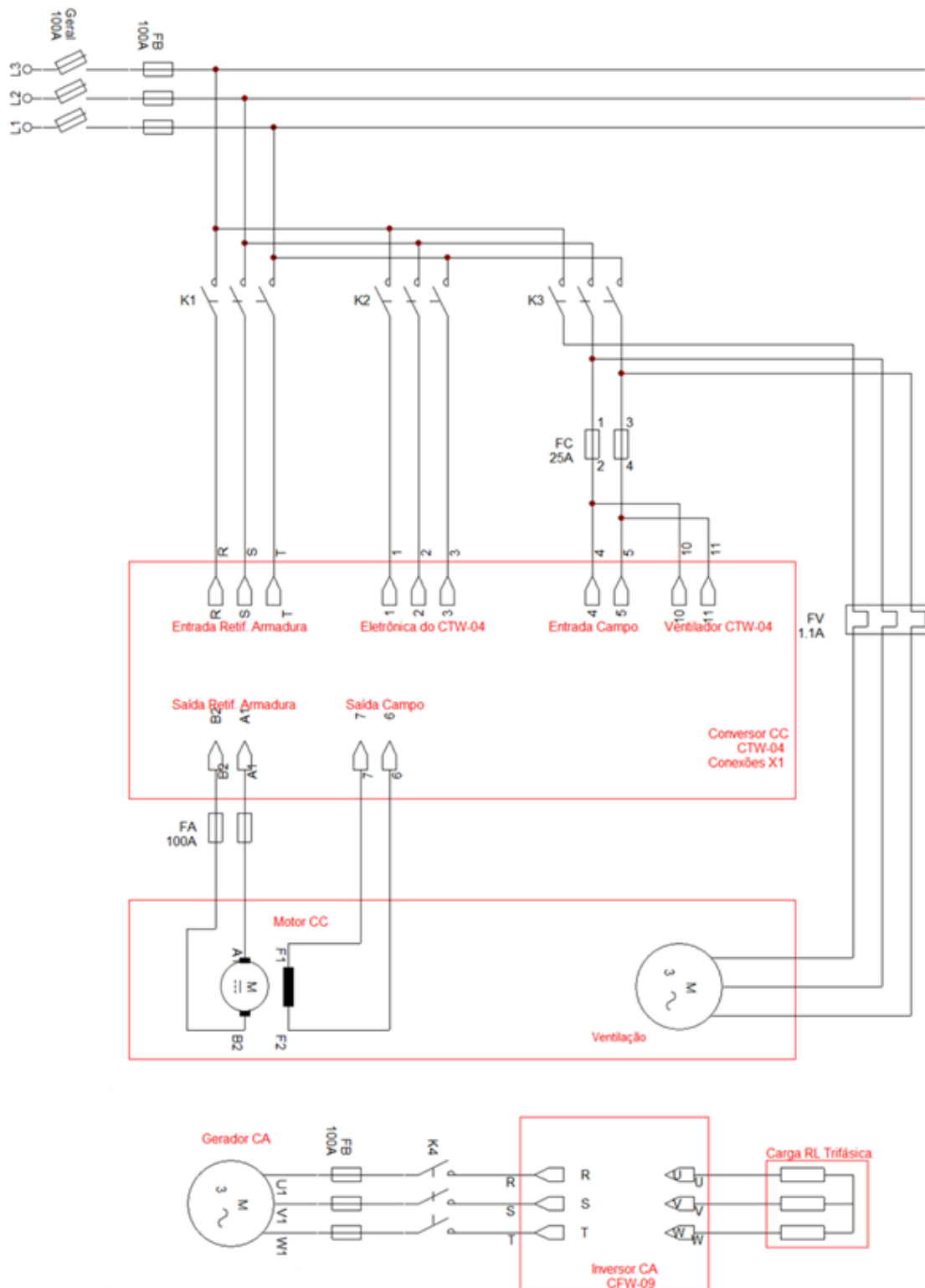
GERADOR WEG MODELO GTA160SI130						
Tipo de Máquina	Característica	Tipo de Refrigeração	Carcaça – IEC	Comprimento da Carcaça	Aplicação	Código Complementar
G	T	A	160	S	I	13
Tipo de Máquina: <u>G</u> T A 1 6 0 S I 1 3						
G – Máquina Síncrona – Linha G						
Característica: G <u>T</u> A 1 6 0 S I 1 3						
T – Gerador Brushless com bobina auxiliar		P – Gerador Brushless com excitatriz auxiliar		S – Gerador Brushless sem bobina auxiliar e sem excitatriz auxiliar		
Tipo de Refrigeração: G T <u>A</u> 1 6 0 S I 1 3						
A – Aberto auto-ventilação			F – Fechado com trocador de calor ar-ar			
Carcaça: IEC: G T A <u>160</u> S I 1 3						
160 mm						
Comprimento da Carcaça: G T A 1 6 0 <u>S</u> I 1 3						
S, M, L, A, B, C, D, E, F						
Aplicação: G T A 1 6 0 S <u>I</u> 1 3						
I – Industrial	M - Marinizado	T – Telecomunicações		N – Naval	E - Especial	
Código Complementar: G T A 1 6 0 S I <u>13</u>						
Código referente à potência do gerador						

Fonte: Adaptada de SOUZA (2007).

A.4 DIAGRAMAS ELÉTRICOS

A.4.1 Circuito de força

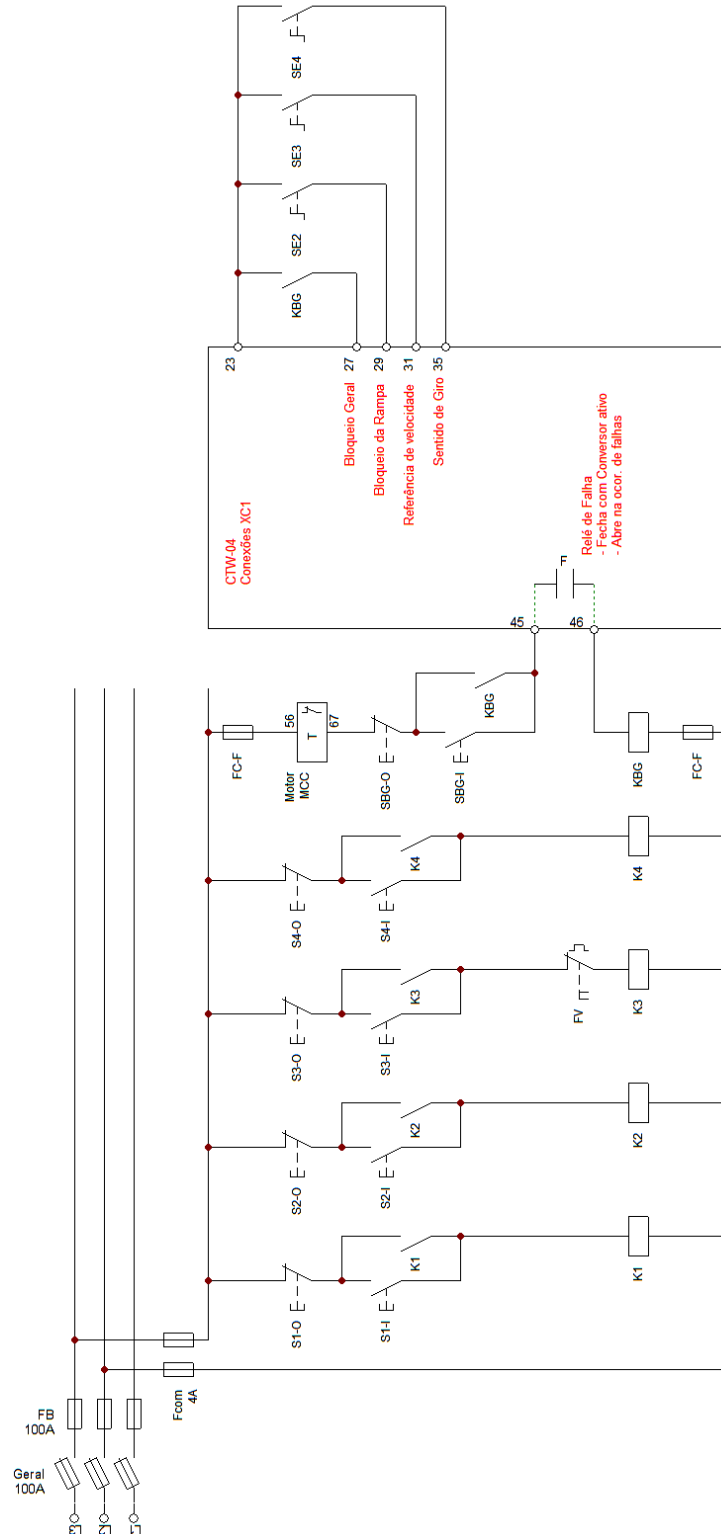
Figura 68 – Circuito de força da Bancada Dinâmica.



Fonte: Autoria própria.

A.4.2 Circuito de Comando

Figura 69 – Circuito de comando da Bancada Dinâmica



Fonte: Autoria própria.

A.5 EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA

A.5.1 Conversor CA/CC

Conversor do tipo CA/CC de uso em acionamento de motores de corrente contínua, sendo usado na Bancada Dinâmica para o acionamento do Motor CC.

Figura 70 — Conversor CA/CC da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do auto.

Na etiqueta de identificação do equipamento, exibida na Figura 71, consta que o modelo específico do Conversor CA/CC é o CTWA40090T22PESZ. As nomenclaturas e características específicas do modelo desse conversor podem ser interpretadas de acordo com a Tabela 9.

Figura 71 — Etiqueta de identificação do Conversor CA/CC da Bancada Dinâmica



Fonte: Foto do autor.

