



Universidade Regional de Blumenau – Faculdade de
Engenharia Elétrica



Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia

Ensaio de Motores em Plataforma de Ensaios com Recuperação
de Energia por Inversores de Frequência Regenerativos

Jorge Augusto Chiarelli



Porto – Portugal, 15 de Julho de 2011

621.3(047.3)
LEEC 2011/CHIj



Universidade Regional de Blumenau – Faculdade de
Engenharia Elétrica



Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia

Ensaio de Motores em Plataforma de Ensaios com Recuperação
de Energia por Inversores de Frequência Regenerativos

Jorge Augusto Chiarelli



Porto – Portugal, 15 de Julho de 2011

Ensaio de Motores em Plataforma de Ensaios com Recuperação de Energia por Inversores de Frequência Regenerativos

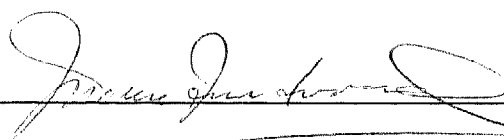
Relatório de Estágio apresentado como
requisito parcial para a obtenção do título
de Engenheiro Eletricista.

122282
621.3 (047.3) / LEEC 2011 / CHN
01 03 11

Porto – Portugal

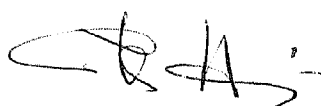
2011

Folha de Assinaturas



Engº. Rui Manuel Borges Moura Guedes

Supervisor de Estágio

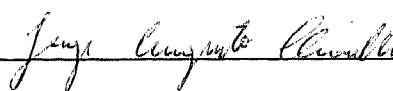


Prof. Dr. Carlos Manuel de Araújo Sá

Orientador – FEUP

Prof. Dr. Sérgio Henrique Lopes Cabral

Coordenador de Estágio – FURB



Jorge Augusto Chiarelli

Acadêmico Estagiário

O que nos distingue
são nossos sonhos e o
que fazemos para que
se realizem.

Agradecimentos

Tenho um imenso prazer em agradecer a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que meu estágio se realizasse da melhor maneira possível. Gostaria de deixar aqui alguns agradecimentos em especial.

Primeiramente gostaria de agradecer o Professor Sérgio Henrique Lopes Cabral, por ter me oferecido esta excelente oportunidade de estágio e também por ter sido um ótimo professor. Gostaria também de agradecer todos os professores da FURB que ao longo do curso me passaram conhecimento.

Ao Professor Carlos Araújo Sá, que ao longo do estágio não poupou esforços para que eu tivesse toda assistência necessária, tanto profissional como pessoal.

A WEGeuro em geral e a todos meus colegas de trabalho, em especial ao pessoal que trabalha no laboratório de ensaios de protótipos, Albino Ferreira de Araújo, Abel Augusto Couto Rodrigues, Domingos Duarte, Fabio Alexandre Marques Ferreira, Nestor Carlos Ferreira Duarte e Rui Miguel Faria Dias pela amizade e companheirismo.

Ao meu supervisor de estágio Rui Manuel Borges Moura Guedes por sua dedicação em passar seus conhecimentos sempre que necessário.

Ao casal Basílio Francisco Silva Castro e Rosália Alves Castro que compartilharam sua casa comigo e foram e serão grandes amigos.

A minha namorada Denise Loebach pelo seu carinho e apoio mesmo estando tão longe.

Aos meus pais que sempre me apoiaram, incentivaram e fizeram o possível para que este estágio se tornasse realidade.

Resumo

Cada vez mais ouvimos falar em rendimento energético, não só em máquinas elétricas, mas em tudo que consuma e forneça energia seja ela de qualquer grandeza. O rendimento energético é uma característica muito importante.

O laboratório de ensaios de protótipos da Wegeuro faz uma média de 25 ensaios completos mensais, consumindo da rede elétrica em torno de 50 MWh através de freios eletromagnéticos ou hidráulicos que servem como carga para os motores elétricos.

Um grande passo para uma grande economia de energia seria a utilização de algo que recuperasse esta energia fornecida para os motores em ensaio ao invés de apenas dissipá-la. Este é um dos grandes motivos que fizeram com que a WEGeuro iniciasse um processo de criação de uma plataforma de ensaios com recuperação de energia, já em uso pela empresa no Brasil.

Este relatório de estágio apresentará o princípio de funcionamento dos principais elementos que formam a plataforma de ensaios, as anomalias e soluções que ocorreram durante o processo de criação e procedimentos a serem utilizados.

Índice

FOLHA DE ASSINATURAS	III
AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ÍNDICE	7
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ACRÔNIMOS	11
1 APRESENTAÇÃO	12
2 HISTÓRIA DA WEG.....	13
2.1 PARQUES FABRIS.....	14
2.2 UNIDADES CONTROLADAS	15
2.3 WEGEURO	16
3 INTRODUÇÃO	19
4 OBJETIVOS	21
5 INVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	22
5.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA	23
5.1.1 Inversor de Frequência Monofásico.....	23
5.1.2 Controle por Deslocamento de Fase.....	25
5.1.3 PWM Senoidal.....	26
5.1.4 Inversor de Frequência Trifásico.....	27
5.1.5 Carga do Capacitor de Filtro.....	29
5.1.6 Controle Escalar	29
5.1.7 Controle Vetorial.....	33
5.2 FRENAGEM	35
5.2.1 Rampa de desaceleração.....	35
5.2.2 Frenagem Dinâmica (ou reostática) e Regenerativa	35
5.2.3 Frenagem por Injeção de Corrente Contínua	37
5.3 CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	37
5.3.1 Compensação de Escorregamento	37
5.3.2 Partida Boost.....	38
5.3.3 Partida com Motor Girando (Flying Start)	38
5.3.4 Parada por Inércia.....	38
5.3.5 Rampa "S"	38
5.3.6 Rejeição de Frequências Críticas	39
5.3.7 Enfraquecimento de Campo	40
5.4 TOPOLOGIAS DE INVERSORES REGENERATIVOS COM CORRENTE DE ENTRADA SENOIDAL.....	41
5.4.1 Conversor Back-To-Back	41

5.4.2	<i>Conversor Matricial</i>	44
5.4.3	<i>O Conversor DPEC Dois Estágios</i>	46
5.4.4	<i>O Conversor DPEC Dois Estágios com RB-IGBTs no Estágio Retificador</i>	47
6	FUNCIONAMENTO DA PLATAFORMA DE ENSAIOS	48
6.1	DIAGRAMA GERAL	49
6.2	QUADRO DE SAÍDA	52
6.3	CIRCUITO DE SELEÇÃO DOS TCS	54
6.4	SELEÇÃO DA EXCITAÇÃO DO ALTERNADOR	56
6.5	ESQUEMA DO QUADRO VSD	58
6.6	COMUTAÇÃO Y/ Δ ALTERNADOR	60
6.7	CONTACTOR DO ALTERNADOR, EMERGÊNCIA E SISTEMA REGENERATIVO	62
6.8	ATUAÇÃO DO <i>CHANGE-OVER</i> DO QUADRO DE SAÍDA	65
6.9	ALIMENTAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE TORQUE.....	67
6.10	LIGAÇÃO DO MEDIDOR DE TENSÕES E CORRENTES.....	69
6.11	SELEÇÃO DO TRANSDUTOR DE TORQUE	71
6.12	DISJUNTORES DOS EQUIPAMENTOS	73
7	PROBLEMAS DURANTE O <i>START-UP</i> DO VSD	75
8	CÁLCULO DA ECONOMIA DE ENERGIA COM A UTILIZAÇÃO DA PLATAFORMA .	80
9	PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS	82
9.1	ARRANQUE DO ALTERNADOR.....	82
9.2	ENSAIO COM CARGA NO SISTEMA 2 – ALIMENTAÇÃO PROVENIENTE DO ALTERNADOR.....	82
9.3	ENSAIO COM CARGA NO SISTEMA 3 – ALIMENTAÇÃO PROVENIENTE DO ALTERNADOR.....	83
9.4	ENSAIO COM CARGA NO SISTEMA 2 – ALIMENTAÇÃO PROVENIENTE DO SISTEMA 1	84
9.5	ENSAIO COM CARGA NO SISTEMA 3 – ALIMENTAÇÃO PROVENIENTE DO SISTEMA 1	85
9.6	PARAMETRIZAÇÃO DO SISTEMA 1	86
9.7	PARAMETRIZAÇÃO DO YOKOGAWA.....	88
10	CONCLUSÃO	89
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

Índice de Figuras

Figura 1 - Instalações fabris WEGeuro	18
Figura 2 - Conversores de energia	22
Figura 3 - Topologia em ponte completa de um inversor de frequência com saída monofásica.....	24
Figura 4 - Tensão de saída do inversor de frequência com saída monofásica em ponte completa	24
Figura 5 - Tensões nos IGBTs e saída do inversor de frequência com o controle por deslocamento de fase.....	25
Figura 6 - Formação de uma onda PWM senoidal. (a) Em tensão de saída máxima. (b) Em metade da tensão de saída máxima. (c) Em metade da tensão e metade da frequência.....	26
Figura 7 - Diagrama de potência do inversor de frequência trifásico.....	27
Figura 8 - Retificador trifásico não-controlado	28
Figura 9 - Diagrama de blocos de um inversor de frequência trifásico.....	28
Figura 10 - Circuito de potência completo do inversor de frequência trifásico.....	29
Figura 11 - Circuito de pré-carga do capacitor de filtro	29
Figura 12 - Circuito equivalente do motor de indução	30
Figura 13 - Torque em relação à velocidade para diferentes tensões	31
Figura 14 - Controle vetorial. (a) Modelo simplificado do motor de indução. (b) Diagrama fasorial do motor de indução.	33
Figura 15 - Barramento DC com filtro e módulo de frenagem	36
Figura 16 - Conversor regenerativo na entrada do inversor de frequência.....	36
Figura 17 - Rampa "S"	39
Figura 18 - Rejeição de frequências críticas.....	40
Figura 19 - Enfraquecimento de campo	41
Figura 20 - Conversor <i>back-to-back</i>	42
Figura 21 - (Situação (A)) Correntes de linha (A), correntes do indutor <i>boost</i> (A), tensão do barramento DC (V), tensão (V) e corrente (A, amplificada 10 vezes, para facilidade de apresentação) de entrada respectivamente, durante uma inversão de potência do <i>front-end</i> ativo em condições normais da rede.....	43
Figura 22 - (Situação (B)) Correntes de linha (A), correntes do indutor <i>boost</i> (A), tensão do barramento DC (V), tensão (V) e corrente (A, amplificada 10 vezes, para facilidade de apresentação) de entrada respectivamente, com 5% de desbalanceamento na tensão de alimentação.....	43
Figura 23 - Conversor matricial.....	44
Figura 24 - (Situação (A)) Correntes de linha (A), tensão do barramento DC (e sua média) (V), correntes da carga (A), tensão de saída entre fase e neutro (com e sem filtro RC) (V) respectivamente, em condições normais da tensão de alimentação.....	45

Figura 25 - (Situação (B)) Correntes de linha (A), tensão do barramento DC (e sua média) (V), correntes da carga (A), tensão de saída entre fase e neutro (com e sem filtro RC) (V) respectivamente, com 5% de desbalanceamento na tensão de alimentação	45
Figura 26 - Conversor DPEC dois estágios	46
Figura 27 - Conversor DPEC dois estágios com RB-IGBTs no estágio retificador	47
Figura 28 – Esquema da bancada de ensaios – Diagrama geral da plataforma	49
Figura 29 – Esquema do quadro de saída – Circuitos de potência e controle	52
Figura 30 – Esquema da bancada de ensaios – Circuito de seleção dos TCs	54
Figura 31 – Esquema da bancada de ensaios – Seleção da excitação do alternador	56
Figura 32 – Esquema do quadro VSD – Circuitos de potência	58
Figura 33 – Esquema de saída do alternador – Circuitos de potência	60
Figura 34 – Esquemas da bancada de ensaios – Contactor do alternador, circuito de corte de emergência e acionamento do sistema regenerativo	62
Figura 35 – Esquema da bancada de ensaios – Atuação do <i>change-over</i> do quadro de saída.....	65
Figura 36 – Esquema da bancada de ensaios – Alimentação dos transdutores de torque	67
Figura 37 – Esquema da bancada de ensaios – Ligação do medidor de tensões e correntes.....	69
Figura 38 – Esquema da bancada de ensaios – Seleção do transdutor de torque	71
Figura 39 – Esquema da bancada de ensaios – Disjuntores dos equipamentos.....	73
Figura 40 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo desligado.....	76
Figura 41 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo desligado.....	76
Figura 42 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado	77
Figura 43 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado	77
Figura 44 – Filtro capacitivo na configuração “estrela aterrada”	78
Figura 45 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado e com filtro instalado	79
Figura 46 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado e com filtro instalado	79
Figura 47 – Diagrama de potências da plataforma de ensaios com recuperação de energia	80
Figura 48 – Diagrama de potências da plataforma convencional.....	81

Acrônimos

DPEC – Direct-Power Electronic Converter

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FURB – Fundação Universidade Regional de Blumenau

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

IHM – Interface Homem Máquina

MWh – Megawatt-hora

RB-IGBT – Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor

SCR – Silicon Controlled Rectifier

TC – Transformador de Corrente

VSD – Variable-Speed Drive

ZCS – Zero Current Switching

1 Apresentação

O estágio curricular proporciona uma oportunidade para que o aluno possa aplicar seus conhecimentos, aprimorá-los, e talvez o mais importante, possa adquirir novos conhecimentos teóricos e práticos.

O presente relatório tem como objetivo mostrar as atividades desenvolvidas por Jorge Augusto Chiarelli, estudante do curso de engenharia elétrica, ao longo do seu estágio curricular na empresa WEGeuro, localizada na Maia, região metropolitana do Porto, Portugal.

Este estágio é resultado de um programa de intercâmbio (Mobile) entre a Universidade Regional de Blumenau (FURB – Brasil) e a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP – Portugal), com as empresas WEG Equipamentos Elétricos S.A., Jaraguá do Sul – Brasil e WEGeuro – Indústria Eléctrica S.A., Maia – Portugal.

Este estágio teve como foco a Engenharia da Qualidade, mais especificamente o laboratório de ensaios de protótipos, ocorreu entre fevereiro e julho de 2011 e teve como supervisor o Engenheiro Rui Manuel Borges Moura Guedes.

2 História da WEG

A história da WEG começou em 1961, com a união de um eletricitista, de um administrador e de um mecânico, três áreas essenciais para a criação de uma empresa de máquinas elétricas rotativas. Esse caminho de sucesso empresarial começou quando Werner Ricardo Voigt, Eggon João da Silva e Geraldo Werninghaus fundaram a Eletromotores Jaraguá. Anos mais tarde, a empresa viria a ganhar uma nova razão social, a Eletromotores WEG S.A.

A denominação WEG é a feliz junção das iniciais dos nomes dos três fundadores. Na língua alemã a palavra WEG significa *caminho*.

Em 1970, com a intenção de exportar, a WEG inova a sua linha de produção com a entrada de produtos enquadrados nas normas técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e da IEC (*International Electrotechnical Commission*).

Com esta evolução, e com perspectivas de crescimento, a WEG inaugurou em 1974 a atividade no Parque Fabril II (Brasil), sendo agora o seu maior centro produtor e onde está sediada sua direção geral.

Produzindo inicialmente motores elétricos, a WEG começou a ampliar suas atividades na década de 80, com a produção de componentes eletroeletrônicos, produtos para automação industrial, transformadores de força e distribuição, tintas líquidas e em pó, e vernizes eletroisolantes.

Atualmente a WEG é o maior fabricante latino-americano de motores elétricos e uma dos maiores do mundo, atua nas áreas de comando e proteção, variação de velocidade, automação de processos industriais, geração e distribuição de energia, tintas e vernizes industriais.

2.1 Parques Fabris

Em seus parques fabris no Brasil, a WEG controla todas as etapas de sua produção, desde a fundição e a estamparia de metal, até a esmaltação e a embalagem. Em Santa Catarina, onde a empresa nasceu, se concentra a maior parte da produção, mas a partir de 2000, com a aquisição de fábricas no exterior, a WEG assume o posto de multinacional brasileira.