Tabela 9 — Descrição das características do Conversor CA/CC conforme o código de Identificação

CTW A 4 0090 T 22 P E S Z	
CTW	Conversor CA/CC WEG
A	Antiparalelo: pode operar nos 4 quadrantes do plano de tensão-corrente (V x I)
4	Série 4
0090	Corrente nominal de saída de armadura de 90 A
T	Alimentação de entrada trifásica
22	Tensão de alimentação da armadura em 220 Vac
P	Idioma do manual em português
E	“ <i>Empty</i> ”. Versão simplificada do cartão de controle (sem <i>encoder</i> incremental e entrada e saída de 12 bits)
S	“ <i>Standard</i> ”. Versão básica do conversor, sem recursos opcionais
Z	Dígito Indicador de final decodificação

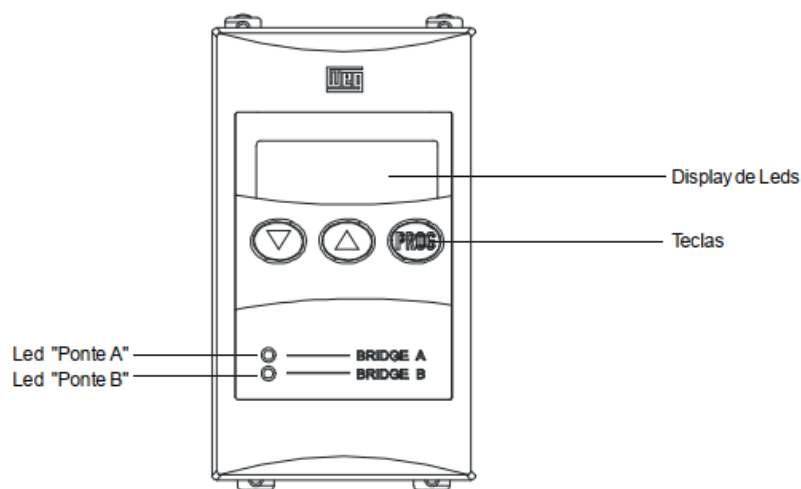
Fonte: Elaborado pelo autor, com base em 0899.5126 P-4: Manual do Conversor CA/CC, Série CTW-04, Software: versão 1.1x (WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A, 2006).

Sendo do tipo antiparalelo, o Conversor CA/CC pode operar nos 4 quadrantes do plano tensão-corrente (V x I), permitindo tanto a retificação com correntes positivas ou negativas quanto a inversão de potência, ou seja, a transferência de potência do lado CC para CA que geralmente ocorre durante a frenagem do Motor.

A.5.2 HMI do Conversor




A interface Homem-Máquina (HMI) presente na parte frontal do Conversor, ilustrada na Figura 72, 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 72 – Localização do display, leds e teclas da HMI



Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

Figura 73 – Funções básicas das teclas presentes na 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.

Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

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 ▲/▼ 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 ▲/▼. Depois que o valor numérico tenha sido ajustado deve-se utilizar a tecla **PROG** para voltar a seleção de parâmetros.

A.5.2.1 Abertura e Fechamento da tampa do Conversor

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

Figura 74 – Tampa do conversor.



Fonte: Foto do autor.

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 75.

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

Figura 75 – Fotos e indicações do processo de abertura da tampa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A.5.2.2 Cartão CCW4 do Conversor

Placa eletrônica interna do Conversor, conforme a Figura 76. É necessário que a tampa do conversor seja aberta para se obter acesso ao Cartão CCW4. Não se deve interagir diretamente com a placa sem equipamentos de proteção, mesmo com o Conversor desenergizado, e quando a interação for necessária ela deve ser executada com o máximo de cuidado devido aos riscos de choque elétrico e possíveis danos à placa.

Figura 76 – Foto do Cartão CCW4.

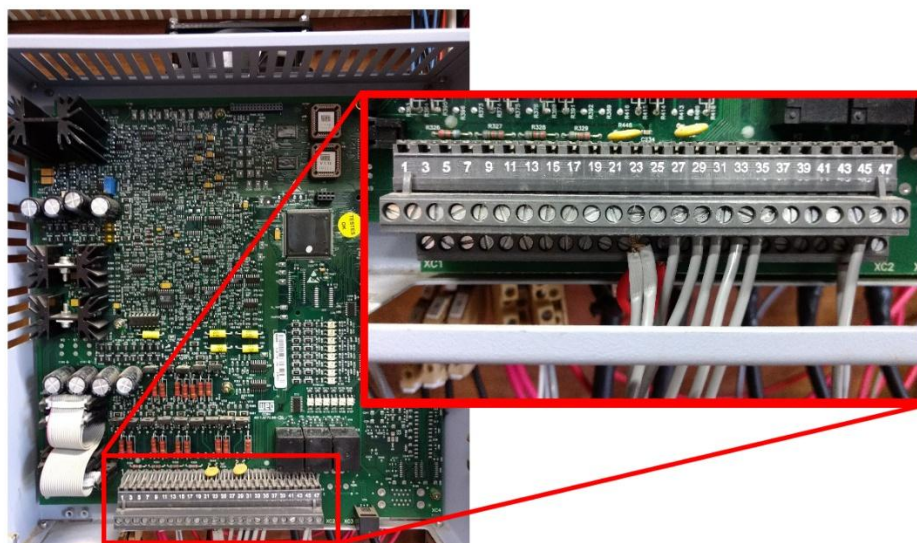


Fonte: Foto do autor.

A.5.2.3 Portas XC1 do Conversor - Conexões de Sinal e Controle

As portas XC1 ficam na parte inferior do Cartão CCW4, conforme o mostrado na Figura 77.

Figura 77 – Portas XC1 do Conversor CA/CC.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A.5.2.4 Portas X1 do Conversor - Conexões de Potência

As portas X1 ficam na parte inferior do Conversor atrás do Cartão CCW4 e das portas XC1, conforme o mostrado na Figura 78.

Figura 78 – Portas X1 do Conversor CA/CC



Fonte: Foto do autor.

A.5.3 Inversor CFW-09

O Inversor CFW09 da Bancada Dinâmica, apresentado na Figura 79, é um inversor de frequência do tipo CA/CA, fornecendo uma tensão de saída de amplitude e frequência controlável a partir de uma alimentação de tensão e frequência fixa. Embora sua aplicação usual para o acionamento de motores trifásicos, seu uso na

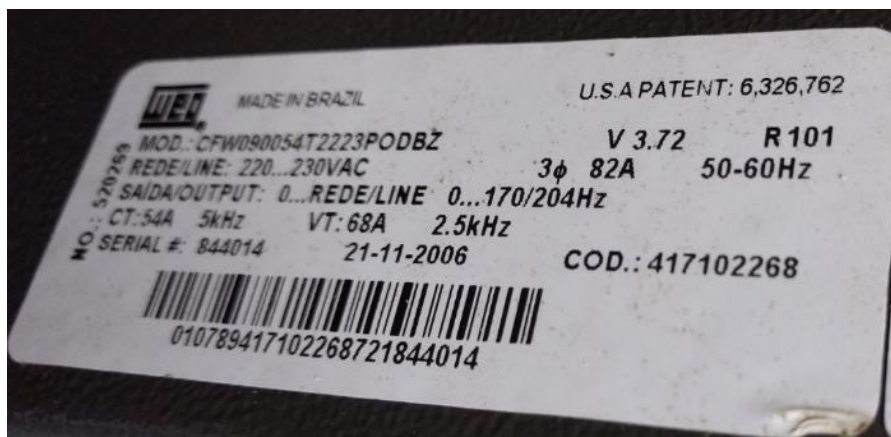
Bancada é para a alimentação de uma carga resistiva trifásica, onde juntos atuam como o sistema de simulação de carga.

Figura 79 – Inversor.



Fonte: Foto do autor.

A Figura 50 exibe a etiqueta de identificação do Inversor, constando nela que ele é de modelo específico CFW090054T2223PODBZ. As nomenclaturas e características específicas do modelo desse Inversor podem ser interpretadas de acordo com a Tabela 10.

Figura 80 – Etiqueta de identificação do Inversor da Bancada Dinâmica

Fonte: Foto do autor.

Tabela 10 — Descrição das características do Inversor conforme o código de Identificação

CFW09 0054 T 2223 P O DB Z	
CFW09	Inversor de Frequência WEG Série 09
T	T = Alimentação trifásica de entrada
0054	Corrente nominal de saída para torque constante (CT): 0054 = 54A (PARA EQUIPAMENTOS EM 220-230V)
2223	Tensão de alimentação de entrada: 2223 = 220 a 230V
P	Idioma do manual: P = PORTUGUÊS
O	Opcionais: O = Com opcionais
DB	Recurso opcional de frenagem: DB = Frenagem Reostática
Z	Dígito Indicador de final decodificação

Fonte: Elaborado pelo autor, com base WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

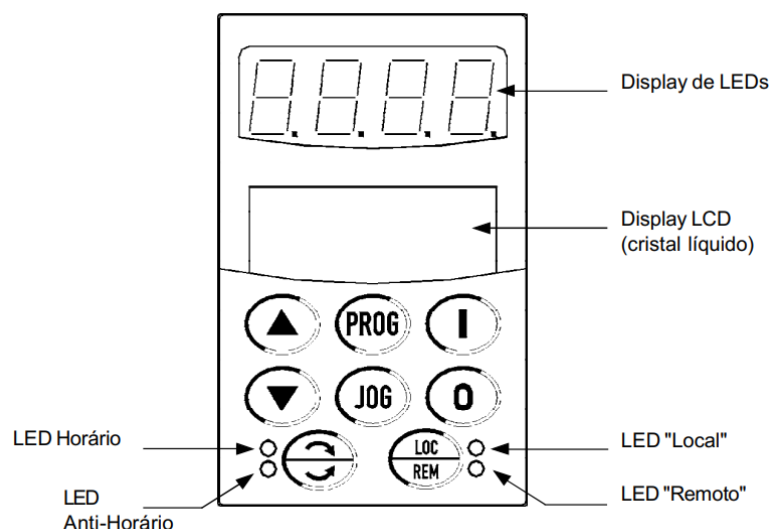
O modelo utilizado na Bancada tem a capacidade de ser utilizado tanto em modo de torque constante ("CT", Constant Torque) quanto em modo de torque variável ("VT", Variable Torque). Em modo CT o torque proporcionado pelo inversor ao motor em um determinado ponto de velocidade de operação desejado é constante mesmo que ele seja inferior ao necessário para manter essa velocidade, enquanto em modo VT o Inversor ajusta o torque fornecido ao Motor de acordo com a necessidade, podendo fornecer correntes maiores por curtos períodos para compensar perdas de velocidade na ocorrência de variações de carga. As correntes nominais de entrada e saída para esses modos são de 65A e 54A para o modo CT e 82A e 68A para o modo VT. Assim, operando em 220V em modo CT esse inversor consegue fornecer uma potência próxima de 21 kVA.

O Inversor conta com o recurso opcional de Frenagem Reostática. Quando ativado, a partir das devidas configurações e preparações, esse recurso permite um controle mais preciso do processo de frenagem, dissipando através de resistores de potência externos a energia elétrica excedente retornada pelo motor ao Inversor.