Atualmente a WEG possui fábricas no Brasil, Argentina, México, China e Portugal:

➔ No Brasil

WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Parque Fabril 1 – Jaraguá do Sul/SC

WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Parque Fabril 2 – Jaraguá do Sul/SC

WEG Tintas LTDA – Parque Fabril 3 – Guaramirim/SC

WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Transformadores – Parque Fabril 4 – Blumenau/SC

WEG Equipamentos Elétricos S.A. – Transformadores – Itajaí/SC

Unidade Gravataí – Gravataí/RS

Unidade Hortolândia – Hortolândia/SP

WEG Tintas LTDA – Filial Mauá – Mauá/SP

WEG SB – São Bernardo do Campo/SP

WEG Amazônia – Manaus/AM

➔ Na Argentina

Pulverlux S.A. – Buenos Aires

WEG Equipamientos Eléctricos S.A. – Unidade Morbe (WMB) – Córdoba

WEG Equipamientos Eléctricos S.A. – Headquarters San Francisco-Córdoba (WEE) –
San Francisco

→ No México

WEG México, S.A. de C.V. – Huehuetoca

→ Na China

WEG (Nantong) Electric Motor Manufacturing CO., LTD. – Nantong

→ Em Portugal

WEGeuro – Indústria Eléctrica, S.A. – Maia

→ Na Índia

WEG Industries (Índia) PVT. LTD. – Tamil Nadu

2.2 Unidades Controladas

Além dos seus parques fabris, a WEG possui controle societário em outras empresas, complementando a sua linha de produtos. Essas participações adicionam à WEG capacidade fabril no Brasil e no mundo, são elas:

→ Brasil

Equisul – São José/SC

Hisa Unidade Joaçaba – Joaçaba/SC

Instrutech – São Paulo/SP

→ México

WEG Voltran S.A. de C.V. – Tizayuca

→ África do Sul

Zest Electric Motors (PTY) LTD. – Johannesburg

2.3 WEGeuro

Seguindo sua trajetória para atingir o objetivo de ser o maior fabricante de motores elétricos industriais do mundo, a WEG deu um passo importante com a aquisição de uma unidade produtiva em Portugal.

A WEGeuro é a primeira fábrica da WEG na Europa, com aproximadamente 260 colaboradores e com uma área 18.150 m², sendo 12.250 m² de área coberta. Produz motores *standard* e especiais, de baixa e de média tensão, para áreas seguras e atmosferas potencialmente explosivas, e ainda conta com a comercialização de equipamentos de variação e de controle de velocidade e de aparelhagem de comando e de proteção. Está localizada na Zona Industrial da Maia, na região metropolitana do Porto, a segunda maior cidade de Portugal.

Esta unidade está vocacionada para a fabricação de motores customizados e adaptados aos cadernos de encargos mais exigentes, destinados às mais variadas aplicações. Permite responder com eficiência e com elevada qualidade de serviço assim como a prazos de entrega curtos, tirando partido da sua localização estratégica na Europa.

A WEGeuro complementa a atual gama de produtos do Grupo WEG com motores antideflagrantes de baixa tensão, a que acresce uma nova linha de motores antideflagrantes de média tensão, aumentando assim a capacidade de oferta deste tipo de produto à escala mundial. Estes fatores constituem, por certo, os elementos chave do crescimento e do reforço da posição do Grupo WEG no mercado mundial.

Como fabricante de motores elétricos, a WEGeuro destaca-se em motores elétricos industriais de baixa e de média tensão para áreas seguras e áreas perigosas, com potências até 4,5MW, com tensões até 13,8 kV e alturas de eixo até 710mm.

Equipada com um laboratório de ensaios com capacidade para cargas até 1,5 MW, a WEGeuro possui equipamento de ensaio que permite responder ao *standard* da empresa ou à configuração requerida pelo cliente. A qualidade dos seus produtos é garantida pelo seu Sistema de Garantia da Qualidade, assessorado e certificado pela APCER e pela *Lloyd's Register Quality Assurance*, segundo a Norma NP EN ISO 9001:2000. A WEGeuro, seguindo o exemplo da sua matriz, considera o nível exigido pelos seus clientes como um incentivo e uma ajuda à constante procura de espaços para melhorias.

A política da WEGeuro para com o ambiente, seguindo os mesmos passos da matriz, é de co-responsabilidade pela qualidade do mundo em que se engloba, cabendo a cada um dar o seu melhor contributo.

A credibilidade e experiência adquiridas no mercado permitiram à WEGeuro colaborar em projetos à escala mundial. Com isto e com a capacidade de resposta que possui, tem marcado presença em vários setores de mercados das Indústrias e *Utilities*, dando como exemplo as áreas das Águas, Energia, Petróleo, Celuloses e Papeleiras, Siderurgias, Cimenteiras, Portos e Aeroportos.

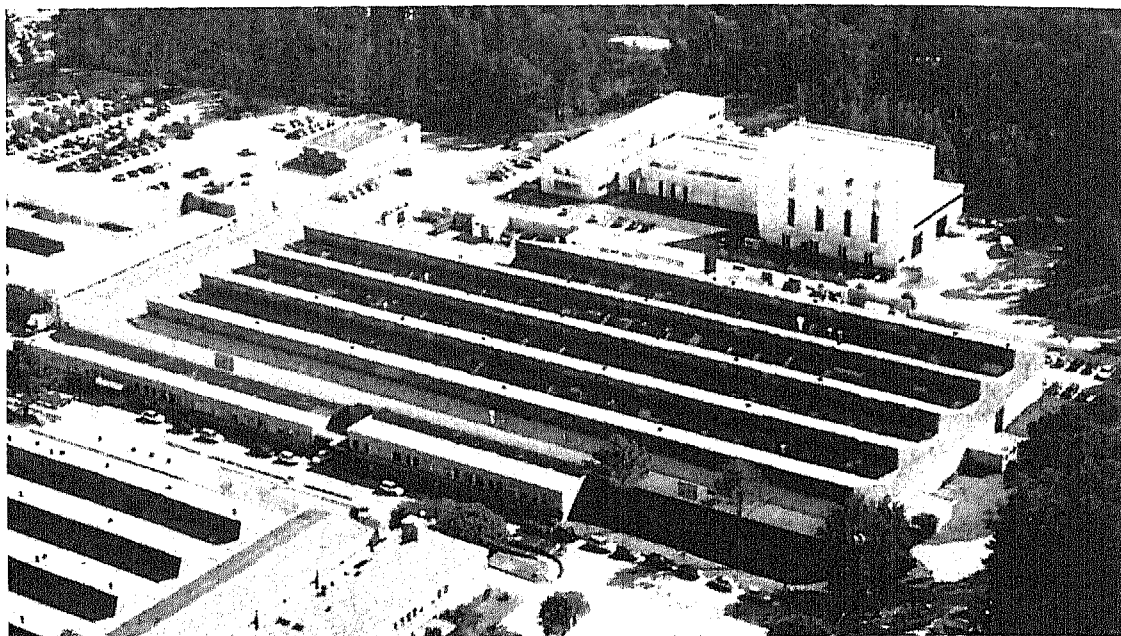


Figura 1 - Instalações fabris WEGeuro

3 Introdução

A energia elétrica representa em torno de 1/3 do uso de toda a energia, e está em ascensão. Uma ampla parte da energia elétrica é convertida em energia mecânica por motores elétricos. Estes motores constituem o fator de carga elétrica mais importante para as indústrias da comunidade que utilizam motores nos seus processos de produção. Os sistemas que utilizam estes motores representam cerca de 70 % do consumo da eletricidade da indústria.

Embora hoje a grande maioria dos motores de indução ter sua alimentação ligada diretamente à rede elétrica, existe uma estimativa de que na próxima década, mais da metade de todos esses motores sejam alimentados através da eletrônica de potência, possibilitando assim, uma variação da velocidade, partidas suaves, recuperação de energia nas frenagens, entre outras vantagens.

A eletrônica de potência é a área da eletrônica que se ocupa do processamento da energia elétrica visando obter maior eficiência (menores perdas nos processos de conversão de energia) e qualidade (energia limpa em termos de impacto ambiental). Os métodos empregados em eletrônica de potência baseiam-se na utilização de dispositivos semicondutores operados em regime de chaveamento para realizar o controle do fluxo de energia e a conversão de formas de onda de tensões e correntes entre fontes e cargas.

Os componentes eletrônicos utilizados na eletrônica de potência são normalmente operados apenas no modo de chaveamento (liga/desliga), sendo geralmente fabricados para este tipo de operação. A maioria deles não deve ser usada no modo de operação linear, que é o modo de operação usado em amplificadores, mas sim nos modos de saturação (ligado) ou corte (desligado).

O aparecimento da Eletrônica de Potência proporcionou uma alternativa vantajosa para o processamento de energia, devido à baixa perda de energia no chaveamento somada a pouca necessidade de manutenção das chaves semicondutoras.

A idéia de se fazer conversão de energia através do chaveamento surgiu nos anos 20 do século passado, mas durante as três décadas subseqüentes teve pouca evolução. Com a invenção do tiristor, ao fim dos anos 50, iniciou-se um grande surto de evolução tecnológica da eletrônica de potência, que se estendeu pelos anos 60 e propiciou, nos anos 70, o início da implantação da eletrônica de potência em escala industrial.

As principais aplicações da eletrônica de potência são no acionamento de máquinas elétricas e cargas de grande potência, em corrente contínua ou alternada, através do uso de tiristores e transistores de alta capacidade.

Além disso, a eletrônica de potência lida com o condicionamento da energia elétrica por meio de circuitos eletrônicos denominados conversores estáticos que permitem converter a energia elétrica de corrente alternada para corrente contínua e vice-versa.

4 Objetivos

Objetivos específicos do estágio:

- Estudo do funcionamento do sistema de recuperação de energia (princípio geral e suas variantes);
- Parametrização e controle dos inversores de frequência;
- Projeto e realização dos sistemas para aquisição e registro de valores de ensaio;
- Definição de procedimentos de ensaio, visando a edição de normas internas da empresa.

5 Inversores de Frequência

Os conversores ou conversores de energia elétrica são equipamentos que convertem níveis e/ou formas de ondas de tensões e correntes entre a fonte e a carga de acordo com uma topologia de circuito eletrônico que permitirá a conversão de energia elétrica necessária conforme apresentado na figura 2.

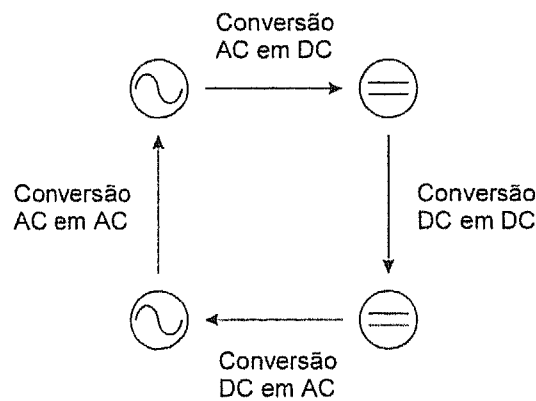


Figura 2 - Conversores de energia

Os conversores AC/DC são chamados de retificadores, cuja corrente de saída é sempre contínua, operando em sistemas monofásicos e polifásicos. Estes retificadores podem ser controlados e não-controlados. Os controlados permitem a variação do valor médio da tensão de saída pelo ângulo de disparo dos SCRs. Os não-controlados utilizam somente diodos cujo valor médio da tensão de saída será fixo para uma determinada carga e tensão de entrada.

Os conversores DC/DC são chamados de *choppers* e permitem o controle da tensão média de saída a partir de uma tensão de entrada fixa. Este circuito pode utilizar SCRs ou transistores para efetuar este controle.

Os conversores DC/AC são chamados de inversores de frequência, onde sua tensão de entrada é contínua e a tensão de saída é alternada e variável em tensão e

frequência. Atualmente os IGBTs são muito empregados na construção deste tipo de equipamento.

Nota-se que a maioria dos inversores de frequência comerciais contém outro conversor na entrada (um retificador) dotado de um filtro para estabelecer um barramento DC. Apesar disto, todo o equipamento é chamado de inversor de frequência.

Os conversores AC/AC são chamados de cicloconversores e permitem o controle da tensão eficaz e frequência de saída com o uso de SCRs. Porém, devido a limitações na faixa de variação da frequência e na elevada distorção da tensão de saída este conversor é pouco empregado, sendo substituído pelo inversor de frequência. EX: Se a entrada fosse de 60 Hz, a saída variável seria de 0 – 20 Hz.

5.1 Princípio de Funcionamento do Inversor de Frequência

5.1.1 Inversor de Frequência Monofásico

Inversores de frequência são equipamentos utilizados para gerar tensões alternadas (monofásica ou polifásica) a partir de uma tensão contínua, sendo a maioria deles utilizados para controlar a velocidade de motores de indução. Outra aplicação do inversor é na construção de no-breaks ou UPS (*Uninterruptable Power Supplies*), gerando tensões alternadas com valor eficaz e frequência fixa.

A figura 3 mostra a topologia em ponte completa de um inversor de frequência com saída monofásica. Considerando o referencial de polaridade da tensão na carga (Load + e Load-), observa-se que a tensão na carga será positiva (+Vdc) quando apenas as chaves IGBT1 e IGBT4 estiverem ligadas e será negativa (-Vdc) quando apenas as chaves IGBT2 e IGBT3 estiverem ligadas. Note que nesta configuração as chaves IGBT1 e IGBT2 assim como as chaves IGBT3 e IGBT4 nunca poderão ser ligadas

simultaneamente, sob risco de aplicar um curto-circuito na fonte DC, danificando o circuito. Os diodos instalados em antiparalelo com os IGBTs funcionam como um caminho alternativo para a corrente de cargas indutivas quando as chaves principais (IGBTs) são comutadas.

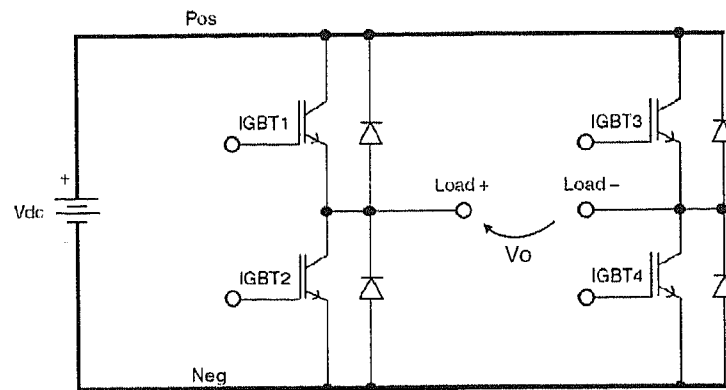


Figura 3 - Topologia em ponte completa de um inversor de frequência com saída monofásica

Desta forma a tensão na carga será quadrada como mostrado na figura 4.

Considerando que a tensão V_{dc} é constante, o valor eficaz da tensão na carga será fixo, podendo-se variar somente a frequência. A variação da frequência é extremamente importante, pois ela será responsável pela variação da velocidade do motor. Porém a variação da tensão eficaz de saída é muito importante para evitar a elevação da corrente de entrada.

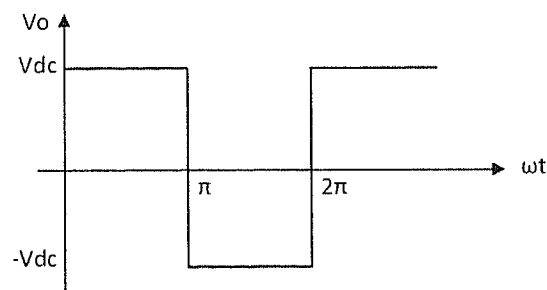


Figura 4 - Tensão de saída do inversor de frequência com saída monofásica em ponte completa

5.1.2 Controle por Deslocamento de Fase

Uma forma de variar a tensão eficaz é a utilização do controle por deslocamento de fase (*phase-shift*) mostrado na figura 5, que apresenta as tensões nos IGBTs e na saída (V_o).

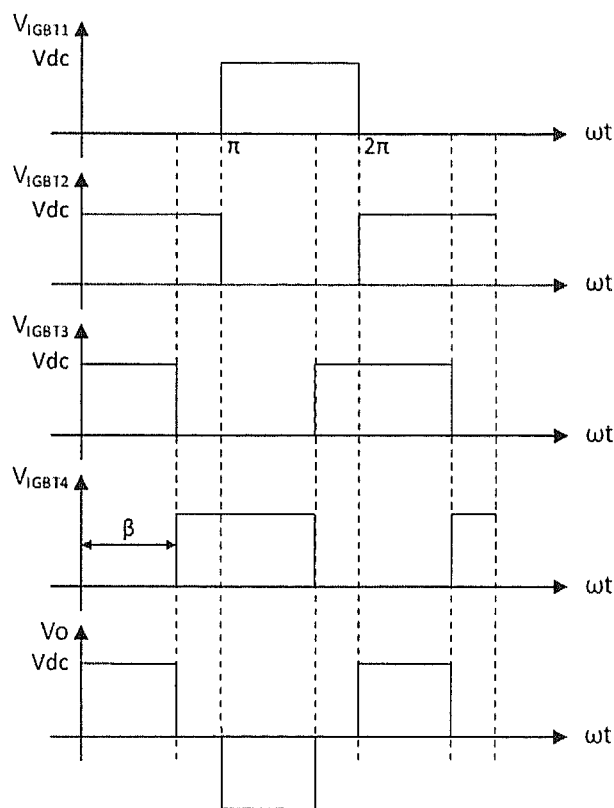


Figura 5 - Tensões nos IGBTs e saída do inversor de frequência com o controle por deslocamento de fase

Observa-se que o regime de trabalho das chaves semicondutoras de cada braço da ponte de IGBTs é de 50 %, ou seja, 50% do período a chave superior do braço está ligada e no restante do período está desligada. A fase das chaves IGBT3 e IGBT4 está deslocada em relação à fase das chaves IGBT1 e IGBT2. A tensão eficaz na saída é

$$V_o = V_{dc} \cdot \sqrt{\frac{\beta}{\pi}}$$

Equação 5-1

Onde β é o ângulo de deslocamento da fase em radianos e V_{dc} é a tensão de entrada.