A.5.3.1 Interface Humano Máquina (HMI)

Ilustrado na Figura 81 estão os displays e botões que juntos compõem a interface humano-máquina (HMI) presente na tampa frontal do Inversor, sendo este o meio mais básico de configuração e controle do Inversor:

Figura 81 – Representação do painel HMI do Inversor.











Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

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 detalhadas do parâmetro ou estado atual do Inversor.

O funcionamento de cada botão do painel consta na Tabela 11 abaixo.

Tabela 11 – 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 style="text-align: center;">  </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>
	<p>Inverte o sentido de rotação do motor comutando entre horário e anti-horário.</p>
	<p>Seleciona a origem dos comandos/referência entre LOCAL ou REMOTO.</p>
	<p>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.</p>

Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

Caso no Display LED esteja se exibindo a mensagem “ready”, significa que o Inversor está pronto para ser operado, devendo-se apertar a tecla **PROG** 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, somente números, então a HMI está na tela de alteração do valor do parâmetro selecionado.

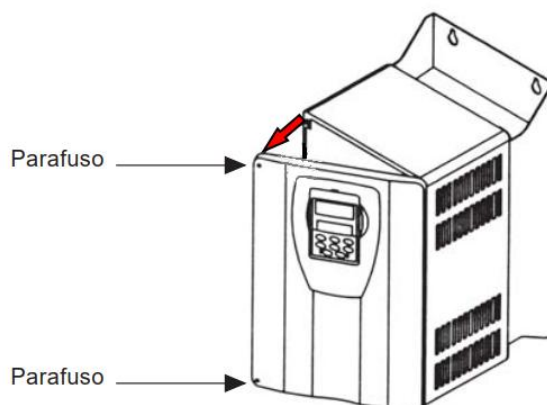
Para alterar entre a tela de seleção de parâmetros e a tela de ajuste de valor, deve-se utilizar a tecla **PROG**. Assim, enquanto na tela de seleção de parâmetros deve-se selecionar o parâmetro desejado utilizando os botões ▲/▼ e então alternar para a tela de seleção de valor utilizando a tecla **PROG** e então definir o valor desejado com ▲/▼. Dependendo do parâmetro, o ajuste de valor é realizado no instante em que ele é alterado, somente depois de retornar à tela de seleção de parâmetros com a tecla **PROG** novamente ou somente quando o Inversor é reiniciado.

Quando 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 outros 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 membro qualificado do GTA para a investigação do erro.

A.5.3.2 Abertura e fechamento da tampa do Inversor

Para se ter acesso as suas conexões de Potência/Aterramento e Controle do Inversor, é necessário abrir sua tampa frontal, destravando os parafusos e movimentando a lateral esquerda da tampa como indicado na Figura 82. **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 82 – Indicação do processo de abertura da Tampa do Inversor.



Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

Figura 83 – Foto do Inversor com a tampa aberta, mostrando seu interior.



Fonte: Foto do autor.

A.5.3.3 Conexões de Potência/Aterramento e Controle

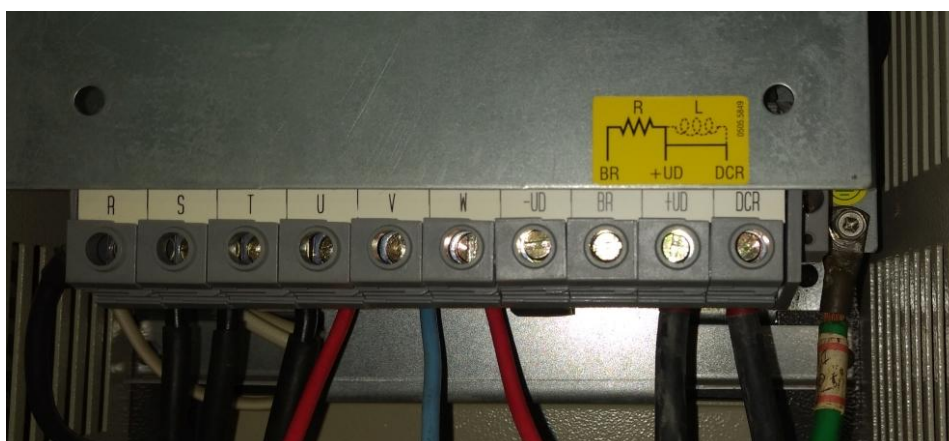
As conexões de Potência/Aterramento e Controle estão ilustradas na Figura 84 e na Figura 85 abaixo. Para acessá-las é necessário a abertura da tampa do Inversor.

Figura 84 – foto das conexões de controle do Inversor.



Fonte: Foto do autor.

Figura 85 – foto das conexões de potência do Inversor.



Fonte: Foto do autor.

A.6 ELEMENTOS DE COMANDO E PROTEÇÃO

A.6.1 Chave geral

A Chave Geral energiza a Bancada quando fechada, conforme a Figura 86. Toda e qualquer manutenção nas conexões da Bancada ou nos equipamentos presentes devem ser feitas com a Chave Geral aberta para garantir que a primeira esteja desenergizada e reduzindo o risco de acidentes elétricos.

Figura 86 – fotos da Chave Geral da Bancada Dinâmica nas posições aberta e fechada



Fonte: Autoria própria.

A.6.2 Botoeiras dupla

As cinco Botoeiras de Comando SBG e S1-S4, presentes na Bancada conforme a Figura 87, permitem ativar ou desativar contadores que controlam a alimentação de diversas conexões da Bancada, tendo cada botoeira botões de ativação (“I”) e desativação (“O”). As botoeiras e suas respectivas funções são:

- SBG: Aciona a contadora SBG, responsável pelo comando do Bloqueio Geral (Bloqueio Geral é DESATIVADO quando a contadora SBG está acionada);
- S1: Aciona a contadora K1, que permite a alimentação da entrada do retificador de armadura do conversor;
- S2: Aciona a contadora K2, que permite a alimentação da eletrônica do Conversor CTW-04;
- S3: Aciona a contadora K3, que permite a alimentação da entrada de corrente de campo do Conversor e a dos ventiladores do Conversor e do Motor;

- S4: Aciona a contatora K3, que permite a alimentação do Inversor pelo Gerador.

Figura 87 – Foto das Botoeiras de Comando SBG e S1-S4.

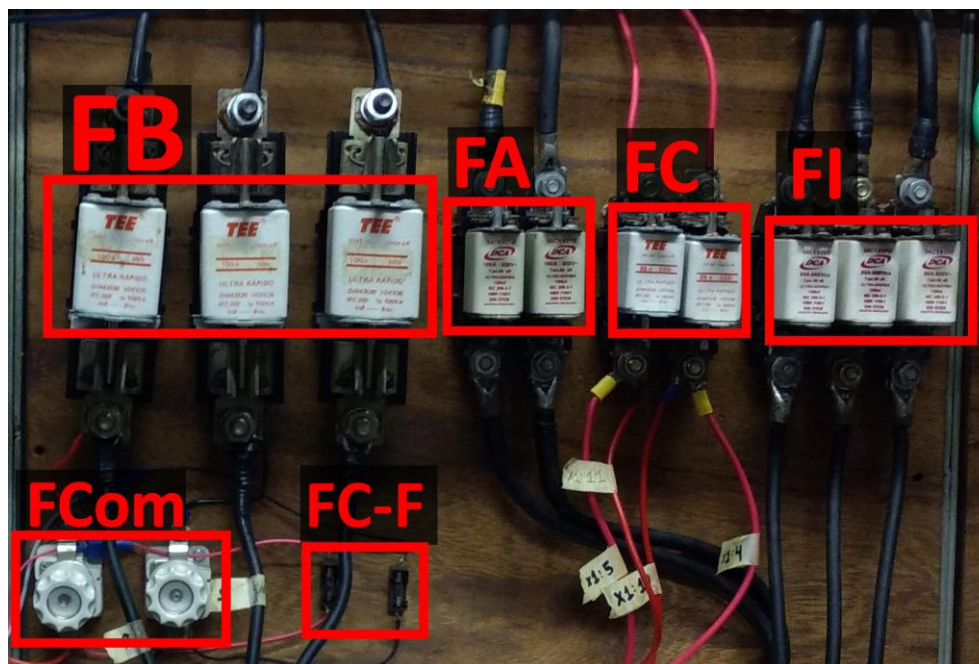


Fonte: Foto do autor.

A.6.3 Fusíveis

A Figura 88 indica as posições e as identificações dos fusíveis utilizados na Bancada, salvo os fusíveis internos de equipamentos como o Conversor, Inversor, Gerador etc. A Tabela 12 contém as descrições de uso e especificações dos fusíveis utilizados.

Figura 88 – foto indicando os conjuntos de fusíveis utilizados na Bancada, junto de seus respectivos nomes de referência.



Fonte: Foto do autor.

Tabela 12 – nomes de referência e especificação dos conjuntos de fusíveis associados à Bancada Dinâmica.

Nome	Descrição de uso	Especificações
FG	Fusíveis da Chave Seccionadora Geral da Bancada	NH 1 gL/gC - 100 A 500 V
FB	Proteção geral da Bancada Dinâmica	NH 1 aR - 100 A 500 V
FC	Proteção da entrada de Corrente de Campo do Conversor e de sua ventilação	NH 0 aR- 25 A 500 V
FA	Proteção da saída da Corrente de Armadura do Conversor	NH 0 aR - 100 A 500 V, aR
FCom	Proteção do circuito de comando da Bancada	Diazed gL/gG - 4 A
FC-F	Proteção externa das portas XC1:45 e 46 do Conversor CTW-04	Fusível de vidro 0,5 A

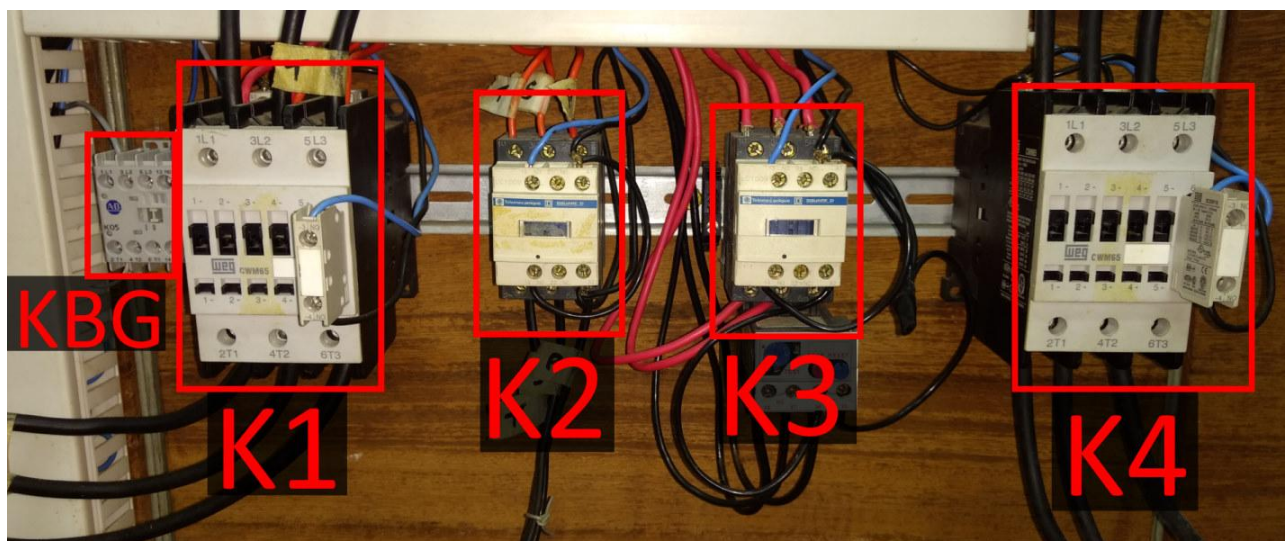
Fonte: Autoria própria.

A.6.4 Contatores

Os contatores controlam a energização de diversos componentes da Bancada e são ativados e desativados manualmente pelo usuário através das Botoeiras de Comando ou automaticamente em resposta à certas condições de operação da Bancada.

A Figura 89 indica as posições e os nomes de identificação dos contatores utilizados. A Tabela 13 contém uma breve descrição de suas funções

Figura 89 – foto indicando os conjuntos de contatores utilizados na Bancada, junto de seus respectivos nomes de referência.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 – Nome, descrição de uso e indicações de formas de acionamento das contadoras da Bancada Dinâmica.

Nome	Descrição de uso	Formas de controle
K1	Alimenta a entrada do retificador de corrente de Armadura do Conversor CA/CC.	Manualmente pela Botoeira S1.
K2	Alimenta e eletrônica do Conversor CA/CC	Manualmente pela Botoeira S2.
K3	Alimenta a entrada de Corrente de Campo do Conversor; Alimenta a ventilação do Conversor CA/CC e do Motor CC.	Manualmente pela Botoeira S3. Desativado automaticamente caso haja sobrecarga do motor do sistema de ventilação forçada do Motor CC.
K4	Alimentação do Inversor pelo Gerador.	Manualmente pela Botoeira S4.
KBG	Controle do Bloqueio Geral do Conversor.	Manualmente pela Botoeira SBG. Necessário que o Conversor esteja ligado. Desativado automaticamente em caso de superaquecimento do Motor ou na ocorrência de estados de falha no Conversor.

Fonte: Autoria própria.

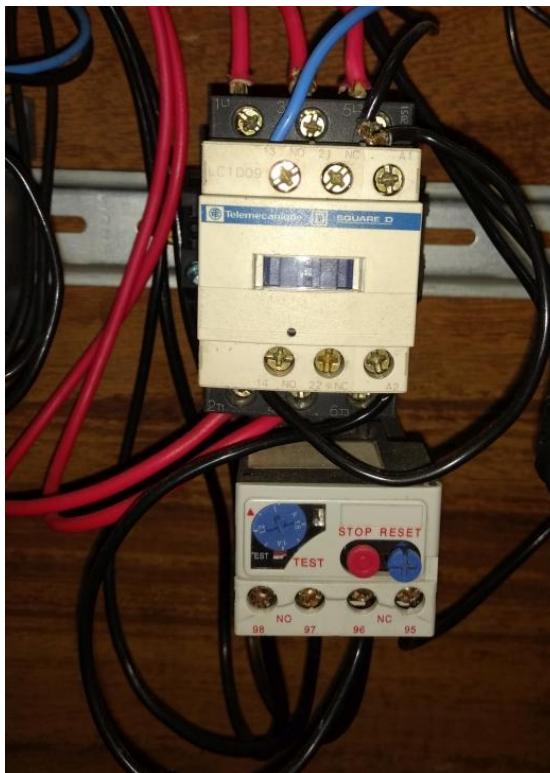
A.6.5 Relé térmico

O relé térmico, mostrado na Figura 90, é utilizado como proteção contra sobrecarga da ventilação do motor. Seu modelo é o SR-225, da fabricante STECK, com faixa de ajuste de 1 a 1,6A. Ele deve ser configurado da seguinte forma:

- Seletor de corrente de sobrecarga ajustado para 1,1 A
 - Valor equivalente a 115% da corrente nominal de 0,95A da ventilação do motor, baseado em seu fator de serviço de 1,15
- Modo de rearme configurado para manual

A atuação do relé térmico irá desativar a Contatora K3 caso esteja ativada, assim como impedir seu acionamento enquanto permanecer desarmado.

Figura 90 – foto do relé térmico de proteção da ventilação do Motor CC, montado a jusante da contatora.



Fonte: Foto do autor.

A.6.6 Chaves de habilitação

As quatro Chaves de Habilitação SE1-SE4, ilustradas na Figura 91, permitem controlar funções do Conversor ao serem habilitadas ou desabilitadas, conforme a Figura 92. As chaves são:

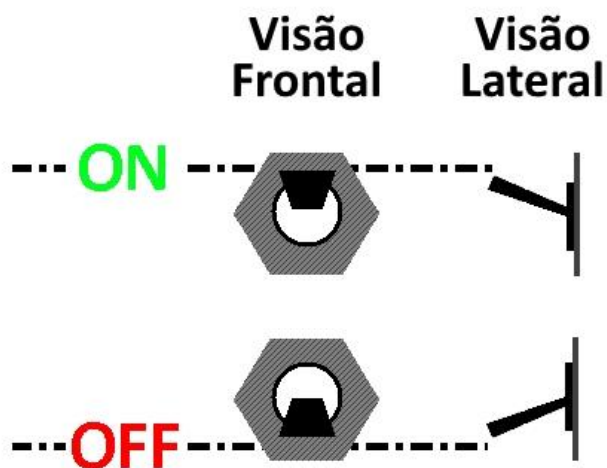
- SE1: Chave sem função no projeto atual;
- SE2: Bloqueio de Rampa de Velocidade (BR): Bloqueio ATIVADO em OFF e DESATIVADO em ON;
- SE3: Origem da referência de velocidade analógica: Referência definida como REMOTA em OFF e LOCAL em ON;
- SE4: Sentido de Giro: horário em OFF; anti-horário em ON.

Figura 91 – Foto das Chaves de Habilitação SE2-SE4, todas desabilitadas.



Fonte: Foto do autor.

Figura 92 – Ilustração de uma Chave de Habilitação habilitada, indicada por ON, e desabilitada, indicada por OFF.



Fonte: Foto do autor.

A.6.7 Conjunto RL Trifásico

A carga RL trifásica, mostrada na Figura 93, é composta por:

- 27 resistores de $2,75 \Omega$ de até 1000 W, suportando assim correntes máximas de 19,6A;
- 3 indutores de 2,5 mH e corrente máxima de 35 A.

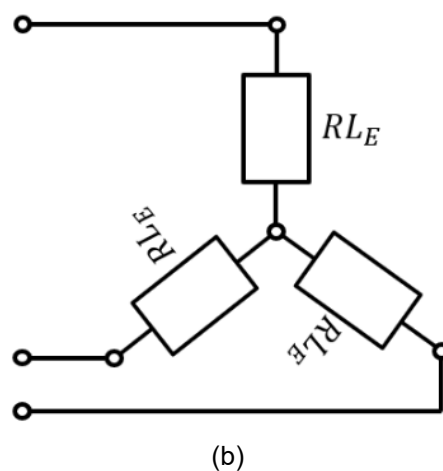
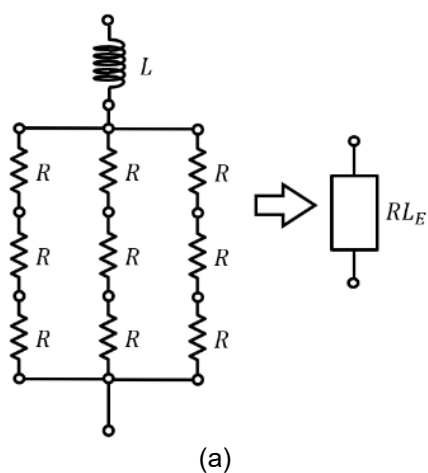
Figura 93 – Carga RL Trifásica.



Fonte: Foto do autor.

Ela segue a configuração de uma carga trifásica em estrela de acordo com o esquema de ligação na Figura 94.

Figura 94 – (a) Diagrama de ligação dos resistores de potência que formam cada uma das fases da carga; (b) Diagrama simplificado da Carga Resistiva Trifásica.



Fonte: Autoria própria.

A.7 FATORES DE LIMITAÇÃO DA CORRENTE MÁXIMA NA CARGA

O limite máximo de corrente na carga é limitado pelos seguintes fatores:

1. 30A - Limite médio de corrente para os cabos de cobre isolados 750V/4mm² utilizados na ligação;
2. 35A – Limite máximo de corrente dos indutores de potência de 2,5mH;
3. 57,18A – Limite máximo de corrente na configuração atual dos resistores, em que cada ramo suporta um máximo de 19,06A.

APÊNDICE B**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA
PARAMETRIZAÇÃO DO CONVERSOR CA/CC**

APLICAÇÃO: Bancada Dinâmica de Simulação de Geração

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

REVISÃO: 0

ELABORADO POR: Ygor Pereira Vaz

REVISADO POR:

APROVADO POR:

DATA DE APROVAÇÃO:

B.1 OBJETIVO

B.1.1 Objetivo geral

O Conversor CA/CC será parametrizado para acionamento do Motor CC em modo de controle de velocidade, mantendo estável a velocidade definida pelo usuário mesmo quando há variações de carga.

B.1.2 Premissas de parametrização

A estimativa de velocidade real será realizada pelo conversor a partir da medição da Força Contra Eletromotriz (FCEM).