5.1.3 PWM Senoidal

O conteúdo harmônico de uma onda quadrada é muito elevado. Buscando reduzir este conteúdo harmônico, pode-se utilizar a modulação pela largura de pulso PWM (*Pulse-Width Modulation*), porém, com a largura do pulso variável ao longo do período conforme uma senóide, denominado PWM senoidal.

Conforme mostrado na figura 6, para um inversor monofásico, tem-se a tensão de saída igual à tensão de entrada (E) se a tensão da senóide de referência for maior que a tensão da onda triangular e igual a zero caso contrário. Variando-se a amplitude e a frequência da senóide de referência será possível observar a mesma variação na tensão eficaz e na frequência da saída.

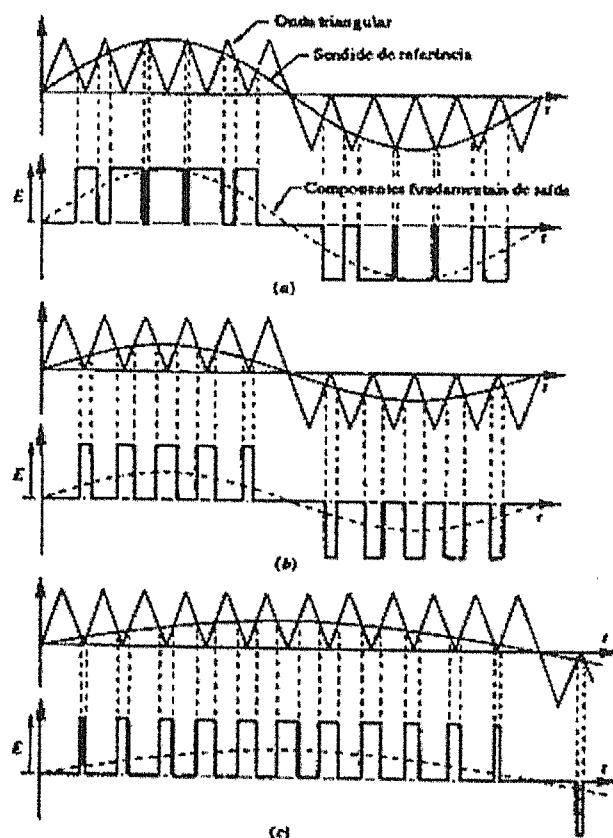


Figura 6 - Formação de uma onda PWM senoidal. (a) Em tensão de saída máxima. (b) Em metade da tensão de saída máxima. (c) Em metade da tensão e metade da frequência.

OBS: No PWM senoidal as harmônicas de menores ordens são atenuadas. Porém, quanto maior a frequência de chaveamento, maiores são as perdas por comutação.

5.1.4 Inversor de Frequência Trifásico

A figura 7 mostra o diagrama de potência do inversor de frequência trifásico comumente utilizado para acionamento de motores de indução.

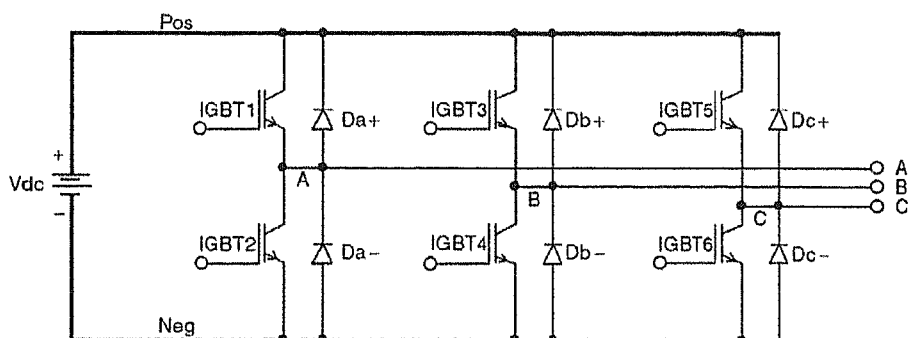


Figura 7 - Diagrama de potência do inversor de frequência trifásico

A fonte V_{dc} em geral é um retificador trifásico não-controlado (veja figura 8) com um filtro capacitivo para reduzir o *ripple*, que recebe as três fases da fonte de alimentação e fornece um barramento DC. Alguns fabricantes permitem o uso de apenas duas fases no retificador de entrada para motores de baixa potência, uma vez que a tensão de pico da saída do retificador será a mesma comparando-se com o caso trifásico. Alguns inversores de baixa potência utilizam retificador monofásico na entrada, disponibilizando saída trifásica.

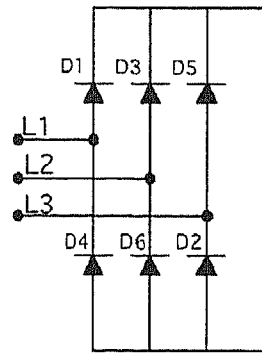


Figura 8 - Retificador trifásico não-controlado

O diagrama de blocos de um inversor de frequência trifásico pode ser visualizado na figura 9. Onde a unidade de controle microprocessada é responsável pelo disparo das chaves semicondutoras do inversor, bem como o monitoramento das tensões e correntes do inversor. Esta unidade proporciona ainda interface com o meio externo, permitindo a parametrização, envio e recebimento de sinais analógicos e digitais.

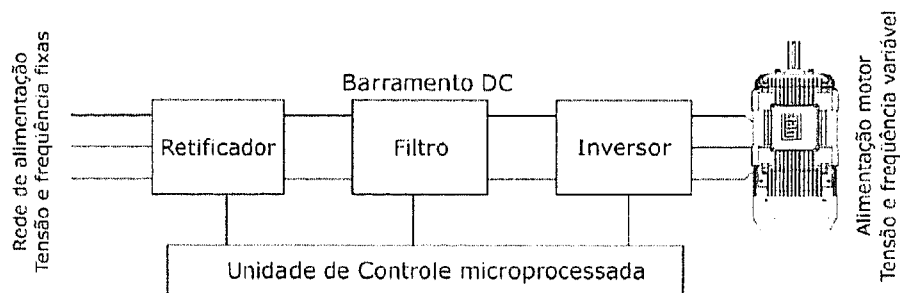


Figura 9 - Diagrama de blocos de um inversor de frequência trifásico

O circuito de potência completo do inversor de frequência está apresentado na figura 10.

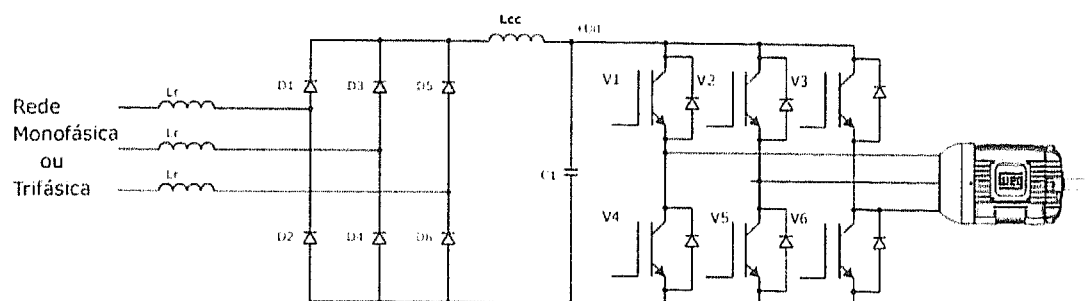


Figura 10 - Circuito de potência completo do inversor de frequência trifásico

5.1.5 Carga do Capacitor de Filtro

Geralmente os inversores de frequência contêm um circuito de pré-carga do capacitor de filtro (ver figura 11) que fica na saída do retificador, pois se trata de uma capacitância elevada submetida a uma tensão também elevada. Este circuito possibilita a carga suave do capacitor, utilizando um resistor série que é curto-circuitado quando a tensão do barramento DC estiver próxima de sua tensão nominal.

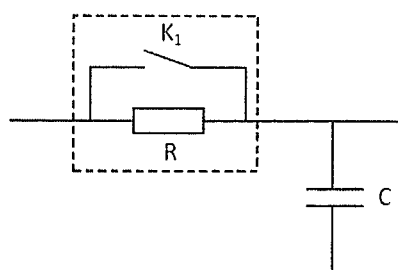


Figura 11 - Circuito de pré-carga do capacitor de filtro

5.1.6 Controle Escalar

O controle escalar de um motor de indução pode ser analisado a partir de seu circuito equivalente, mostrado na figura 12.

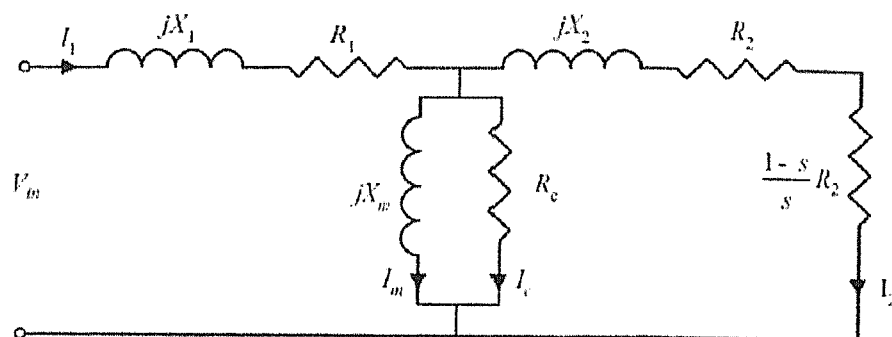


Figura 12 - Circuito equivalente do motor de indução

Onde a resistência série e a reatância de dispersão do estator são R_1 e X_1 , respectivamente. A resistência série e a reatância de dispersão do rotor referidas ao estator são R_2 e X_2 , respectivamente. A reatância de magnetização é X_m . As perdas no núcleo são representadas por R_c .

A velocidade do motor é dada pela equação

$$N = \frac{120 \cdot f \cdot (1 - S)}{p}$$

Equação 5-2

Onde f é a frequência da entrada de alimentação, p é o número de pólos do motor e S é o escorregamento do motor que é dado por

$$S = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e}$$

Equação 5-3

Onde ω_e é a velocidade angular síncrona do campo girante e ω_r é a velocidade angular do rotor, ambas em rad/s. A potência no eixo do rotor é expressa por

$$P_{eixo} = 3 \cdot \frac{1 - S}{S} \cdot R_2 \cdot I_2^2$$

Equação 5-4

Considerando que

$$P_{eixo} = T \cdot \omega_r = T \cdot (1 - S) \cdot \omega_e$$

Equação 5-5

Então

$$T = \frac{3 \cdot |V_{in}|^2 \cdot R_2 \cdot S}{\omega_e \cdot [(S \cdot R_1 + R_2)^2 + S^2 \cdot (X_1 + X_2)^2]}$$

Equação 5-6

Onde o fator 3 foi inserido para considerar o torque gerado pelas três fases. Esta expressão mostra que a variação do torque do motor de indução é possível variando-se o valor da tensão aplicada no estator. A figura 13 mostra o comportamento do torque em relação à velocidade para diferentes tensões.

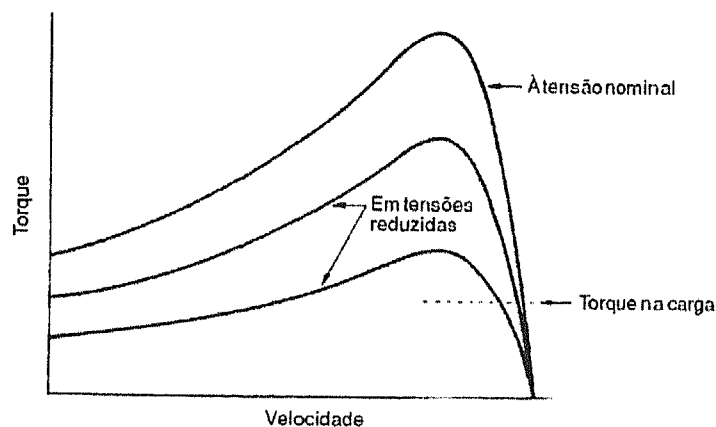


Figura 13 - Torque em relação à velocidade para diferentes tensões

O controle de velocidade é realizado pelo ajuste da tensão de entrada, mantendo-se a frequência fixa. Se a tensão for reduzida, o escorregamento aumenta mantendo o torque. A equação torque mostra sua proporcionalidade como quadrado da tensão. É possível verificar, na figura 13, que a faixa de variação de velocidade é pequena. Este método de controle de velocidade implica em perda da eficiência, aumento nas perdas do rotor podendo sobreaquecer e reduzir o torque máximo do motor, devido ao aumento

do escorregamento com a redução da tensão. Este método é indicado para bombas e ventiladores, pois o torque varia quadraticamente com a velocidade.

Simplificando a expressão do torque, tem-se:

$$T = \frac{3 \cdot |V_{in}|^2 \cdot S}{\omega_e \cdot R_2} = \frac{3 \cdot |V_{in}|^2 \cdot (\omega_e - \omega_r)}{\omega_e^2 \cdot R_2}$$

Equação 5-7

A reatância de magnetização varia linearmente com a frequência. Conseqüentemente, com a tensão de entrada constante, a corrente de entrada aumenta com a diminuição da frequência, aumentando o fluxo magnético, podendo saturar a máquina. Para evitar isto a tensão de entrada deve variar de forma proporcional a frequência, uma vez que em qualquer circuito magnético a tensão induzida é proporcional ao nível de fluxo e a frequência (a partir de $v = d\Phi/dt$).

Podemos deduzir assim que o controle escalar em inversores de frequência é utilizado em aplicações normais que não requerem elevada dinâmica (grandes acelerações e frenagens), elevada precisão e controle de torque. Um inversor com controle escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com uma precisão de até 0,5 % da rotação nominal para sistemas sem variação de carga, e de 3 % a 5 % com variação de carga de 0 a 100 % do torque nominal. Pelo princípio de funcionamento e aplicação, são utilizados na maioria das vezes em motores de indução convencionais sem nenhum sistema de realimentação de velocidade (*encoder* acoplado ao motor) em malha fechada. A faixa de variação de velocidade é pequena, da ordem de 1:10 (Ex: 6 a 60Hz).

Com estas características, o inversor de frequência escalar é a opção mais utilizada em sistemas que não requerem alto desempenho. Este apresenta também um

custo relativo menor quando comparado com outros tipos de inversores mais sofisticados, como por exemplo, o inversor com controle vetorial.

5.1.7 Controle Vetorial

No motor de indução o fluxo magnético e a corrente são dependentes um do outro, sendo ambos estabelecidos pela, e relacionados à, corrente no enrolamento do estator.

Idealmente, o fluxo do rotor estabelecido pela corrente do rotor está em quadratura com o fluxo do estator, gerando torque. Segue modelo simplificado ilustrado na figura 14, com o diagrama fasorial associado.

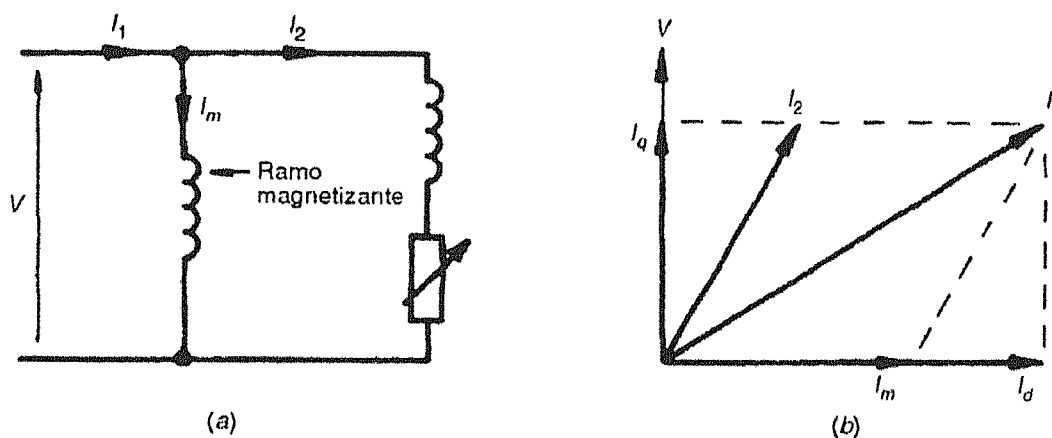


Figura 14 - Controle vetorial. (a) Modelo simplificado do motor de indução. (b) Diagrama fasorial do motor de indução.

O torque desenvolvido é relacionado à componente em fase de I_2 mostrada como I_q e o fluxo é relacionado à corrente I_m modificado pela componente reativa de I_2 para dar a componente mostrada com I_d . O objetivo do controle vetorial, às vezes referido como controle de orientação de campo, é controlar separadamente o módulo das componentes I_d e I_q , de tal forma que o fluxo seja proporcional a I_d , e o torque proporcional a I_q . Controlando independentemente cada componente, temos um sistema

que se iguala ao do motor DC em ambas as respostas, a de regime permanente e a transitória.