A referência de velocidade, isto é, a forma de se definir a velocidade desejada de acionamento do Motor, foi definida para controle direto por sua HMI, através de parâmetros que podem ser ajustados antes ou durante o acionamento do Motor.

A tensão máxima de saída de armadura será ajustada de forma que quando a referência de velocidade for definida para 100% a velocidade real seja de 1800RPM. As rampas de aceleração e desaceleração foram ajustadas para 4s, permitindo partida e mudanças de velocidade suaves, evitando estresse elétrico e mecânico.

Caso a velocidade definida para o Motor CC seja tão baixa a ponto de ser considerada nula, foi definido que o Conversor não atue para manter o eixo do Motor CC parado, permitindo sua rotação livre.

A alimentação de corrente de campo do Motor CC será realizada diretamente pelo Conversor, sem depender de uma alimentação externa. Foi definida a interrupção completa da corrente de campo caso o Bloqueio Geral esteja ativo. Importante salientar que a interrupção não ocorre de forma imediata caso o Motor CC esteja em acionamento no momento da ativação do Bloqueio Geral. Nessa situação, primeiro ocorrerá a parada controlada do Motor CC seguindo a rampa de desaceleração, somente interrompendo a alimentação de campo quando a parada total for confirmada.

B.2 REQUISITOS

- Uso deste POP em conjunto com a **REFERÊNCIA DESCRITIVA** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Uso deste POP em conjunto com o **PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DA CARGA DO GERADOR** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Tacômetro;
- Osciloscópio;
- Multímetro;
- Alicata amperímetro;

B.3 PROCEDIMENTOS

ESSES PROCEDIMENTOS DEVEM SER SEGUIDOS COM O AUXÍLIO DOS ITENS LISTADOS NA SEÇÃO DE REQUISITOS!

B.3.1 Preparo inicial

1. Certificar-se de que a Chave Seccionadora Geral está aberta de modo que a Bancada esteja completamente desenergizada;
2. Reposicione e prenda para longe do conjunto motor-gerador 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;
3. Inspeccione visualmente se não há problemas com as conexões da Bancada, assim como se os fusíveis FG, FB, FA, FC, FCom e FC-F não estão queimados.

B.3.2 Energização do Conversor CA/CC

1. Certifique-se que todas as Chaves de Habilitação (SE1-SE4) estão desabilitadas;
2. Feche a Chave Geral para energizar a Bancada;
3. Acione a botoeira 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;

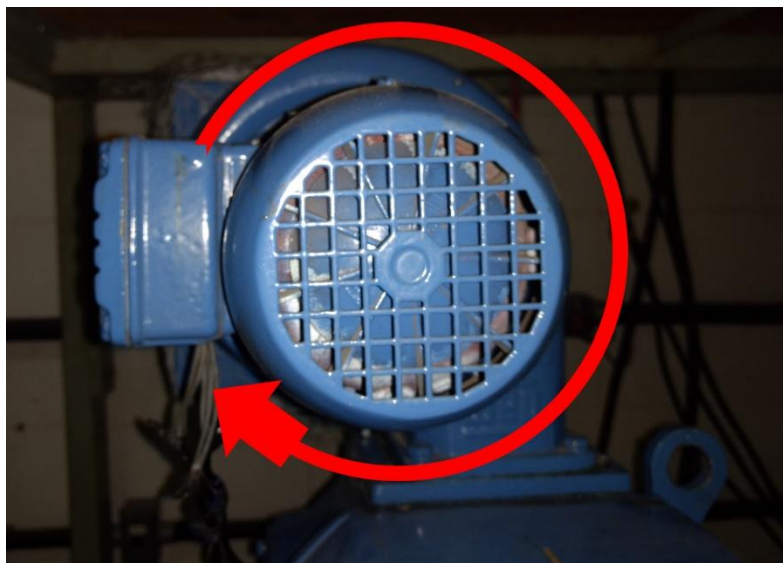
B.3.3 Ajuste inicial dos parâmetros

1. Aperte uma única vez qualquer tecla da HMI do Conversor para que a mensagem "F001" desapareça;
2. Para realizar o ajuste dos parâmetros, verifique se $P004 = 0$. Caso $P004$ seja igual a 1, ajuste $P013 = 1$, que acarretará a mudança automática de $P004$ para $P004 = 0$;
3. Defina $P000 = 010$. O Display deve piscar por alguns segundos mostrando "010" (reset do Conversor para os padrões de fábrica);
4. Verifique se $P004 = 0$. Caso $P004 = 1$, ajuste $P013 = 1$ que acarretará a mudança automática de $P004$ para $P004 = 0$;
5. Faça o ajuste dos parâmetros de acordo com a Tabela 14, na seção de material complementar;
6. Depois de ajustar todos os parâmetros, defina $P004 = 1$;
7. Defina $P000 = 005$. O Display deve piscar por alguns segundos, indicando que as configurações foram salvas;
8. 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;
9. Utilizando novamente a Tabela 14, verifique se todos os parâmetros foram salvos corretamente, repetindo os passos desta sessão caso haja parâmetros incorretos.

B.3.4 Inspeção da ventilação do Conversor CA/CC e do Motor CC

1. Utilize a Botoeira S3-I para ligar as ventilações do conversor e do Motor CC, assim como energizar a Entrada de Campo do Conversor;
2. Inspeção de forma visual e auditiva se as ventilações do conversor e do motor foram ativadas corretamente;
3. Utilize a Botoeira S3-O para desligar os ventiladores e então inspecione de forma visual se o sentido de giro do ventilador do Motor CC está de acordo com o indicado na Figura 64 abaixo;

Figura 95 – Foto com indicação do sentido de giro correto do ventilador do Motor.



Fonte: Foto do autor.

B.3.5 Confirmação de funcionamento e sentido de giro do motor

4. Ajuste P002 = 0 para que a alimentação de campo do Conversor para o Motor CC seja liberada;
5. Acione S1-I para ativar a alimentação da Entrada do Retificador da Armadura do CTW-04;
6. Ajuste a Referência de Velocidade para 5% da tensão nominal de armadura a partir de P056 = 5 ou P057 = 5 (P056 altera a Referência de Velocidade de 1 em 1 % e P057 de 0.1 em 0.1 %);
7. Habilite (ON), a chave SE2 para desabilitar o Bloqueio de Rampa e então utilize a Botoeira SBG-I para desativar o Bloqueio Geral. O rotor deve começar a girar a uma baixa velocidade;
8. Verifique o sentido de giro do rotor, que deve girar no sentido horário;
9. 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;
10. Reative o Bloqueio Geral a partir de SBG-O e em seguida desabilite (OFF) SE2 e SE3.

B.3.6 Ajuste inicial da realimentação de velocidade do conversor

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 50 % a partir de P056 e/ou P057 (P056 altera a Referência de Velocidade de 10 em 10 % e P057 de 1 em 1 %);
3. Ajuste o parâmetro P066 até que a velocidade do motor seja igual a 900;
4. Ajuste a referência de velocidade para 100% a partir de P056 e/ou P057;

5. Ajuste P066 de forma que a velocidade do motor seja igual a 1800 RPM;
6. Ajuste a referência de velocidade para 0% a partir de P056 e/ou P057;
7. Pressione a botoeira SBG-O para reativar o Bloqueio Geral (F01 aparecerá na HMI do conversor) e desabilite SE2;
8. Aperte qualquer tecla na HMI do conversor para dispensar a mensagem F01;
9. Ajuste P000 = 5 para salvar os parâmetros. Espere o visor HMI do CTW-04 parar de piscar antes de prosseguir.

B.3.7 Ajuste do regulador de velocidade (estático) do Conversor CA/CC

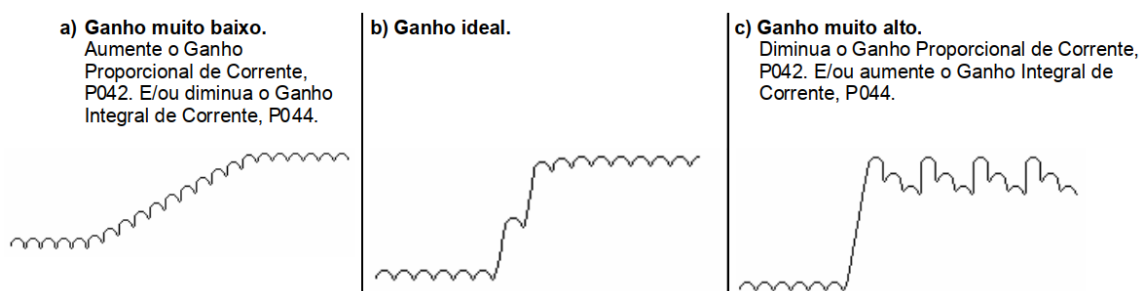
1. Ajuste a Referência de Velocidade para 50% a partir de P056 e/ou P057
 - a. P056 altera a Referência de Velocidade de 1 em 1 % e P057 de 0.1 em 0.1 %);
2. Utilizando um osciloscópio, monitore a tensão de armadura do Motor CC a partir das conexões de força do Conversor XC1: A1 e B1;
3. Pressione SBG-I e habilite (ON) SE2;
4. Caso a tensão de armadura não esteja estável, varie o parâmetro P039 para ajustar o Ganho Proporcional e estabilizar a tensão.
5. Pressione SBG-O mude a chave SE2 para a posição “OFF”
6. Ajuste P000 = 5 para salvar os parâmetros. Espere o visor HMI do CTW-04 parar de piscar antes de prosseguir.