Para introduzir o controle vetorial, os parâmetros do motor têm de ser conhecidos e os valores colocados em um conjunto de equações desenvolvido a partir da teoria generalizada da máquina. Dessa maneira, os valores desejados das duas componentes da corrente do estator podem ser traduzidos para determinar os valores instantâneos das correntes dos três enrolamentos do estator.

O controle vetorial representa, sem dúvida, um avanço tecnológico significativo, aliando as performances dinâmicas de um acionamento DC e as vantagens de um motor AC. Porém em alguns sistemas que utilizam controle vetorial é necessário o uso de um *encoder* acoplado ao motor para que se tenha uma melhor dinâmica, o que torna o motor especial. Sendo assim, pode-se dizer que existem dois tipos de utilização de inversores vetoriais: o inversor "*sensorless*" (sem sensores) e o inversor com realimentação por *encoder*.

O inversor com realimentação por *encoder* consegue excelentes características de regulação e resposta dinâmica, como por exemplo:

- ➔ Regulação de velocidade: 0,01 %;
- ➔ Regulação de torque: 5 %;
- ➔ Faixa de variação de velocidade: 1:1000;
- ➔ Torque de partida: 200 % máx.;
- ➔ Torque Máximo (não contínuo): 200 %.

O inversor "*sensorless*" tem um grau de desempenho menor que o anterior, mas é superior ao inversor escalar (V/f). A seguir alguns valores típicos para estes inversores:

- ➔ Regulação de velocidade: 0,3 %;

- Regulação de torque: 5 % (somente para frequência acima de três Hz);
- Faixa de variação de velocidade: 1:100;
- Torque de partida: 150 % máx.;
- Torque Máximo (não contínuo): 150 %.

5.2 Frenagem

5.2.1 Rampa de desaceleração

É possível uma frenagem controlada através de uma rampa de desaceleração quando a frequência aplicada ao motor é reduzida de uma forma controlada, sendo que dessa forma o motor se comporta como um gerador assíncrono e fornece um torque de frenagem. Em outras palavras, quando o escorregamento torna-se negativo, isto é, quando a velocidade síncrona (ou frequência estatórica aplicada pelo inversor) torna-se menor do que a velocidade do motor (velocidade rotórica), o torque gerado pelo motor torna-se negativo e este é frenado. Neste estado o motor opera como gerador com a energia cinética (do motor e da carga) convertida em energia elétrica que é transmitida ao circuito intermediário (DC), através da ponte de transistores.

A potência da frenagem é função do tempo de desaceleração, da inércia das massas em movimento e do torque resistente.

5.2.2 Frenagem Dinâmica (ou reostática) e Regenerativa

Durante a frenagem do motor a polaridade da tensão do barramento DC não é alterada. Entretanto, o sentido da corrente é invertido, ou seja, do motor em direção ao barramento DC. Como esta corrente não pode circular pelos diodos do retificador de entrada, em direção a fonte de alimentação, alguma estratégia deve ser utilizada para

evitar o aumento indevido da tensão do barramento DC, podendo atingir níveis críticos danificando o circuito.

Uma possibilidade é utilizar um banco de resistores instalado em paralelo com o capacitor de filtragem através de um *chopper* que permitirá o controle da energia dissipada e da tensão do barramento DC de acordo com a energia devolvida pelo motor durante a frenagem. A figura 15 mostra o barramento DC com filtro e módulo de frenagem.

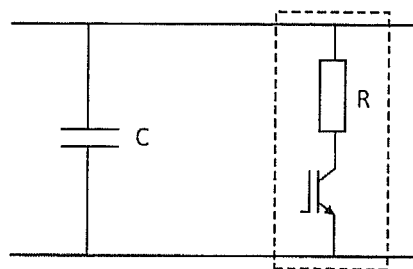


Figura 15 - Barramento DC com filtro e módulo de frenagem

Outra possibilidade é utilizar um conversor regenerativo na entrada do inversor (ver figura 16), direcionando o fluxo de energia do barramento DC à fonte de alimentação, regenerando a energia armazenada no motor e em sua carga, principalmente naquelas com grande inércia.

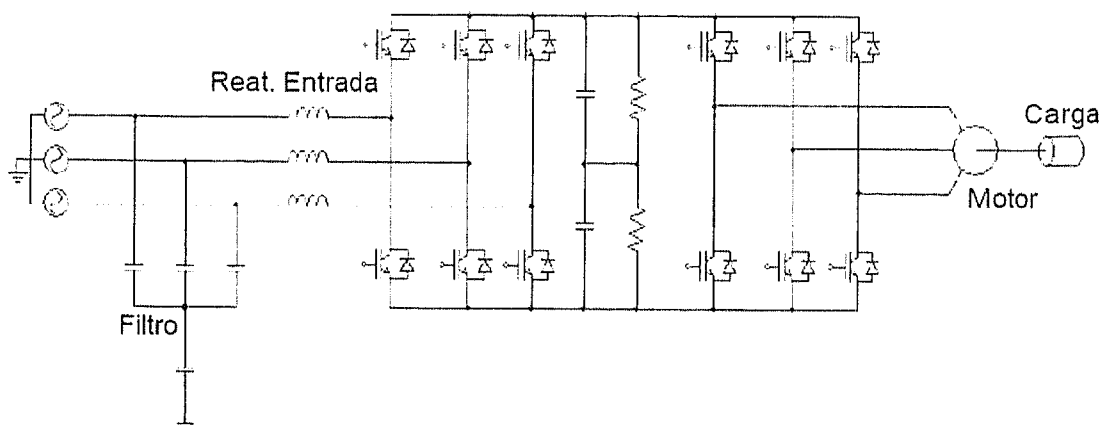


Figura 16 - Conversor regenerativo na entrada do inversor de frequência

Alguns fabricantes permitem que os barramentos DC de vários inversores sejam interligados, possibilitando a troca de energia entre eles, desde que seus ciclos de trabalho sejam distintos, para que as frenagens não sejam simultâneas.

5.2.3 Frenagem por Injeção de Corrente Contínua

Este tipo de frenagem do motor é conseguido aplicando-se no seu estator uma tensão contínua. Esta é obtida pelo disparo dos transistores do inversor, não necessitando de nenhum dispositivo adicional. Este tipo de frenagem é útil quando se deseja a parada do motor (freio) apenas, diferentemente da frenagem reostática que pode ser utilizada para reduzir a velocidade, mas mantendo-se o motor girando. O torque de frenagem pode ser ajustado de acordo com a aplicação, através do tempo de injeção de corrente contínua e do nível de tensão DC aplicada no motor.

5.3 Características do Inversor de Frequência

5.3.1 Compensação de Escorregamento

Cada motor tem seu escorregamento específico dependendo da carga e da temperatura de trabalho. Através desta função, as variações de velocidade de giro do motor, causadas por variações de carga, poderão ser reduzidas; porém, esta compensação não elimina completamente o efeito do escorregamento, pois funciona em malha aberta.

A compensação do escorregamento é empregada para manter a velocidade constante independente de mudanças na carga, atuando como um controle de velocidade em malha aberta. Assim, a frequência de saída do inversor aumenta ou diminui conforme a corrente do motor varia em função do aumento ou diminuição da carga.

5.3.2 Partida Boost

Em caso de partida com carga elevada ou para motores com alto torque de partida (categoria H) esta função poderá ser utilizada. A tensão aplicada no motor é inicialmente elevada até que a carga aumente a velocidade, vencendo a inércia na partida.

5.3.3 Partida com Motor Girando (Flying Start)

Possibilita a partida do motor de forma suave quando este estiver rodando. A captura da frequência de giro do motor evita picos de corrente e impactos mecânicos na carga.

Este recurso se utiliza quando é necessário o religamento do motor mesmo que ele ainda esteja em movimento. Para os inversores comuns sem este recurso, o religamento não é possível devido ao fato de que quando o motor ainda encontra-se girando, existe uma magnetização residual que faz com que seja gerada uma tensão nos seus terminais. Com o religamento do inversor, surgem então picos de corrente transitórias que fazem com que a proteção contra curto-circuito do inversor atue, bloqueando-o.

5.3.4 Parada por Inércia

Neste tipo de parada o conversor retira a alimentação do motor que pára por inércia, portanto o tempo de parada será diferente para velocidades e cargas diferentes.

5.3.5 Rampa "S"

A aceleração/desaceleração por rampa "S" é um recurso no qual se permite obter a aceleração/desaceleração de cargas onde se necessita de uma partida/parada de forma mais suave, não ocorrendo choques mecânicos no sistema.

A rampa "S" pode ser ajustada em função da aplicação através do software do inversor (parâmetros de programação), onde se define os tempos de aceleração e desaceleração e também o percentual de distorção "S" da curva, conforme mostrado na figura 17.

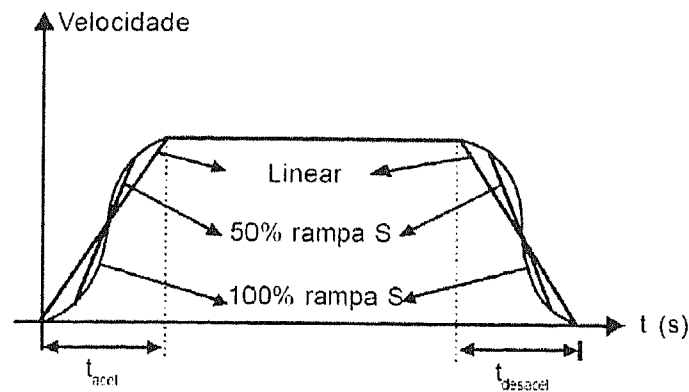


Figura 17 - Rampa "S"

5.3.6 Rejeição de Frequências Críticas

Este recurso se utiliza quando o sistema a ser acionado possui faixas de operação com rotações críticas e que não podem ser utilizadas. Como exemplo, problemas de ressonâncias mecânicas em ventiladores, que causam a vibração excessiva do mesmo, podendo causar a destruição de rolamentos e eixos.

A rejeição de frequências críticas é feita através do ajuste da frequência central e de uma banda em torno desta frequência a qual o inversor não permitirá acionar o motor, conforme mostra a figura 18.

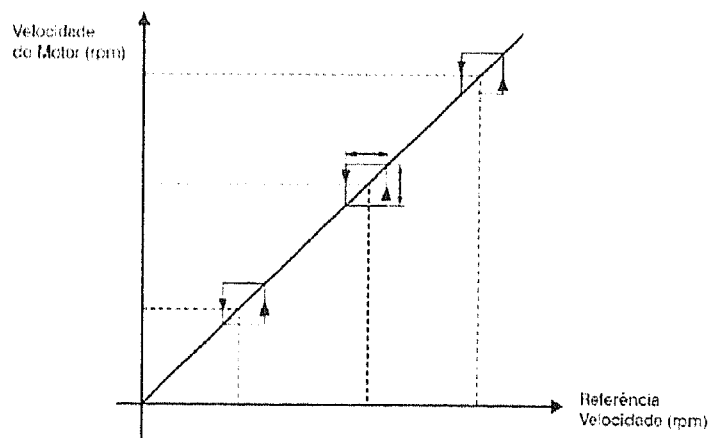


Figura 18 - Rejeição de frequências críticas

Durante a aceleração ou desaceleração do motor, o inversor atua através das rampas ajustadas, passando pelas frequências críticas, chegando aos valores desejados. Caso o valor ajustado seja uma frequência crítica, o inversor irá operar na frequência imediatamente acima ou abaixo do limite imposto.

5.3.7 Enfraquecimento de Campo

Um motor padrão para operar em rede de frequência de 50 ou 60 Hz pode girar a frequências mais altas quando alimentado por um conversor de frequência. A velocidade máxima depende do seu balanceamento mecânico e dos rolamentos. Neste caso, como o motor funcionará com enfraquecimento de campo, mostrado graficamente na figura 19, a máxima velocidade estará limitada pelo torque disponível do motor e pela máxima velocidade periférica das partes girantes do motor (ventilador, rotor, mancais).

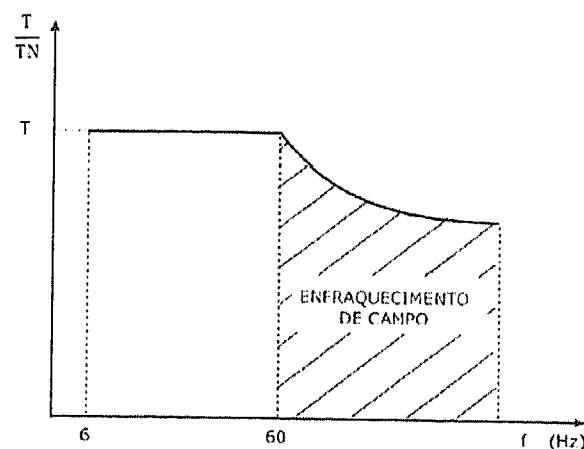


Figura 19 - Enfraquecimento de campo

5.4 Topologias de Inversores Regenerativos com Corrente de Entrada Senoidal

Esta categoria tem como alvo as aplicações onde o cliente vai pagar principalmente pela capacidade regenerativa, enquanto a corrente de entrada senoidal é apenas um benefício adicional de ter um estágio *front-end* ativo totalmente controlado. Estas topologias são:

5.4.1 Conversor Back-To-Back

O conversor *back-to-back* VSI (ver figura 20) oferece o melhor aproveitamento dos semicondutores, com baixas perdas de condução, mas maiores perdas de comutação e requer um grande indutor *boost* porque cada perna do conversor chaveia a tensão do barramento DC.

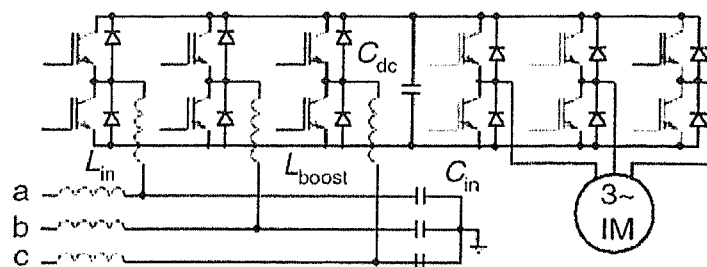


Figura 20 - Conversor *back-to-back*

Os capacitores do barramento DC, que normalmente são eletrolíticos, devem ser substituídos por capacitores de filme, devido ao fato de terem uma densidade mais baixa, eles também têm que ser reduzidos, o que deixa o controle do conversor mais complexo.

O desempenho no lado da rede é mostrado a seguir, onde as correntes de linha, as correntes do indutor *boost*, a tensão do barramento DC e a tensão e corrente (amplificada 10 vezes, para facilidade de apresentação) de entrada são mostradas em duas situações, são elas:

- A) Quando o *front-end* ativo está realizando uma inversão de potência em condições normais da rede (figura 21);

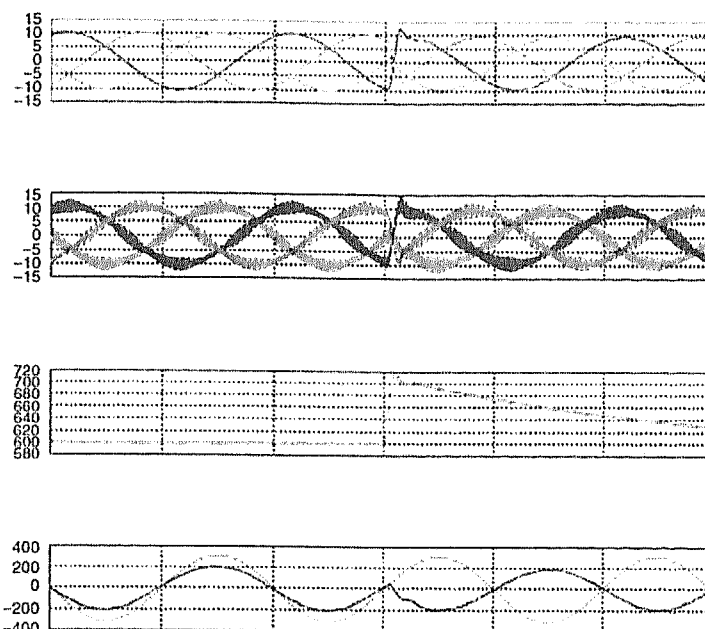


Figura 21 - (Situação (A)) Correntes de linha (A), correntes do indutor *boost* (A), tensão do barramento DC (V), tensão (V) e corrente (A, amplificada 10 vezes, para facilidade de apresentação) de entrada respectivamente, durante uma inversão de potência do *front-end* ativo em condições normais da rede

B) Sobre 5% de desbalanceamento na tensão de alimentação (figura 22);

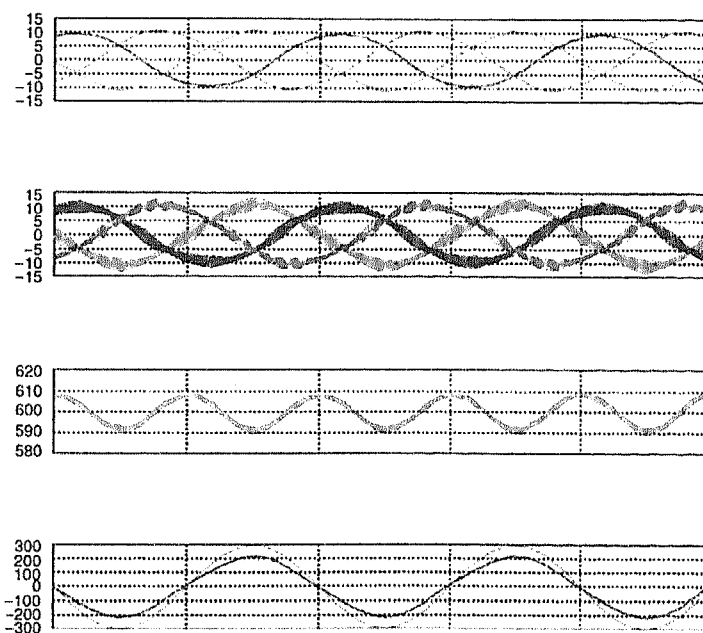


Figura 22 - (Situação (B)) Correntes de linha (A), correntes do indutor *boost* (A), tensão do barramento DC (V), tensão (V) e corrente (A, amplificada 10 vezes, para facilidade de apresentação) de entrada respectivamente, com 5% de desbalanceamento na tensão de alimentação

O desempenho é excelente, pois é totalmente controlado enquanto o desequilíbrio causa uma ondulação de tensão no barramento DC.

5.4.2 Conversor Matricial

O Conversor Matricial (ver figura 23) é capaz de fornecer correntes de entrada senoidais, fluxo de potência bidirecional e não precisa de volumosos capacitores no barramento DC.

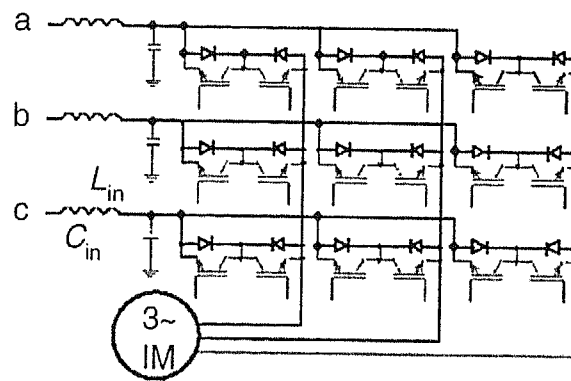


Figura 23 - Conversor matricial

É constituído por nove *switches* bidirecionais que conectam qualquer das fases de entrada com qualquer das fases de saída. Suas principais desvantagens são seu baixo ganho de tensão que é inferior ao unitário (0,86), uma baixa imunidade quanto a distúrbios da rede elétrica, e um alto número de dispositivos de potência (18 IGBTs e 18 diodos).

O desempenho nos lados da entrada e saída são mostrados a seguir, onde as correntes de linha, a tensão do barramento DC (e sua média), as correntes da carga, e a tensão de saída entre fase e neutro (com e sem filtro RC) são mostradas em duas situações, são elas:

A) Quando em condições normais da tensão de alimentação (figura 24);

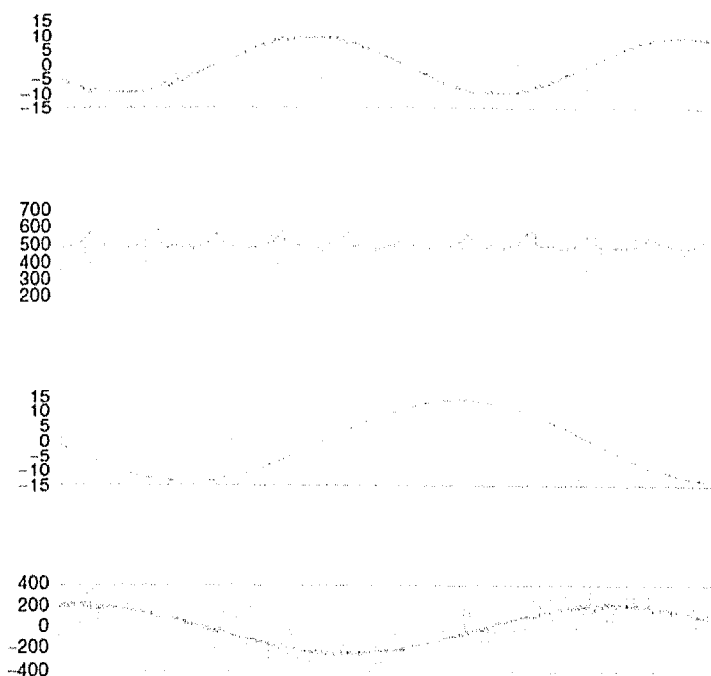


Figura 24 - (Situação (A)) Correntes de linha (A), tensão do barramento DC (e sua média) (V), correntes da carga (A), tensão de saída entre fase e neutro (com e sem filtro RC) (V) respectivamente, em condições normais da tensão de alimentação

B) Com 5% de desbalanceamento da tensão de alimentação (figura 25);

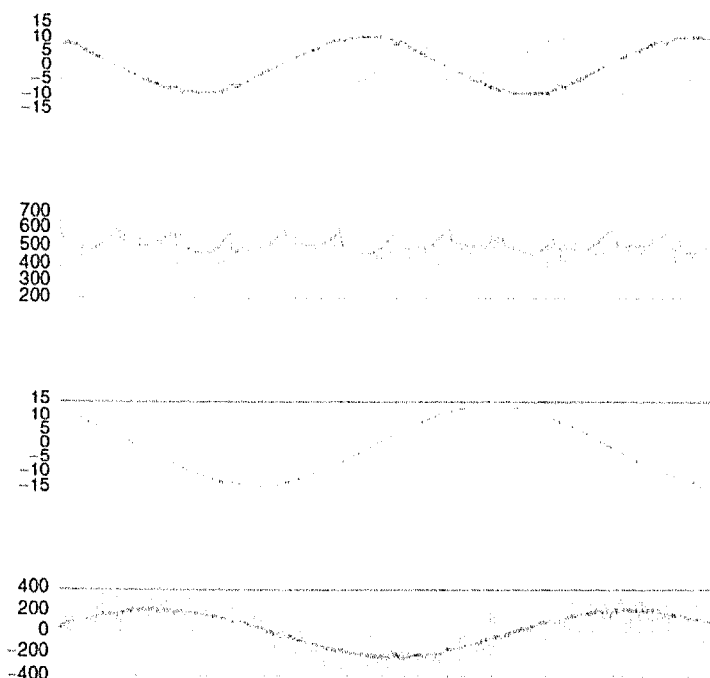


Figura 25 - (Situação (B)) Correntes de linha (A), tensão do barramento DC (e sua média) (V), correntes da carga (A), tensão de saída entre fase e neutro (com e sem filtro RC) (V) respectivamente, com 5% de desbalanceamento na tensão de alimentação

Nota-se que é possível a operação de todas as topologias DPEC mesmo com um desbalanceamento na tensão de alimentação, porém, neste caso a qualidade da corrente de entrada bem como a capacidade da tensão de saída é afetada, pois não há nenhuma reserva de energia no fluxo principal de potência.

Ao ajustar o índice de modulação do estágio inversor, a fim de compensar a tensão média do barramento DC, que não é constante, é possível produzir a tensão de saída equilibrada. Ao impor um ângulo de referência do vetor de corrente de entrada, é possível manter a qualidade das mesmas sob controle.

5.4.3 O Conversor DPEC Dois Estágios

O conversor DPEC dois estágios (ver figura 26) funcionalmente opera de forma idêntica ao conversor matricial estágio único controlado por uma abordagem indireta da modulação.

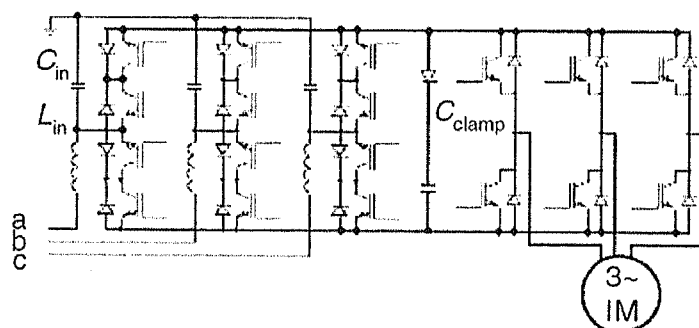


Figura 26 - Conversor DPEC dois estágios

O desempenho é idêntico ao mostrado nas figuras 24 e 25 (mesmo que o matricial). Ele tem as seguintes vantagens sobre o conversor matricial: é possível obter topologias econômicas com apenas 15 ou nove IGBTs, a ZCS (corrente igual a zero durante o instante do chaveamento) no estágio retificador pode ser obtida quando o estágio inversor produz tensão de 0V, e somente um diodo e um capacitor montados no

barramento DC entre os dois estágios são necessários para minimizar os efeitos produzidos pelas correntes das cargas indutivas.

5.4.4 O Conversor DPEC Dois Estágios com RB-IGBTs no Estágio Retificador

O conversor DPEC dois estágios com RB-IGBTs no estágio retificador (ver figura 27) tem o funcionamento e desempenho idênticos aos da topologia vista anteriormente, enquanto as perdas por condução são menores por causa da baixa queda de tensão nos RB-IGBT durante o estado ligado.

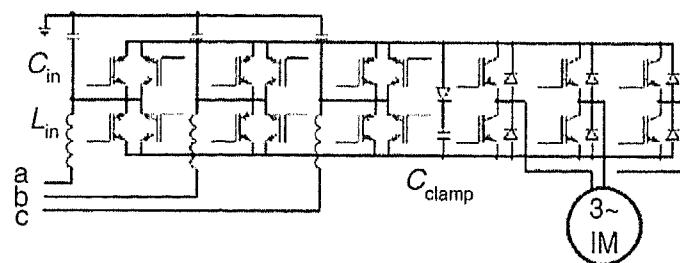


Figura 27 - Conversor DPEC dois estágios com RB-IGBTs no estágio retificador

6 Funcionamento da Plataforma de Ensaio

Este capítulo abordará o funcionamento da plataforma de ensaios, falando desde o diagrama geral, seus quadros de saída de energia, seus circuitos de controle e potência, seus circuitos de aquisição de dados, assim como a interface entre as antigas e novas instalações.

Para isso será utilizado o esquema elétrico criado para a montagem da bancada de ensaios, de forma que a apresentação seja a mais clara possível.

6.1 Diagrama Geral

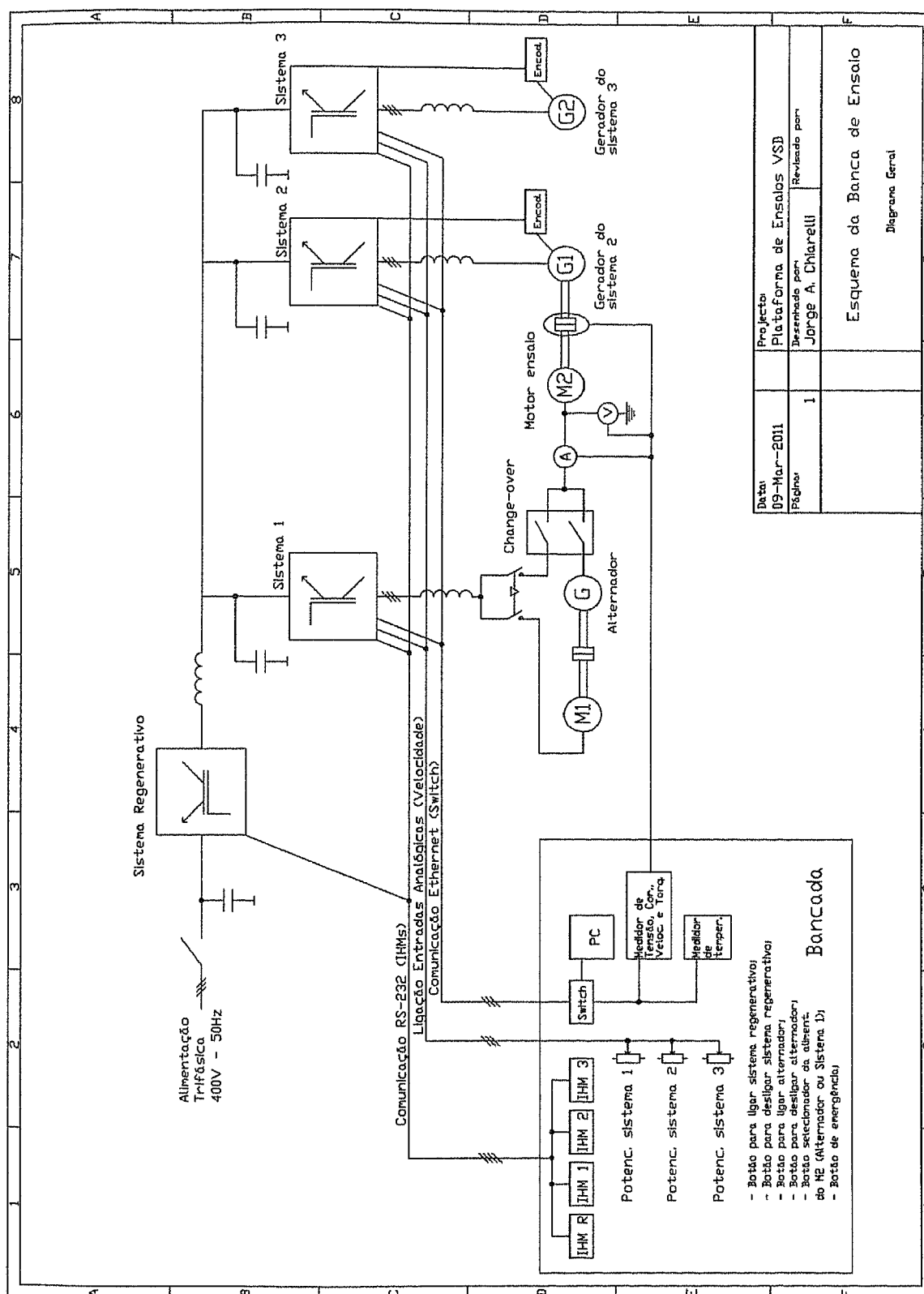


Figura 28 – Esquema da bancada de ensaios – Diagrama geral da plataforma

A figura 28 representa o diagrama geral da plataforma.

Consiste em um sistema trifásico com tensão de alimentação de 400Vac – 50Hz, possuindo quatro módulos principais de potência, sendo o primeiro formado pelo inversor regenerativo, e os demais pelos sistemas 1, 2 e 3.

O inversor regenerativo é responsável pela energização do barramento DC (650V) que por sua vez alimenta os sistemas 1, 2 e 3 que são os inversores de frequência.

O sistema 1 é o sistema responsável pela alimentação do motor em ensaio (M2), podendo alimentá-lo de duas formas, são elas:

- ➔ Ligado diretamente ao motor em questão, neste caso a forma de onda da tensão aplicada aos enrolamentos do motor teria a configuração PWM senoidal, podendo assim trazer alguns valores incorretos para os dados do ensaio;
- ➔ Ligado a um motor (M1) acoplado a um alternador (G) que por sua vez produzirá uma forma de onda senoidal, com a possibilidade de ajuste de frequência e amplitude que agora sim, alimentará o motor em ensaio.

O sistema 2 é constituído por um inversor de frequência programado para operar com sua velocidade igual à zero, fazendo então um controle de torque. Pois é nesse sistema que está ligado o motor que servirá como carga (G1). Este sistema está configurado para operar com controle vetorial, sendo realimentado por um *encoder*.

O sistema 3 tem basicamente as mesmas características e funções que o sistema 2, com a diferença de ser um sistema para motores de menor potência, pois a plataforma não conseguiria um controle de torque aceitável no caso de motores com capacidade nominal de corrente inferior a 25% da capacidade nominal do inversor.

A bancada dispõe dos itens de controle e monitoramento necessários para o ensaio, seguem alguns desses principais itens:

- ➔ IHMs ligadas aos quatro inversores (RS-232);
- ➔ Potenciômetros ligados às entradas analógicas dos sistemas 1 (velocidade), 2 (torque) e 3 (torque);
- ➔ Computador ligado aos sistemas 1, 2 e 3 (ethernet) para futuro desenvolvimento de software supervisorio;
- ➔ Comando do *change-over*, responsável pela mudança da fonte de alimentação do motor em ensaio;
- ➔ Aparelho de medição de tensão, corrente, torque e velocidade do motor em ensaio;
- ➔ Aparelho leitor de sondas de temperatura como PT100 e termopares.