B.3.8 Ajuste do regulador de corrente

1. Confirme que o Bloqueio Geral está ativo (pressione o botão SBG-O se necessário) e que a chave SE2 está na posição “OFF”;
2. Ajuste P013 = 1, que acarretará a mudança automática de P004 para P004 = 0;
3. Ajuste P002 = 1 para inibir a aplicação de corrente de campo no motor;
4. Ajuste P070 = 4;
5. Ajustar P039 = 1, P040 = 0 e P041 = 0;
6. Ajuste P054 e P055 para 100 %;
7. Ajuste P004 = 1;
8. Ajuste P032 e P033 para 0, definindo as Rampas de Aceleração e Desaceleração como 0 segundos;
9. Monitore, com osciloscópio, os pontos de testes “IA_INST” e “AGND” no cartão CCW4
10. Utilize como auxílio a visão simplificada do Cartão CCW4 mostrada na Figura 100.
11. Ajuste P056 = P057 = 100 %;
12. Mude a Chave SE2 para posição “ON”, que habilitará a rampa de aceleração;
13. Desabilite o Bloqueio Geral do Conversor acionando a botoeira 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 para reativar o Bloqueio Geral;
14. Compare se o sinal que foi medido está de acordo com o comportamento correto mostrado na Figura 96;

15. Caso o sinal não esteja de acordo com o item “b” da Figura 96, ajuste P042 e P044 para alterar, respectivamente, o Ganho Proporcional e o Ganho Integral de corrente, repetindo os passos 12 e 13 desta sessão até que o comportamento seja o mais próximo possível do ideal;

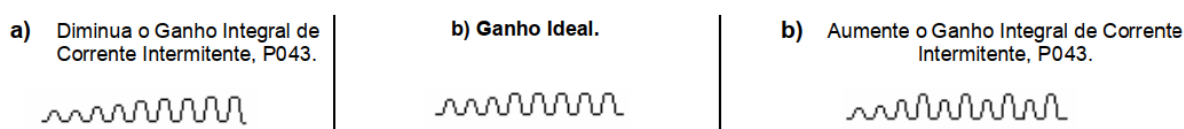
Figura 96 – Referência para o ajuste do ganho proporcional e integral de corrente.



Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

16. Desabilite a chave SE2;
17. Ajuste 054 = P055 = 0 %;
18. Reabilite a chave SE2;
19. Aumente gradativamente a Referência de Velocidade 054 = P055 até obter corrente intermitente no osciloscópio;
20. Desabilite a chave SE2 e espere 5 segundos;
21. Acione SBG-I e então ative a chave SE2;
22. Verifique se o sinal medido coincide com o item “a” da Figura 97 abaixo;

Figura 97 – Referência para o ajuste de P043



Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

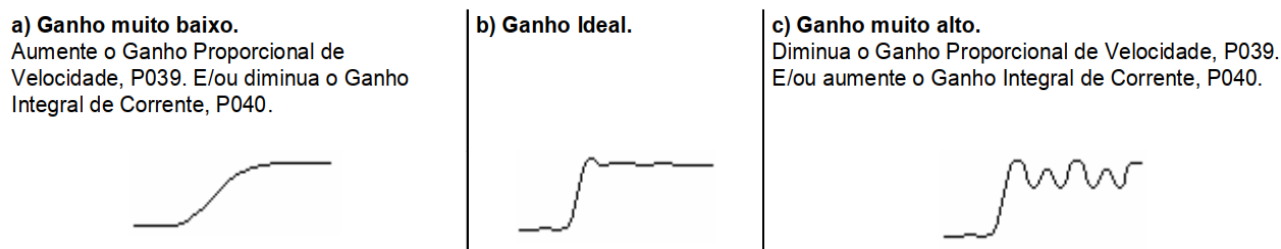
23. Caso o sinal não coincida, acione SBG-O e desative SE2 por 5s, varie o parâmetro P043 e repita os passos 19 e 20 desta sessão até obter o mostrado no item “b” da Figura 97 acima;
24. Pressione SBG-I e desabilite SE2;
25. Ajuste P004 = 1 e P000 = 5 para salvar os parâmetros.

B.3.9 Ajuste do regulador de velocidade

1. Ajuste P013 = 1, que acarretará a 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. Monitore, com osciloscópio, as conexões de força XC1: 6 e 4 do Conversor;
6. Ajuste SOMENTE os parâmetros P032 (Tempo de Aceleração) e P033 (Tempo de Desaceleração) de acordo com os valores da Tabela 14;
7. Ajuste $056 = P057 = 75 \%$;
8. Habilite o Conversor através de, respectivamente, o pressionamento de SBG-I e a habilitação de SE2. Compare o sinal medido com os sinais da Figura 98 abaixo e então pressione SBG-O e desabilite SE2;

Figura 98 – Referência para ajuste de P039 e P040



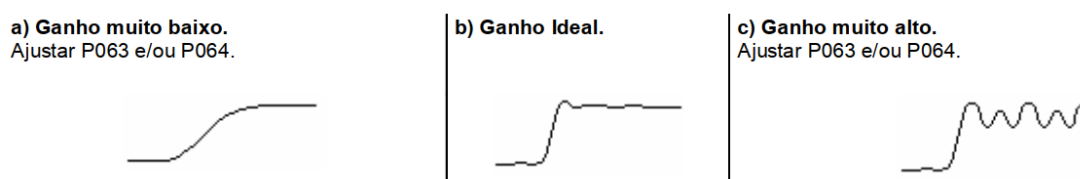
Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

9. Caso o sinal não esteja de acordo com o item “b”, ajuste P039 e P040 conforme as instruções dos itens “a” ou “c” na Figura 98, dependendo do comportamento atual do sinal. Em seguida, repita os passos 8 e 9 desta sessão;
10. Assim que o sinal medido esteja de acordo com o item “b” da Figura 98, ajuste $P004 = 1$ e $P000 = 5$ para salvar os parâmetros.

B.3.10 Ajuste do regulador da corrente de campo e regulador de FCEM

1. Acione a Botoeira S1-O para desativar a alimentação do Retificador da Armadura do Conversor;
2. Ajuste $P056 = P057 = 0 \%$;
3. Monitore com um osciloscópio o sinal I_c com relação à AGND do cartão interno do CCW4, utilizando como auxílio o esquemático na Figura 100;
4. Habilite a Chave SE2;
5. Pressione a Botoeira SBG-I para liberar o Bloqueio Geral e compare o sinal com os mostrados na Figura 99 abaixo, pressionando em seguida a Botoeira SBG-O depois de feita 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”;

Figura 99 – Possíveis comportamentos do sinal I_c , no cartão CCW4.



Fonte: Adaptado de WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

6. Desabilite a chave SE2;
7. Pressione a botoeira S1-I para reativar a alimentação do retificador de corrente de Armadura do conversor;
8. Ajuste $P056 = P057 = 100 \%$;
9. Pressione SBG-I e habilite SE2;
10. Caso o sinal esteja instável, altere P059 para alterar o Ganho Integral;

B.3.11 Ajuste da compensação de carga

1. Com o auxílio do **PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DA CARGA DO GERADOR**, defina a carga no Gerador em 0%
 - a. Caso o Inversor ainda não esteja devidamente parametrizado ele pode ser parametrizado neste momento seguindo as instruções do **PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR**.
2. Aumente a carga no gerador em 10%. Após isso, ajuste P031 no Conversor CA/CC até que a velocidade do motor seja igual a 1800 RPM na situação com carga máxima;
3. Repita o passo 2 acima até atingir a carga máxima;
4. Encerre a operação de Controle de Carga, conforme descrito no POP de Controle de carga

B.3.12 Ajuste de regulador de FCEM

1. Mantendo $P056 = P057 = 100 \%$, pressione SBG-O e, assim que o motor parar, pressione SBG-I e aguarde até o motor alcançar a velocidade máxima. Realize esse teste nas condições 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;
2. Acione SBG-O e desative SE2;
3. Ajuste $P000 = 5$ para salvar os parâmetros.
4. 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 SE2-4 estão desativadas e abra a Chave Geral para a completa desenergização da Bancada.

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

B.4 MATERIAL COMPLEMENTAR

Tabela 14 – Tabela de configuração de parâmetros do Conversor CTW-04.

PARÂMETROS DO MODO DE OPERAÇÃO		
P002	Malha de Controle da Corrente de Campo –IC	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	0
P013	Alteração do Modo de Operação	0
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
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
	Comunicação Serial	
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
	Dados do Conversor	
P026	Seleção da Tensão Nominal de Armadura	0
P027	Seleção da Corrente Nominal de Armadura	2
	Sobrecarga [I x t]	
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
PARÂMETROS DE REGULAÇÃO		
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	4
P033	Tempo de Desaceleração	4
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, lx, N = 0		
P035	Atuação de n = n*	2.0
P036	Atuação de n = 0	1.0
P071	Corrente lx (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

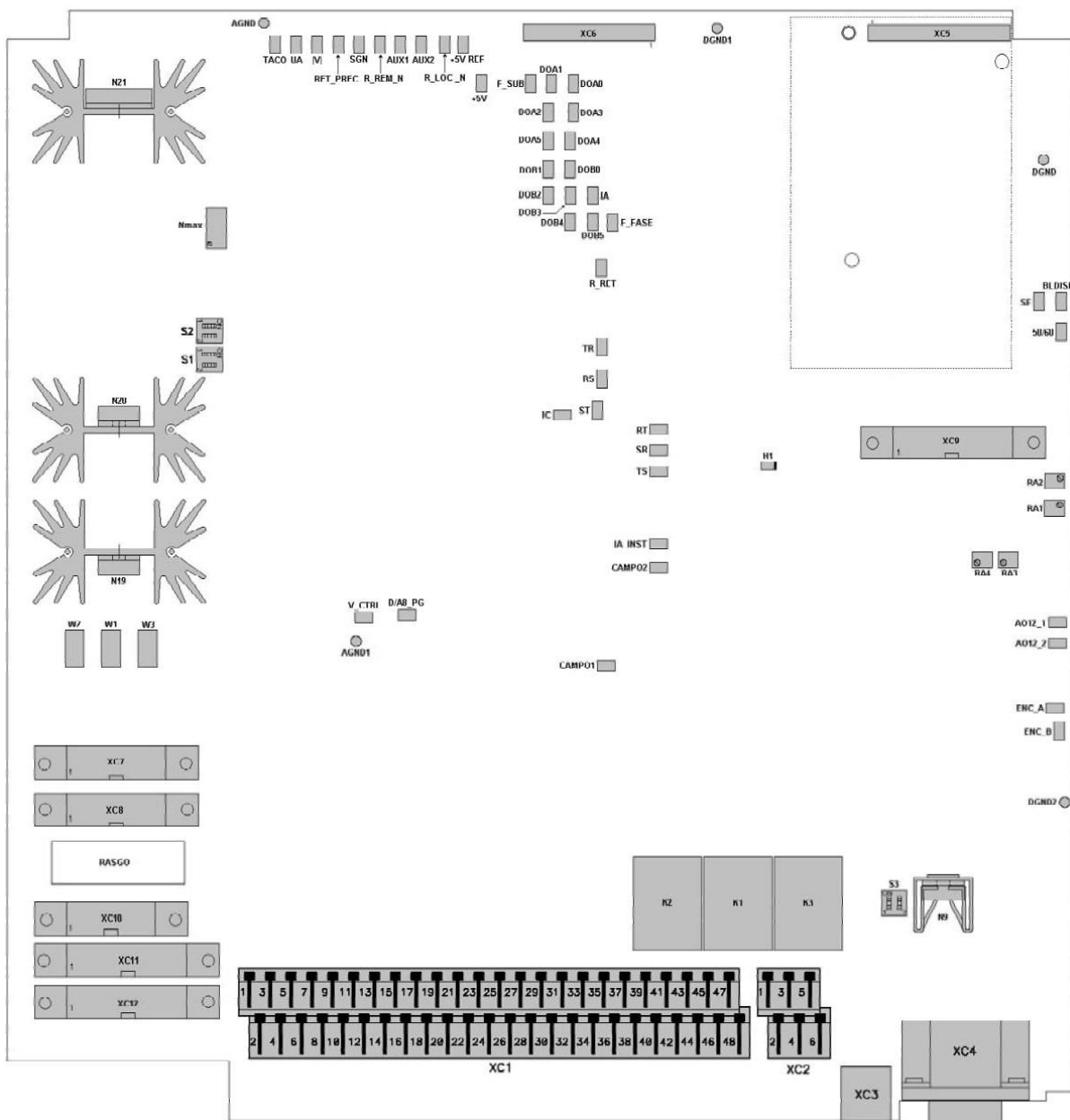
	Regulador de Corrente	
P042	Ganho Proporcional	0.26
P043	Ganho Integral (Intermitente)	35
P044	Ganho Integral (Contínua)	70
P045	Taxa de Variação $I^*(di^* / dt)$	20
P054	Limitação de Corrente (+I) (Ver P028)	25.0
P055	Limitação de Corrente (-I) (Ver P028)	25.0
	Entradas Analógicas	
P050	Ganho da Entrada 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	18
P061	Corrente Mínima	18
P100	Corrente de Economia	0
P063	Ganho Proporcional	0.2
P064	Ganho Integral	0.1
	Limitação de Corrente em Função de n	