6.2 Quadro de Saída

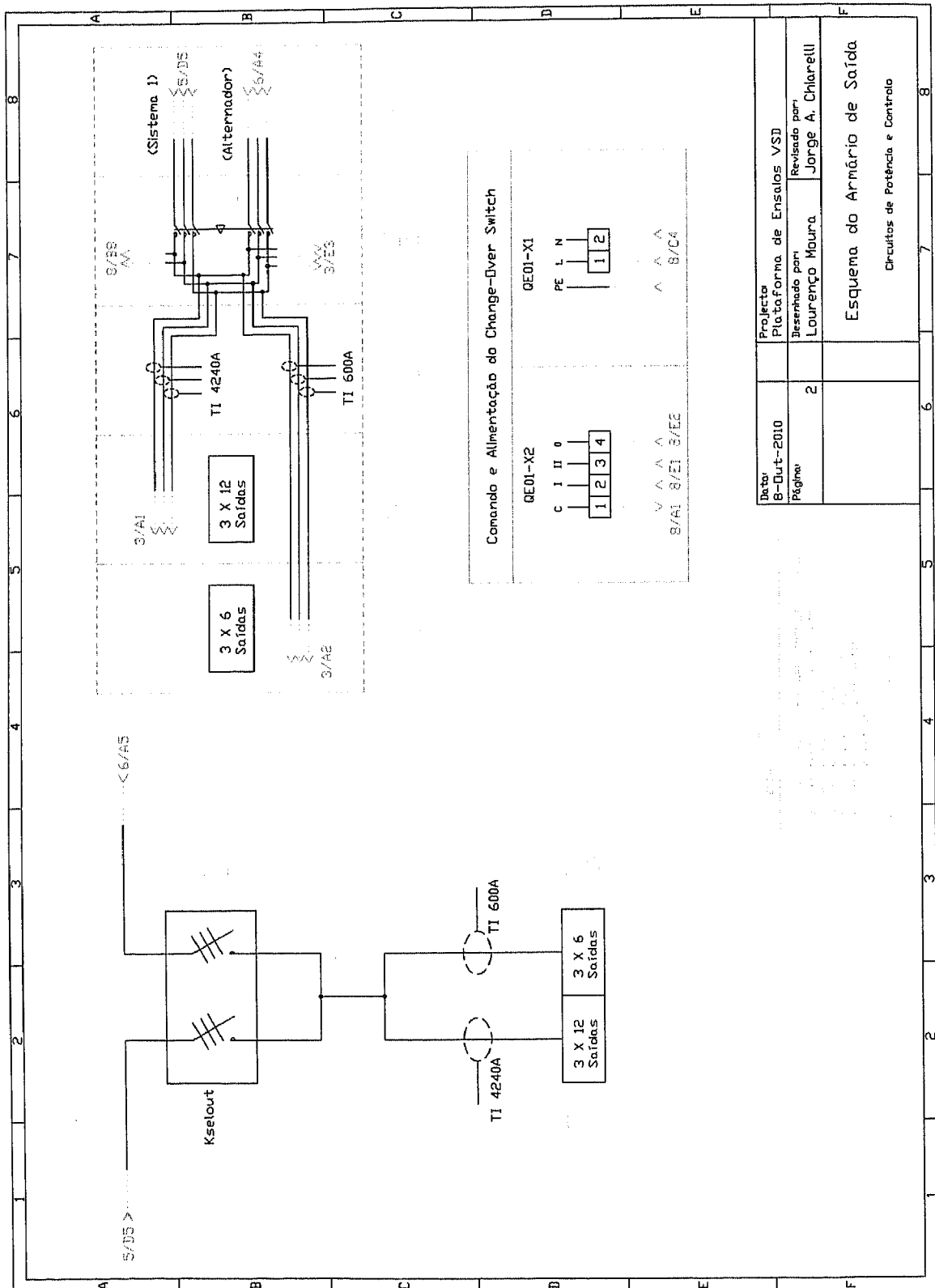


Figura 29 – Esquema do quadro de saída – Circuitos de potência e controle

A figura 29 representa o quadro usado para alimentar o motor em ensaio.

Como já descrito, o *change-over* possui uma das entradas ligada diretamente à saída do sistema 1 e outra entrada ligada ao barramento de saída do alternador. Porém suas saídas estão em comum, estando ligadas às tomadas que fornecerão energia ao motor em ensaio.

Devemos notar que a este barramento de saída estão ligados dois conjuntos de TCs, usados para medição das correntes de saída. O primeiro conjunto tem uma capacidade de medição de até 4240A e sua corrente máxima de saída em 0,7A ($K=6000$), já o segundo conjunto tem uma capacidade de medição de até 600A e sua corrente máxima saída em 0,6A ($K=1000$). Foi necessária a instalação desses dois conjuntos para que a escolha dos TCs pudesse ser feita de acordo com a corrente nominal do motor em ensaio, reduzindo assim os erros de leitura.

Os TCs utilizados são do tipo *Zero-flux*, isto é, são TCs com um alto nível de precisão de medição. Outra característica deste tipo de sistema de medição é a possibilidade de medição de correntes com frequências de até 50kHz (o que não acontece em TCs convencionais), característica muito importante uma vez que o motor em ensaio pode ser alimentado com uma tensão com a forma de onda PWM senoidal de frequência de 2,5kHz.

No próprio *change-over* estão ligados medidores de tensão, um deles monitora apenas o valor eficaz da tensão de linha, pois é usado para proteção contra sobretensão. O outro monitora as tensões das três fases, pois este é usado para medição dos dados do ensaio.

Este quadro foi projetado e executado por uma entidade externa à WEGeuro. As integrações com a plataforma, assim como os testes, foram feitas pela WEGeuro com a participação do autor.

6.3 Circuito de Seleção dos TCs

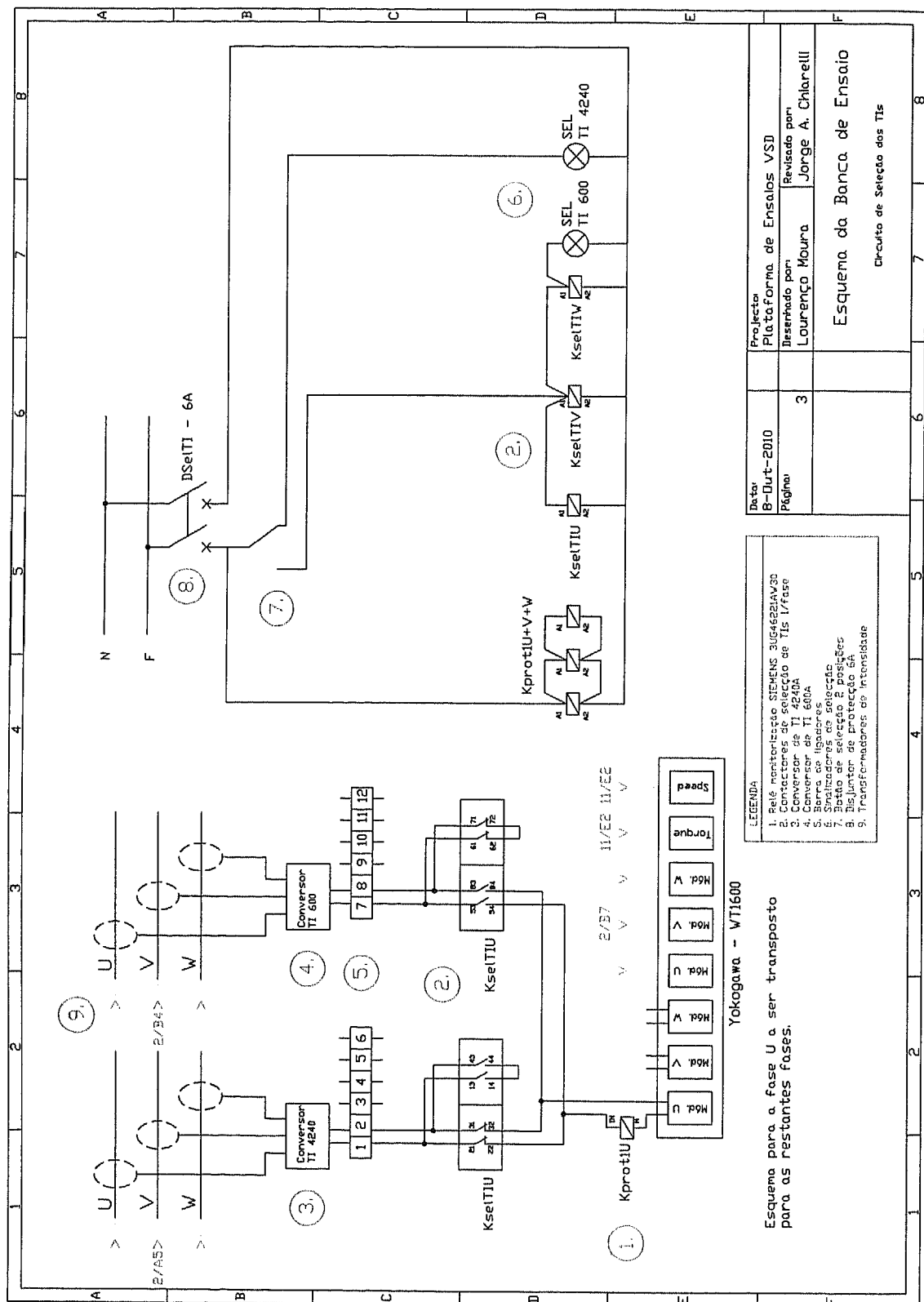


Figura 30 – Esquema da bancada de ensaios – Circuito de seleção dos TCs

A figura 30 representa o circuito de seleção dos TCs.

Na parte direita da figura podemos verificar o funcionamento do circuito de comando da seleção.

Se mantivermos a chave seletora (7) na posição conforme mostrada, os contactores de seleção (KselTI) permanecem desligados, fazendo com que a corrente que passa pelo instrumento de medição seja a corrente fornecida pelo TC de 4240A. Devemos notar que durante este modo de operação, o circuito do TC de 600A permanece fechado, possibilitando assim, o fluxo normal de corrente do TC.

Se alterarmos a posição da chave seletora, os contactores de seleção são ligados, fazendo com que a corrente que passa pelo instrumento de medição seja a corrente fornecida pelo TC de 600A, também com o cuidado de manter o circuito do TC que não está em uso fechado.

Podemos verificar que no circuito de comando estão alimentados três relés (Kprot1), eles são de sobrecorrente e estão em série com os TCs, servem de proteção para o motor em ensaio, o funcionamento dos mesmos está detalhado nas páginas a seguir.

Nesta figura está representado apenas o esquema referente às correntes da fase “U”, sendo que o mesmo deve ser aplicado às demais fases.

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.4 Seleção da Excitação do Alternador

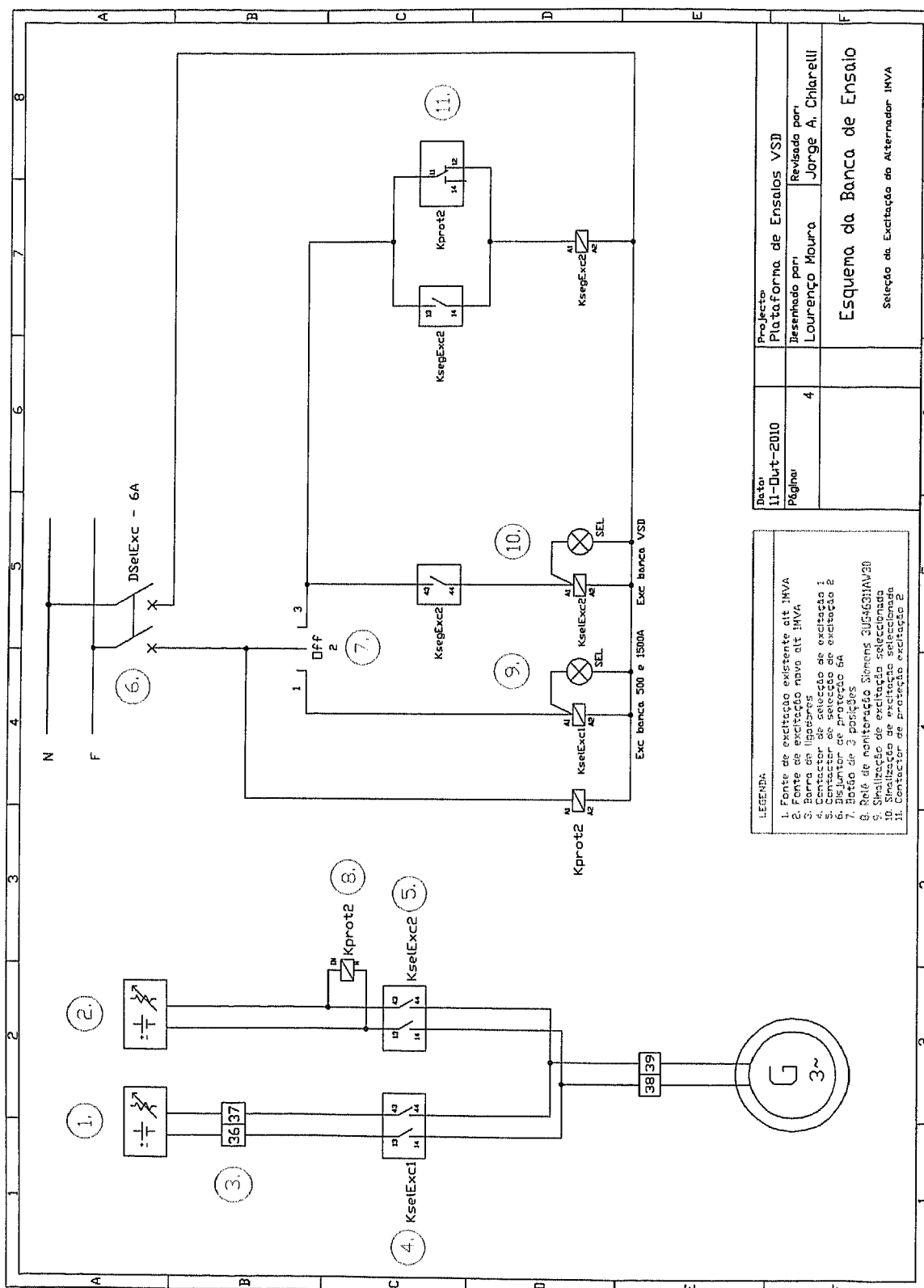


Figura 31 – Esquema da bancada de ensaios – Seleção da excitação do alternador

A figura 31 representa o circuito de seleção da fonte de excitação do alternador.

O alternador pode ser excitado através de duas fontes de alimentação distintas, sendo que a primeira se localiza em outra bancada, pertencente a uma plataforma de ensaios já existente, e a segunda se localiza na própria bancada.

Se mantivermos a chave seletora (7) na posição conforme mostrada, não existe nenhuma fonte de tensão ligada à excitatriz do alternador, esta condição é necessária para que o contactor de saída do alternador possa ser ligado, conforme funcionamento será mostrado nas páginas a seguir.

Se alterarmos a chave seletora para a posição 1, o contactor KselExc1 será ligado, ligando assim a fonte 1 à excitatriz do alternador.

Se alterarmos a chave seletora para a posição 3, o contactor KselExc2 apenas será ligado caso o contactor KsegExc2 esteja ligado, o mesmo somente ligará caso a tensão de saída da fonte 2 esteja abaixo de um valor pré-determinado pelo relé de proteção de tensão Kprot2, que no caso é de 1,5V. Trata-se de uma garantia que o alternador será excitado de forma gradativa. Sendo que a mesma segurança com relação à fonte 1 está empregada na bancada que já está em uso.