P074	Corrente I _{min}	125
P075	Velocidade n ₁	100

Fonte: Feita pelo autor com base em WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

Figura 100 – Esquema simplificado do Cartão CCW4, somente com possíveis pontos de interesse.

Posição dos elementos de ajuste:



Fonte: WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2006.

APÊNDICE C**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE
VELOCIDADE DO MOTOR CC**

APLICAÇÃO: Bancada Dinâmica de Simulação de Geração

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

REVISÃO: 0

ELABORADO POR: Ygor Pereira Vaz

REVISADO POR:

APROVADO POR:

DATA DE APROVAÇÃO:

C.1 OBJETIVO

Acionar o Motor CC da Bancada Dinâmica com controle de velocidade, se mantendo estável mesmo nas situações sem carga e com carga, permitindo o ajuste de velocidade antes ou durante a sua operação.

C.2 REQUISITOS

- Uso deste POP em conjunto com a **REFERÊNCIA DESCRITIVA** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Uso deste POP em conjunto com o **PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DA CARGA DO GERADOR** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Tacômetro;
- Osciloscópio;
- Multímetro;
- Alicates amperímetro;

C.3 PROCEDIMENTOS

ESSES PROCEDIMENTOS DEVEM SER SEGUIDOS COM O AUXÍLIO DOS ITENS LISTADOS NA SEÇÃO DE REQUISITOS!

C.3.1 Preparo inicial

5. Certificar-se de que a Chave Seccionadora Geral está aberta de modo que a Bancada esteja completamente desenergizada;
6. Reposicione e prenda para longe do conjunto motor-gerador 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;
7. Inspeção visualmente se não há problemas com as conexões da Bancada, assim como se os fusíveis FG, FB, FA, FC, FCom e FC-F não estão queimados.

C.3.2 Energização do Conversor CA/CC

8. Certifique-se que todas as Chaves de Habilitação (SE1-SE4) estão desabilitadas;
9. Feche a Chave Geral para energizar a Bancada;
10. Acione a botoeira S2-I para energizar a eletrônica do Conversor;
11. A mensagem "F001" deve aparecer na HMI do Conversor CTW-04 3 segundos após sua energização, indicando que o Bloqueio Geral está ativo;

C.3.3 PARTIDA E CONTROLE DE VELOCIDADE DO CONJUNTO MOTOR-GERADOR

1. Com a mensagem “F001” sendo exibida na HMI do Conversor, pressione uma única vez a tecla “PROG” na HMI do mesmo para mudar para a tela de seleção de parâmetros;
2. Pressione o botão S3-I
3. Inspeção visualmente e/ou auditivamente se a ventilação do conversor e do motor estão em operação;
4. Pressione o botão S1-I para fornecer a alimentação de armadura do Conversor;
5. Pressione o botão SBG-I para desativar o Bloqueio Geral;
6. Ajuste P056 e/ou P057 de acordo com a Velocidade desejada, utilizando como auxílio a fórmula abaixo;
 - a. P056 altera a Referência de Velocidade de 10 em 10% e P057 de 0.1 em 0.1%.

$$\text{Ajuste de P056 ou P057 (em \%)} = \frac{\text{Velocidade desejada (em RPM)}}{1800}$$

7. Posicione a chave SE1 na posição “ON” para desativar o Bloqueio de Rampa. O conjunto motor-gerador deve então acelerar até a velocidade desejada;
8. Confirme com o auxílio de um tacômetro se o conjunto Motor-Gerador está na velocidade correta.

A partir deste ponto, a velocidade do conjunto motor-gerador pode ser ajustada em tempo real a partir do ajuste dos parâmetros P056 e P057. Deve-se manter em mente que mesmo que a velocidade seja definida para “0” o Conversor continua habilitado e alimentando a malha de campo do motor.

C.3.4 PARADA DO CONJUNTO MOTOR-GERADOR E DESENERGIZAÇÃO DA BANCADA DINÂMICA

9. Ajuste P056 e/ou P057 para “0”, resultando na parada do motor;
10. Posicione a chave SE1 na posição “OFF” para ativar o Bloqueio de Rampa;
11. Pressione, em sequência, os botões SBG-O, S1-O, S3-O, S2-O.
12. Inspeção visualmente se a HMI do Conversor está desligada;
13. Inspeção visualmente e auditivamente se a ventilação do Conversor e do motor não estão mais ativas;
14. Abra a Chave Seccionadora Geral da Bancada Dinâmica para desenergizar por completo a bancada.

APÊNDICE D**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA
PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR**

APLICAÇÃO: Bancada Dinâmica de Simulação de Geração

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

REVISÃO: 0

ELABORADO POR: Ygor Pereira Vaz

REVISADO POR:

APROVADO POR:

DATA DE APROVAÇÃO:

D.1 OBJETIVO

D.1.1 Objetivo geral

O Inversor será configurado para que possa haver o controle linear de sua potência elétrica de saída, considerando o seu uso para a alimentação da Cara RL Trifásica.

D.1.2 Premissas da parametrização

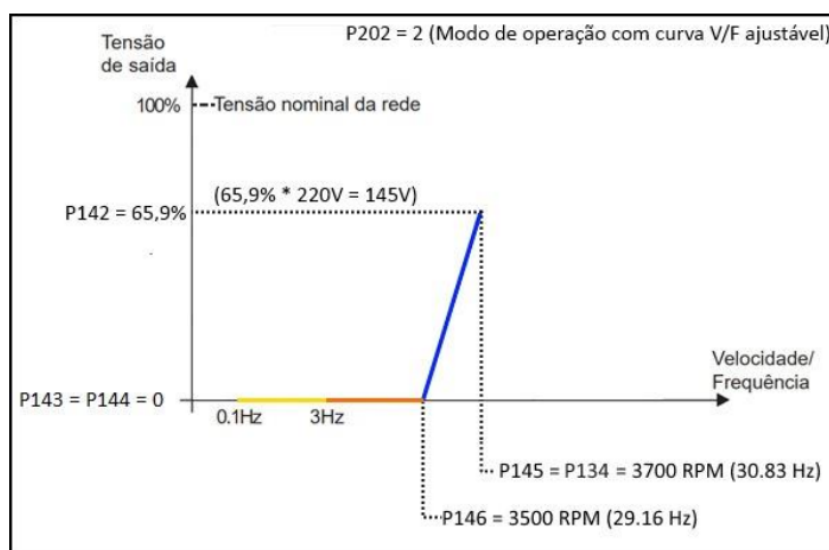
Será ativado o modo de controle por Curva V/F personalizada, seguido do ajuste da curva de forma a obter uma região em que há variação linear da tensão de saída, de 0V até o máximo de 145V (tensão de linha) suportado pela carga, porém a frequência se mantém praticamente fixa em 30Hz, evitando assim mudanças significativas na impedância da carga.

A corrente de saída máxima definida é a de 32A, havendo erro de sobrecarga quando a corrente medida está acima dessa.

O modo de controle da saída é feito pelo ajuste da referência de velocidade, onde 3500RPM equivale a 0V na região efetiva de controle e 3700RPM equivale a tensão máxima de 145V. O ajuste da referência de velocidade é realizado diretamente pela HMI do Inversor.

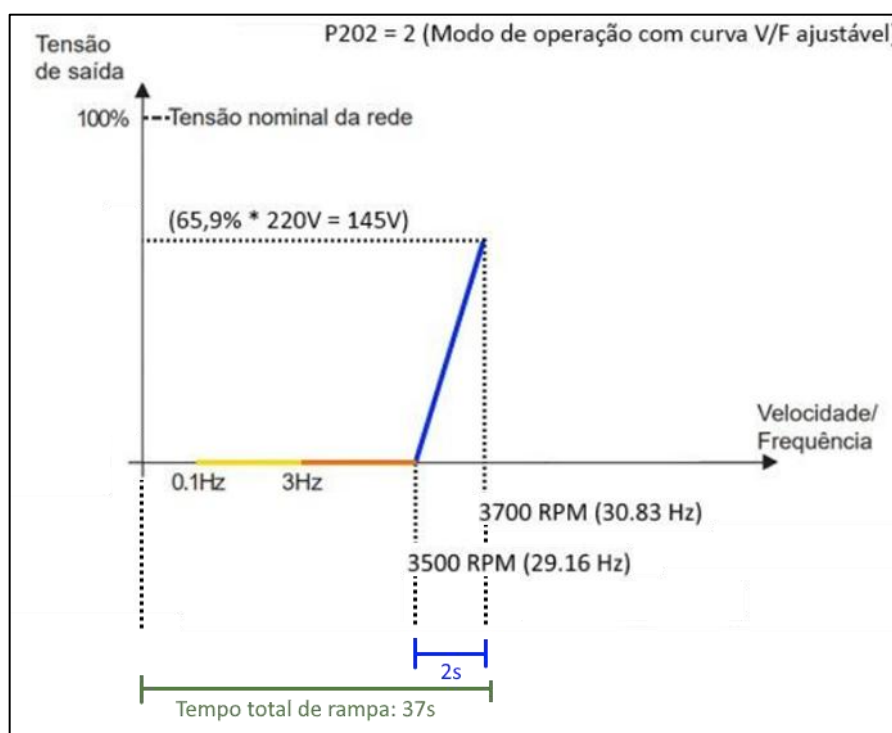
A Figura 101 exibe a Curva V/F personalizada resultante ao final da parametrização.