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.5 Esquema do Quadro VSD

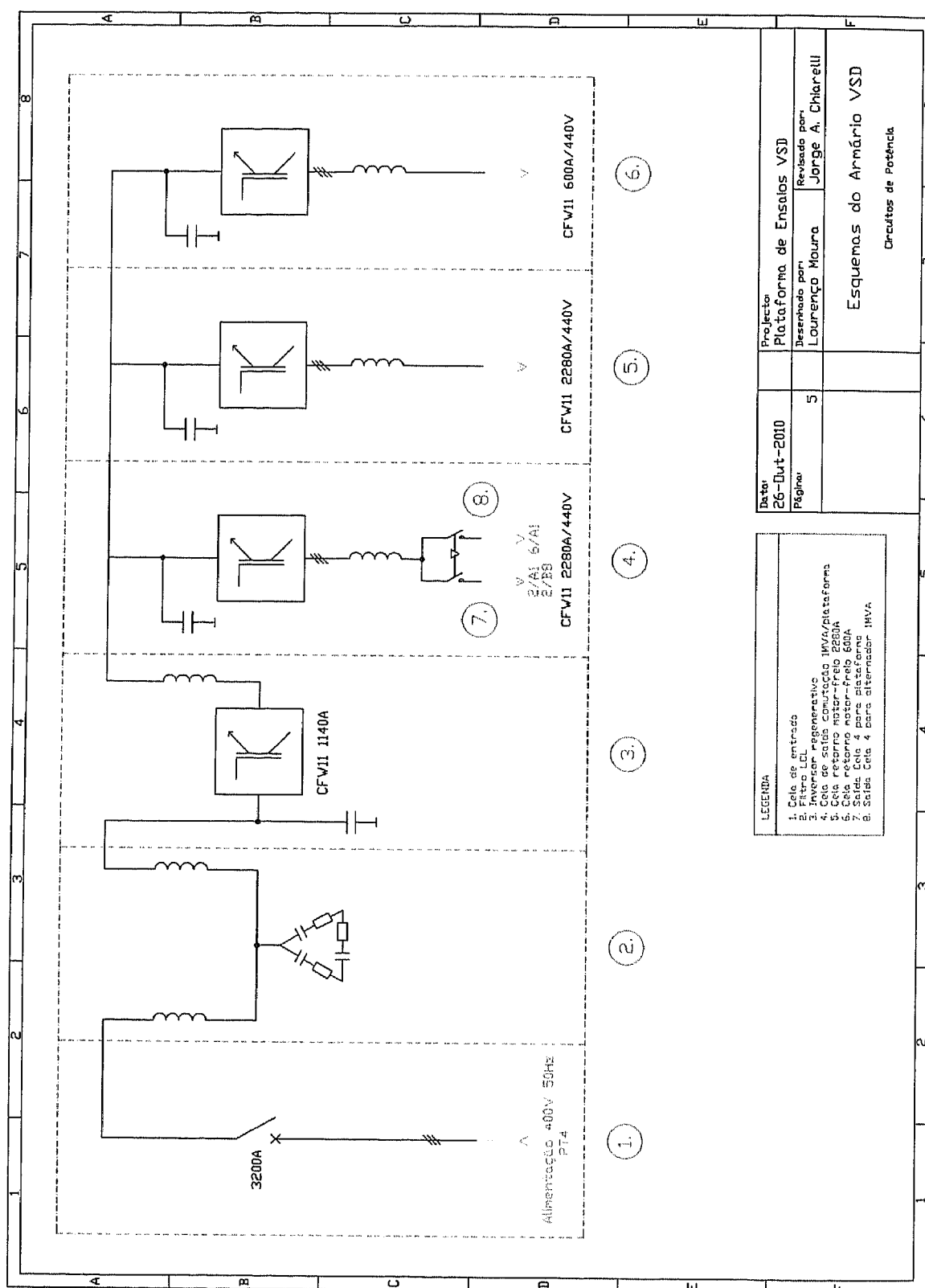


Figura 32 – Esquema do quadro VSD – Circuitos de potência

A figura 32 representa o esquema do quadro em que estão localizados os módulos de potência.

Seguem abaixo os principais itens que compõem o quadro:

- ➔ Entrada de alimentação, disjuntor aberto ABW 3200A;
- ➔ Filtro LCL;
- ➔ Inversor regenerativo;
- ➔ Saída do sistema 1, comutação entre alternador e motor em ensaio;
- ➔ Saída do sistema 2;
- ➔ Saída do sistema 3.

Este quadro foi projetado e executado por uma entidade externa à WEGeuro (WEG Automação). As integrações com a plataforma, assim como os testes, foram feitas pela WEGeuro com a participação do autor.

6.6 Comutação Y/ Δ Alternador

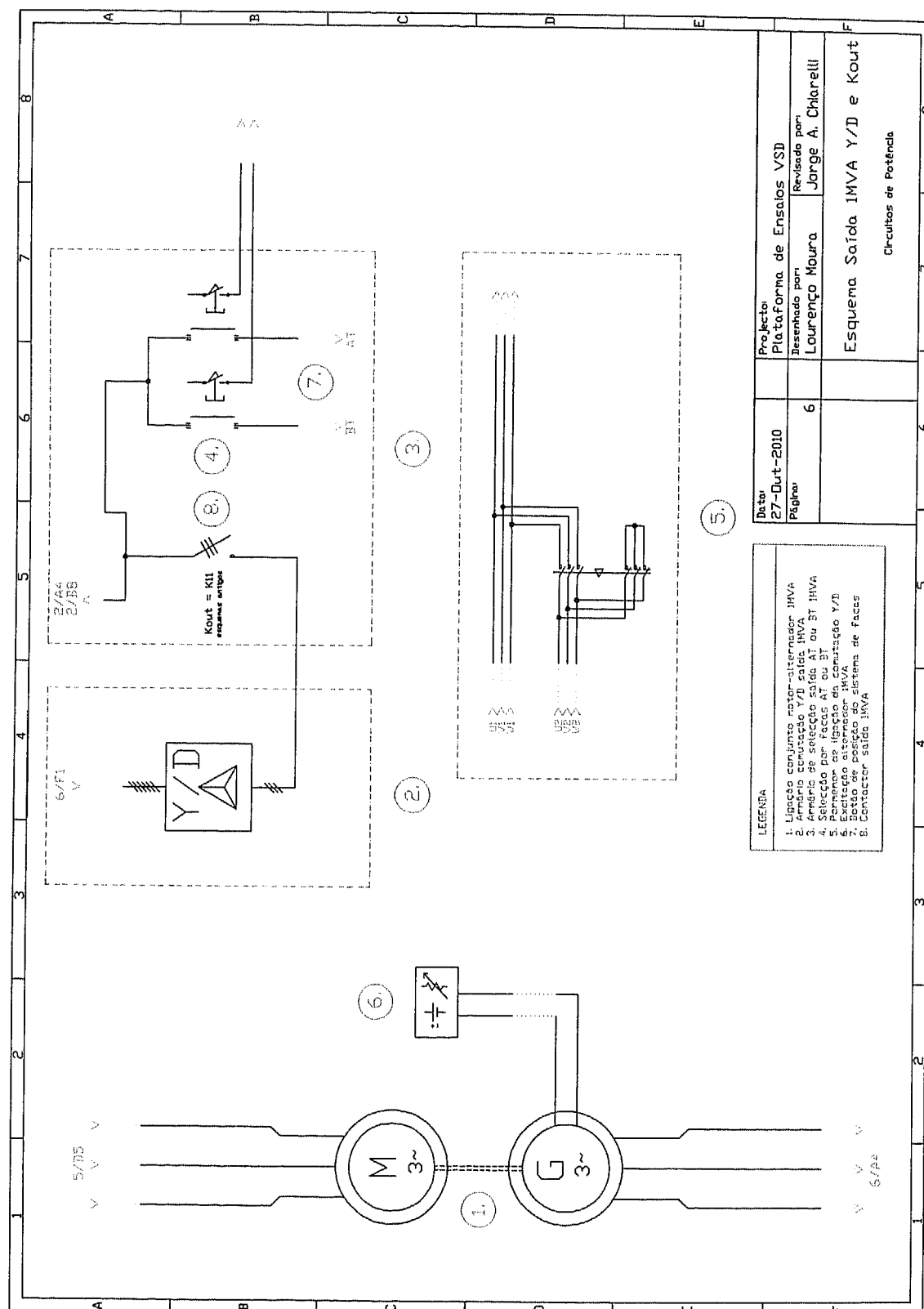


Figura 33 – Esquema de saída do alternador – Circuitos de potência

A figura 33 representa o esquema de saída do alternador, incluindo sua forma de ligação e suas possibilidades de saída.

Quando optarmos por alimentar o motor em ensaio através do alternador, podemos ainda escolher o modo de ligação do mesmo, Y (690V) ou Δ (400V).

Para que a saída do alternador seja ligada ao *change-over*, devemos ligar o contactor Kout, cujos detalhes do acionamento estão descritos na próxima secção.

O contactor Kout está ligado a três saídas distintas, são elas:

- ➔ Uma das entradas do *change-over* (saída 2/A4 e 2/B8);
- ➔ Tomadas já existentes na instalação (saída BT);
- ➔ Transformador usado para ensaio em motores de média tensão (saída AT).

Este módulo da plataforma foi projetado pela WEGeuro sem a participação do autor. A execução, integração e testes foram feitos pela WEGeuro com a participação do autor.

Obs.: A opção de comutação entre Y/ Δ assim como a possibilidade de média tensão na saída, ainda não está presente na atual instalação devido à falta de tempo hábil para a realização das tarefas. Infelizmente este é um item que não foi concluído com a presença do autor. Pois outros passos que foram estipulados como mais importantes foram passados à frente. Diante desta circunstância, a plataforma está apta a ensaiar apenas motores com tensões de até 400V.

6.7 Contactor do alternador, Emergência e Sistema Regenerativo

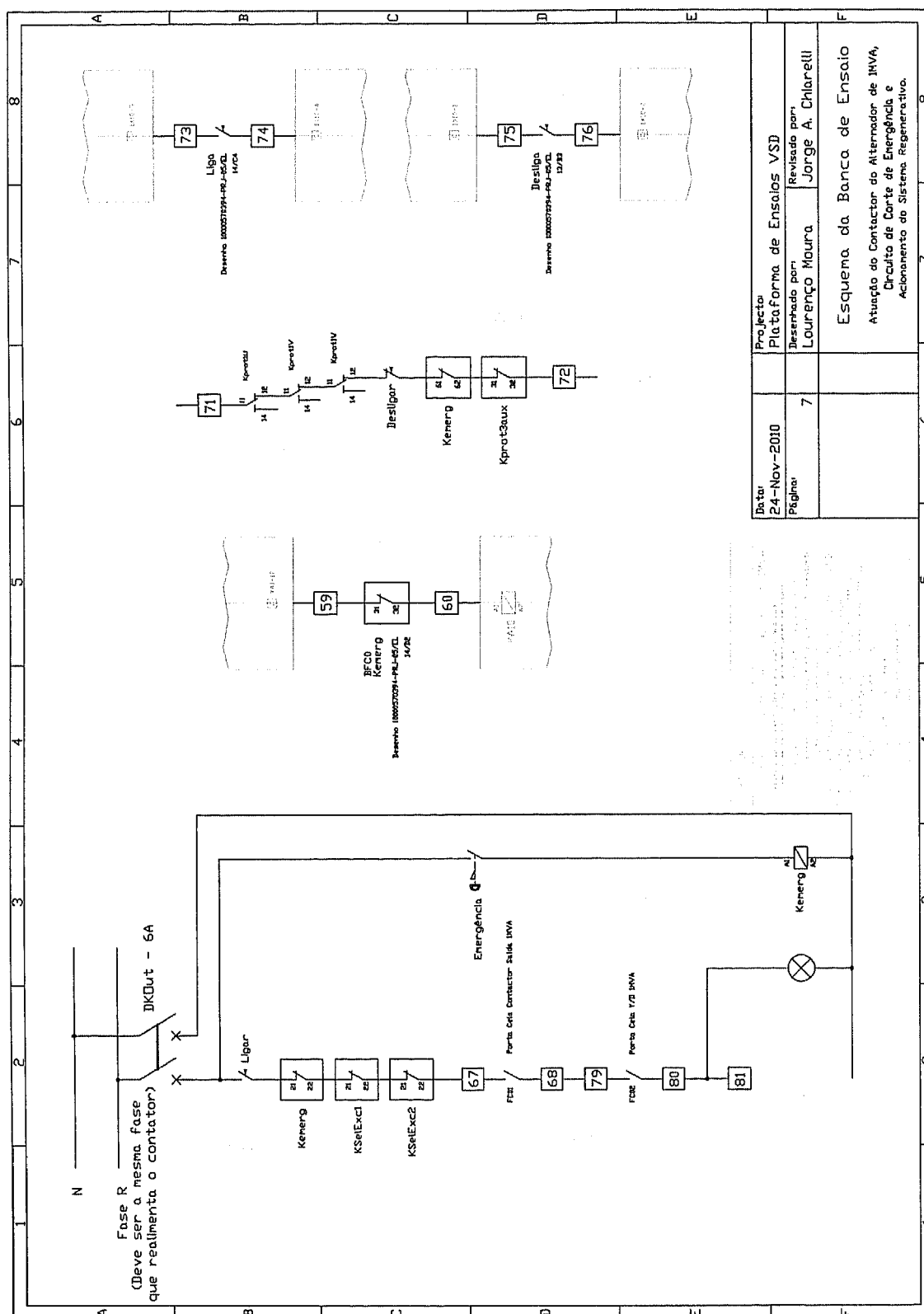


Figura 34 – Esquemas da bancada de ensaios – Contactor do alternador, circuito de corte de emergência e acionamento do sistema regenerativo

A figura 34 representa o circuito de atuação do contactor do alternador, assim como o circuito de corte de emergência e o acionamento do sistema regenerativo.

Para que o contactor do alternador possa ser ligado, algumas medidas de segurança tiveram que ser tomadas, são elas:

- ➔ Contatos normalmente fechados dos contactores de seleção de excitação para criarmos a garantia de um aumento gradativo da tensão de saída do quadro;
- ➔ *Microswitchs* instalados nas portas das celas onde estão localizados o contactor Kout e a comutação entre Y/ Δ ;
- ➔ Como o acionamento do contactor Kout foi ligado em paralelo com o acionamento já existente, não foi necessária a criação da realimentação do mesmo. Porém a fase pertencente ao novo acionamento, deve ser a mesma do acionamento já existente para que não haja um curto-circuito durante o pressionar do botão “Ligar”.

Existem algumas situações em que o contactor Kout pode ser desligado forçadamente, são elas:

- ➔ Ocorra sobrecorrente em alguma das fases de saída (monitoramento feito pelos relés Kprot1);
- ➔ Ocorra uma sobretensão no barramento do *change-over* (monitoramento feito pelo relé Kprot3, descrito na próxima secção).

Ao pressionarmos o botão “Emergência” fazemos com que o contactor Kemerg seja acionado, de tal forma que as seguintes ações sejam tomadas:

- ➔ Desligamento do inversor regenerativo através da abertura do circuito que alimenta o contactor KA10 (pertencente ao quadro VSD);
- ➔ Desligamento do contactor Kout.

O sistema regenerativo pode ser ligado e desligado pela própria bancada de ensaios através dos botões “Liga” e “Desliga”, uma vez que o quadro VSD está preparado para ligações remotas.

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.8 Atuação do *Change-over* do Quadro de Saída

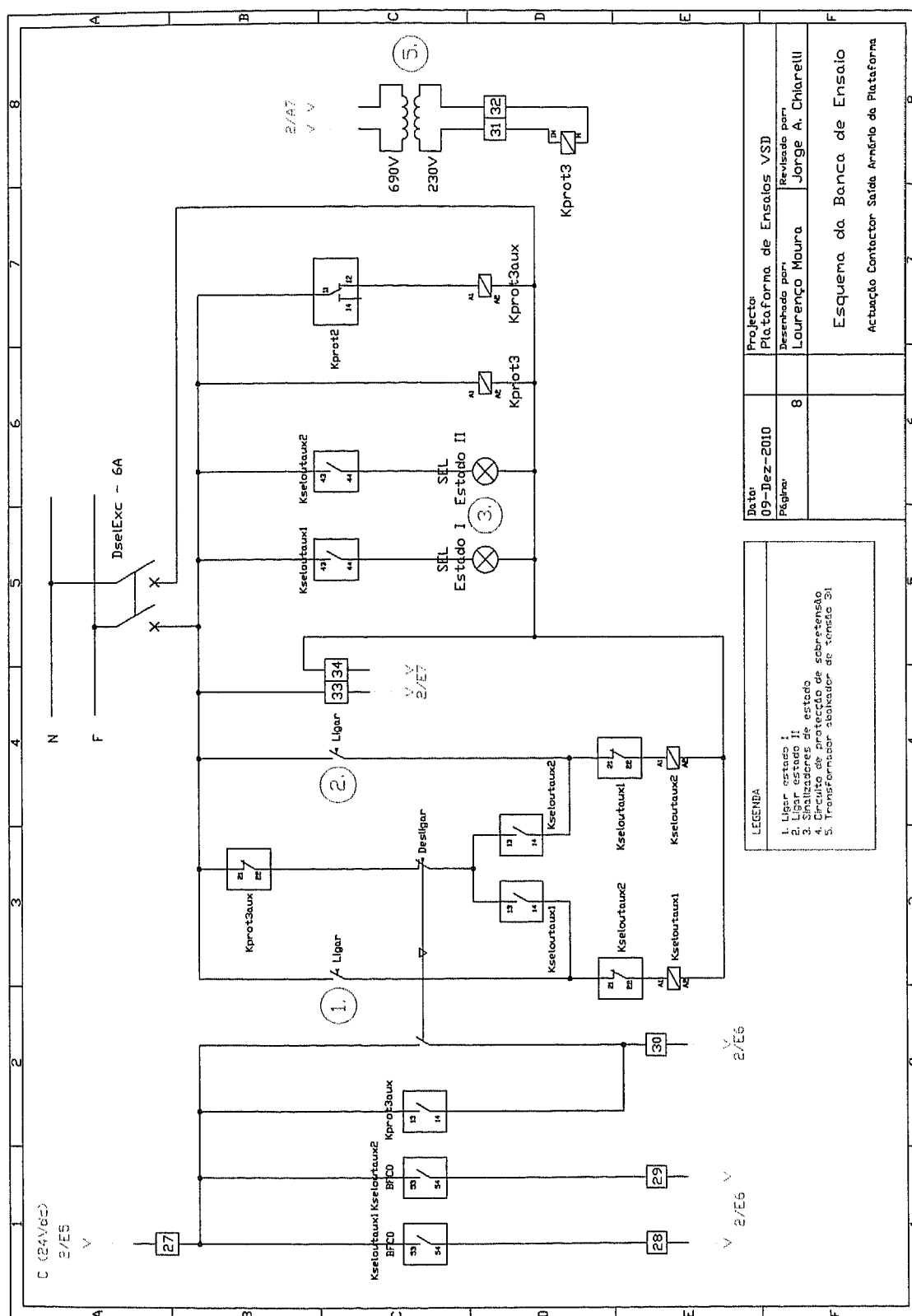


Figura 35 – Esquema da bancada de ensaios – Atuação do *change-over* do quadro de saída

A figura 35 representa o circuito de comando e proteção empregados no *change-over*.