Figura 101 – Curva V/F "Customizada"



Para evitar mudanças bruscas na demanda de potência elétrica, que poderiam desacelerar o conjunto Motor CC-Gerador de forma significativa e causar erros de subtensão no inversor, as rampas de aceleração e de desaceleração no intervalo total (de 0 a 3700RPM) para 37s, de forma a obter uma rapidez máxima de variação de 2s no intervalo efetivo de 3500 a 3700RPM, conforme ilustrado na **Figura 102**.

Figura 102 – Indicação do tempo de rampa total e efetivo.



Fonte: Feito pelo autor com base em LOPES, 2021.

D.2 REQUISITOS

- Uso deste POP em conjunto com a **REFERÊNCIA DESCRITIVA** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Documento do **PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Tacômetro;
- Osciloscópio;
- Multímetro;
- Alicates amperímetro.

D.3 PROCEDIMENTOS

ESSES PROCEDIMENTOS DEVEM SER SEGUIDOS COM O AUXÍLIO DOS ITENS LISTADOS NA SEÇÃO ANTERIOR DE REQUISITOS!

D.3.1 Remoção da carga do Inversor

1. Certifique-se que a Bancada Dinâmica não esteja em operação, com a Chave Seccionadora Geral da Bancada Dinâmica aberta;
2. Destrave e abra a tampa frontal do Inversor para obter acesso aos bornes de potência;
3. Desconecte os cabos de alimentação da carga RL Trifásica dos bornes de potência U, V e W;
4. Feche e trave a tampa frontal do Inversor;

D.3.2 Energização do Inversor

1. Com o auxílio do “**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC**”, acione 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;
2. Acione a botoeira S4-I para energizar o Inversor. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display da HMI;

D.3.3 Restauração dos ajustes de fábrica do Inversor da Bancada Dinâmica


1. Com a mensagem “Rdy” aparecendo no Display do Inversor, pressione a tecla  uma vez para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
2. Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
3. Ajuste os parâmetros P201, P295, P296, P297 e P308 de acordo com a Tabela 15 abaixo;

Tabela 15 – Ajustes preparativos para restauração dos ajustes da WEG de fábrica p/60Hz

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

Fonte: Elaborada pelo autor com base em WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.


4. Ajuste P204 = 5 (Carrega os ajustes de fábrica da WEG para 60Hz);
5. Ao realizar o ajuste acima, 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 16 – 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




Fonte: Elaborada pelo autor com base em WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

D.3.4 Parametrização do Inversor para alimentação da Carga RL Trifásica da Bancada Dinâmica

1. Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
2. Ajuste P202 = 2 (V/F Ajustável). Após o ajuste, o Inversor irá exibir a mensagem “rdy” e retornar ao parâmetro P002;
3. Ajuste os parâmetros do inversor de acordo com Tabela 17. Os parâmetros não presentes na tabela não devem ser alterados;

4. Desenergize o Inversor acionando a botoeira figura S4-O;
5. Com auxílio do POP **“PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC”**, realize a parada do conjunto motor-gerador e então desenergize por completo a Bancada Dinâmica.
6. Pressione os botões SBG-O, S1-O, S2-O, S3-O, S4-O;
7. Mude as chaves SE1, SE2, SE3 e SE4 para posição “OFF”;
8. Abra a Chave Seccionadora da Bancada Dinâmica.

D.3.5 Verificação de funcionamento

1. 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;
2. Destrave e abra a tampa frontal do Inversor para obter acesso aos bornes de potência;
3. Reconecte os cabos de alimentação da Carga RL Trifásica da Bancada Dinâmica nos correspondentes bornes de potência U, V e W do Inversor;
4. Feche e parafuse a tampa frontal do Inversor;
5. Com o auxílio do POP **“PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC”**, re-energize a Bancada Dinâmica e acione 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;
6. Acione a botoeira S4-I para energizar o Inversor. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display da HMI;
7. Pressione a tecla  1 vez para voltar ao modo de seleção de parâmetros;
8. Ajuste P001 = 3520 e habilite o Inversor pressionando o botão  em seu painel;
9. Confirme se o parâmetro P003 (Corrente do Motor) é ~3 A;
10. Confirme se a Tensão de Saída em P007 é igual à ~14,2 V;
11. Utilizando um osciloscópio e um sensor de corrente, confirme se a corrente de linha da Carga RL Trifásica é igual a ~3 A;
12. Ajuste P001 = 3700;
13. Confirme se a Corrente do Motor em P003 é igual à 30A;
14. Confirme se a Tensão de Saída em P007 é igual à ~145 V;
15. Utilizando um osciloscópio e um sensor de corrente, confirme se a corrente de linha da Carga RL Trifásica é igual a ~30A;
16. Ajuste lentamente P001 de 3700 a 3500 para zerar a corrente de saída do Inversor;
17. Desabilite o Inversor pressionando o botão . A mensagem “READY” deve aparecer em seu display;
18. Ajuste P000 = 5 (senha padrão para permitir a alteração dos demais parâmetros);
19. Ajuste P204 = 10 para realizar o back-up dos ajustes atuais dos parâmetros do Inversor no “usuário 1”;
20. Após o ajuste indicado no passo acima, desenergize o Inversor acionando o botão S4-O;

21. Com auxílio do POP “**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC**”, realize a parada do conjunto motor-gerador e desenergize 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.

D.4 MATERIAL COMPLEMENTAR

Tabela 17 – Ajustes dos parâmetros para configuração do Inversor para alimentação da Carga RL Trifásica da Bancada Dinâmica.

PARÂMETROS DE REGULAÇÃO		
P100	Tempo de aceleração	37
P101	Tempo de desaceleração	37
P122	Referência de velocidade para JOG ou JOG+	1000
P132	Nível máximo de sobrevelocidade	2
P133	Referência de velocidade mínima	3500
P134	Referência de velocidade máxima	3700
P135	Velocidade de atuação do controle I/F	2
P136	<i>Boost</i> de torque manual (IxR)	0
P138	Escorregamento nominal	0
P142	Tensão de saída máxima	65,9
P143	Tensão de Saída intermediária	0
P144	Tensão de saída em 3Hz	0
P145	Velocidade de início do enfraquecimento do campo	3700
P146	Velocidade Intermediária	3500
P151	Nível de atuação da regulação da Tensão do link CC	375
P156	Corrente de Sobrecarga do Motor à Velocidade Nominal	32
P157	Corrente de Sobrecarga do Motor à 50% da Velocidade Nominal	32
P158	Corrente de Sobrecarga do Motor à 5% da Velocidade Nominal	32
P169	Corrente Máxima de Saída	33
P206	Tempo de Auto-Reset	0
P209	Detectação de Falta de Fase no Motor	1
P211	Bloqueio por N = 0 (Lógica de Parada)	1
P212	Condição para Saída de Bloqueio por N = 0	1
P222	Seleção Referência de Velocidade Situação REMOTO	0
P226	Seleção do Sentido de GIRO Situação REMOTO	2
P227	Seleção Gira/Para 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
P400	Tensão Nominal do Motor	220
P401	Corrente Nominal do Motor	30
P402	Velocidade Nominal do Motor	7200
P404	Potência Nominal do Motor	12

Fonte: Elaborada pelo autor com base em WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A., 2011.

APÊNDICE E**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE
DA CARGA DO GERADOR**

APLICAÇÃO: Bancada Dinâmica de Simulação de Geração

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

REVISÃO: 0

ELABORADO POR: Ygor Pereira Vaz

REVISADO POR:

APROVADO POR:

DATA DE APROVAÇÃO:

E.1 OBJETIVO

Realizar o controle de carga elétrica do Gerador, a partir do controle linear da potência elétrica de saída do Inversor.

E.2 REQUISITOS

- Uso deste POP em conjunto com a **REFERÊNCIA DESCRITIVA** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Documento do **PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
- Tacômetro;
- Multímetro;

E.3 PROCEDIMENTOS

ESSES PROCEDIMENTOS DEVEM SER SEGUIDOS COM O AUXÍLIO DOS ITENS LISTADOS NA SEÇÃO ANTERIOR DE REQUISITOS!


E.3.1 Verificação inicial

1. Caso o conjunto motor-gerador não esteja na rotação nominal de 1800RPM, acione-o nessa velocidade usando como auxílio o **POP PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA CONTROLE DE VELOCIDADE DO MOTOR CC** da Bancada Dinâmica de Simulação de Geração;
2. Com o auxílio de um multímetro, confirme que a tensão CA de linha nos contatos de força, do lado montante, da contatora K4 está em 220V.

E.3.2 ENERGIZAÇÃO DO INVERSOR

1. Pressione o botão S4-I para energizar o Inversor;
2. Após alguns segundos, a mensagem “READY” deve aparecer no display de sua HMI.


E.3.3 SIMULAÇÃO DE CARGA PELO ACIONAMENTO DO INVERSOR

1. No Inversor, Ajuste P001 = 3500;
2. Habilite o Inversor pressionando o botão  em seu painel;

3. O controle da corrente de saída do Inversor (I_{out_inv}) é feito pelo ajuste de P001, que varia de 3500 a 3700, que terá um aumento proporcional na potência elétrica de entrada do inversor.
 - a. A corrente de saída varia linearmente de 0 a 30 A de acordo com a variação de P001, conforme a equação abaixo:

$$I_{out_inv} = \frac{P001}{3700} * 30$$

E.3.4 ENCERRAMENTO DO TESTE E DESENERGIZAÇÃO DO INVERSOR

1. Desabilite o Inversor pressionando o botão  em seu painel;
2. Após alguns segundos, a mensagem "READY" deve aparecer no display de sua HMI;
3. Pressione o botão S4-O para desenergizar o inversor;