O *change-over* possui três estados de operação, estado 1 (alimentação proveniente do sistema 1), estado 2 (alimentação proveniente do alternador) e desligado. Para isso, o sinal existente no borne 27 é posto em comum com os bornes 28, 29 e 30 respectivamente.

Os contactores Kseloutaux1 e Kseloutaux2 são responsáveis pela escolha do estado de operação, sendo que eles são acionados pelos botões “Ligar” e têm um contato de selo para realimentação, existe também um contato normalmente fechado do contactor oposto para proteção, ou seja, é necessário primeiro desligar o *change-over* para que se possa alterar seu estado de operação.

Existe neste circuito um relé de proteção contra sobretensão que monitora a tensão eficaz de linha da saída do *change-over*, caso a tensão exceda o valor programado no relé, o contactor Kprot3aux será ligado, fazendo com que os relés de seleção de estado sejam desligados e o sinal do borne 27 passe para o borne 30 (modo desligado). Vale lembrar que com o ligamento do contactor Kprot3aux, o contactor Kout (contactor de saída do alternador) também é desligado.

Como a tensão de entrada máxima do relé de proteção contra sobretensão é de 600V, foi necessário o uso de um transformador de 690V/230V para baixar a tensão de entrada no relé.

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.9 Alimentação dos Transdutores de Torque

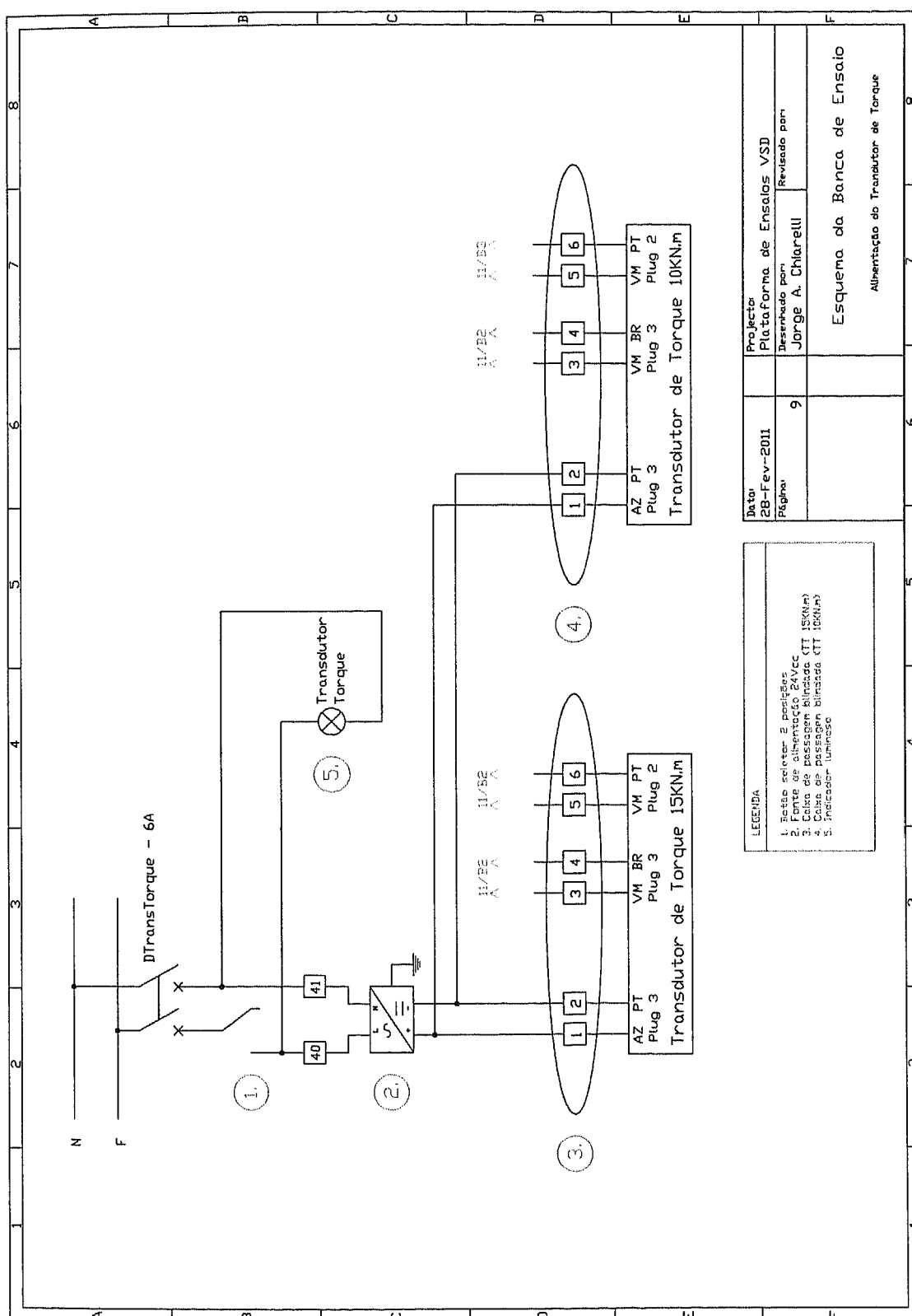


Figura 36 – Esquema da bancada de ensaios – Alimentação dos transdutores de torque

A figura 36 representa o circuito responsável pela alimentação e demais conexões dos transdutores de torque.

A plataforma de ensaios está equipada com dois transdutores de torque e velocidade, sendo que o primeiro faz parte do conjunto formado pelos sistemas 1 e 2, e o segundo faz parte do conjunto formado pelos sistemas 1 e 3.

O transdutor de torque e velocidade ligado aos sistemas 1 e 2 tem seu torque nominal igual a 15kN.m, já o transdutor de torque ligado aos sistemas 1 e 3 tem seu torque nominal igual a 10kN.m. Ambos têm seu sinal de saída analógico de -10V a +10V.

A medição de velocidade dos transdutores é feita através de sensores ópticos e um disco ranhurado, sendo que o primeiro é de 720 pulsos por rotação e o segundo é de 360 pulsos por rotação.

A alimentação dos transdutores é de 24Vcc e é feita por uma fonte apenas. A energização da fonte é feita através da chave seletora (1).

Todas as conexões elétricas foram inseridas em invólucros metálicos aterrados e cabos blindados foram utilizados para que os sinais não fossem interferidos pelo ruído eletromagnético gerado.

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.10 Ligação do Medidor de Tensões e Correntes

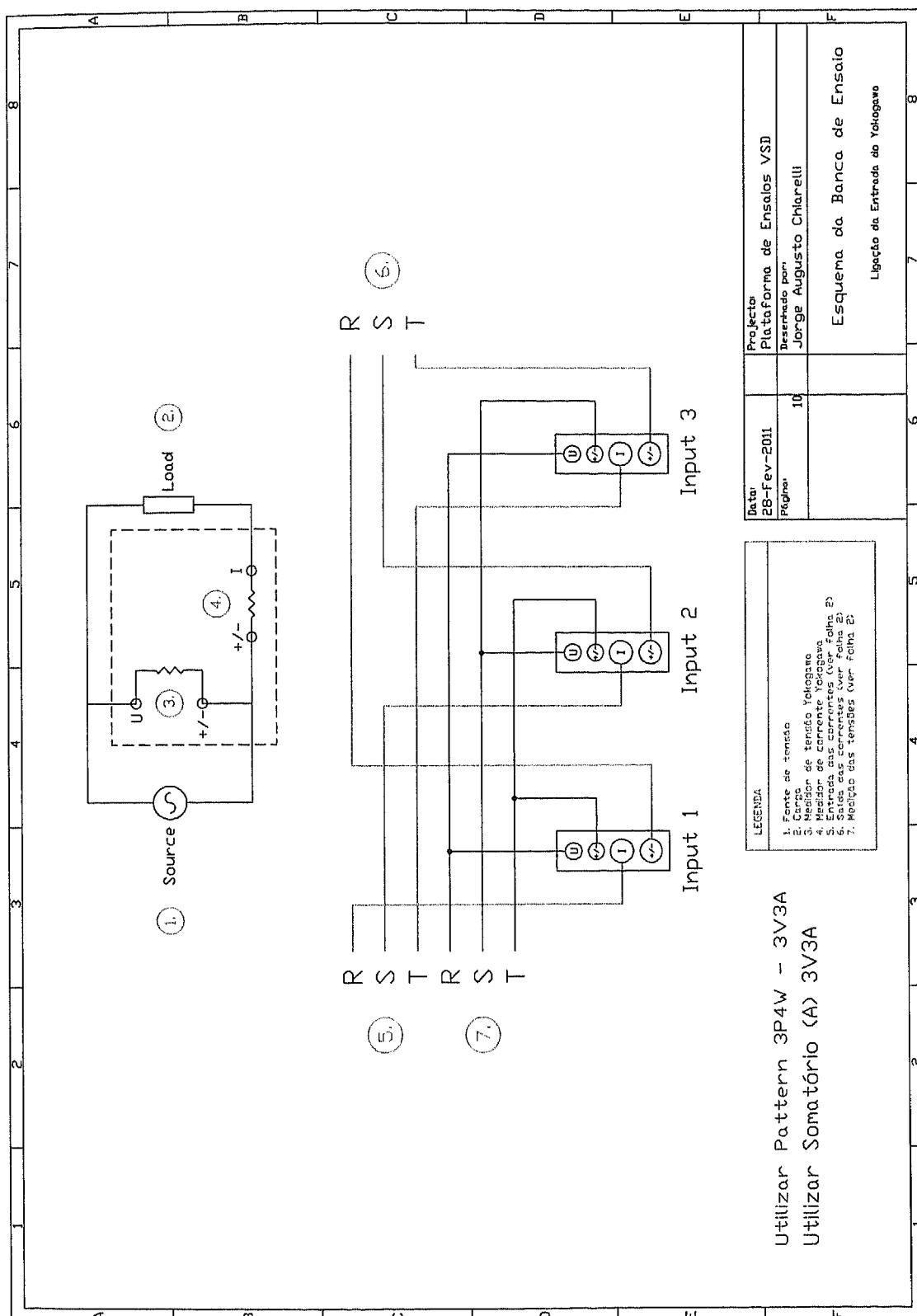


Figura 37 – Esquema da bancada de ensaios – Ligação do medidor de tensões e correntes

A figura 37 representa a forma de ligação utilizada na entrada do medidor de tensões e correntes.

O modelo da ligação utilizada está representado na parte superior da figura 37. Com a utilização desta forma de ligação, o circuito medidor de tensão irá medir a soma das tensões da carga e a queda de tensão no circuito medidor de corrente. Porém, como a corrente medida pode ser considerada pequena (no máximo 0,7A) e a impedância de entrada do circuito medidor de corrente é de $100\text{m}\Omega$, a queda de tensão apresentada no circuito medidor de corrente chegará à 70mV, o que representa um efeito de 0,01% sobre a tensão medida se considerarmos uma tensão na carga de 690V ($70\text{mV}/690\text{V}$).

Se seguíssemos o modelo de ligação com o circuito medidor de tensão em paralelo com a carga, teríamos o circuito medidor de corrente lendo a soma das correntes da carga e a corrente que passa pelo circuito medidor de tensão. Como a impedância de entrada do circuito medidor de tensão é de aproximadamente $2\text{M}\Omega$, teremos uma corrente de 0,345mA se considerarmos uma tensão de 690V na carga, o que representaria um efeito de 0,049% sobre a corrente medida ($0,345\text{mA}/0,7\text{A}$).

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.11 Seleção do Transdutor de Torque

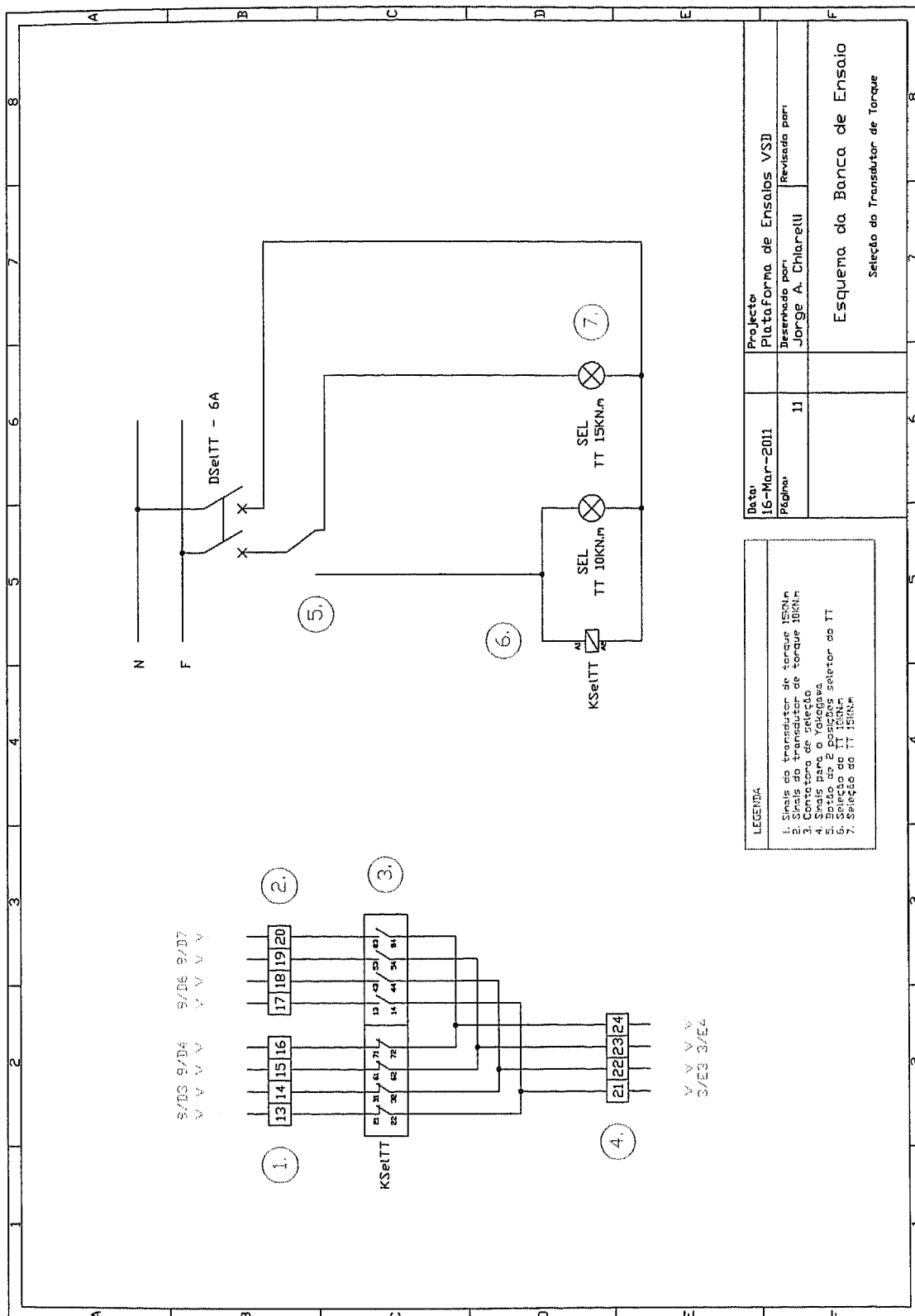


Figura 38 – Esquema da bancada de ensaios – Seleção do transdutor de torque

A figura 38 representa o circuito de seleção do transdutor de torque.

Como já descrito anteriormente, a plataforma possui dois transdutores de torque. Sendo que existe uma seleção de qual será usado durante o ensaio devido ao fato de existir apenas uma entrada para o sinal de torque e uma entrada para o sinal de velocidade presentes no medidor.

Se mantivermos a chave seletora (5) na posição conforme mostrada, o contactor de seleção KselTT permanece desligado, fazendo com que os sinais que vão para o medidor (bornes 21 ao 24) sejam provenientes do transdutor de torque de 15kN.m (bornes 13 ao 16).

Se alterarmos a posição da chave seletora, o contactor de seleção KselTT será ligado, fazendo com que os sinais que vão para o medidor sejam provenientes do transdutor de torque de 10kN.m (bornes 17 ao 20).

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

6.12 Disjuntores dos Equipamentos

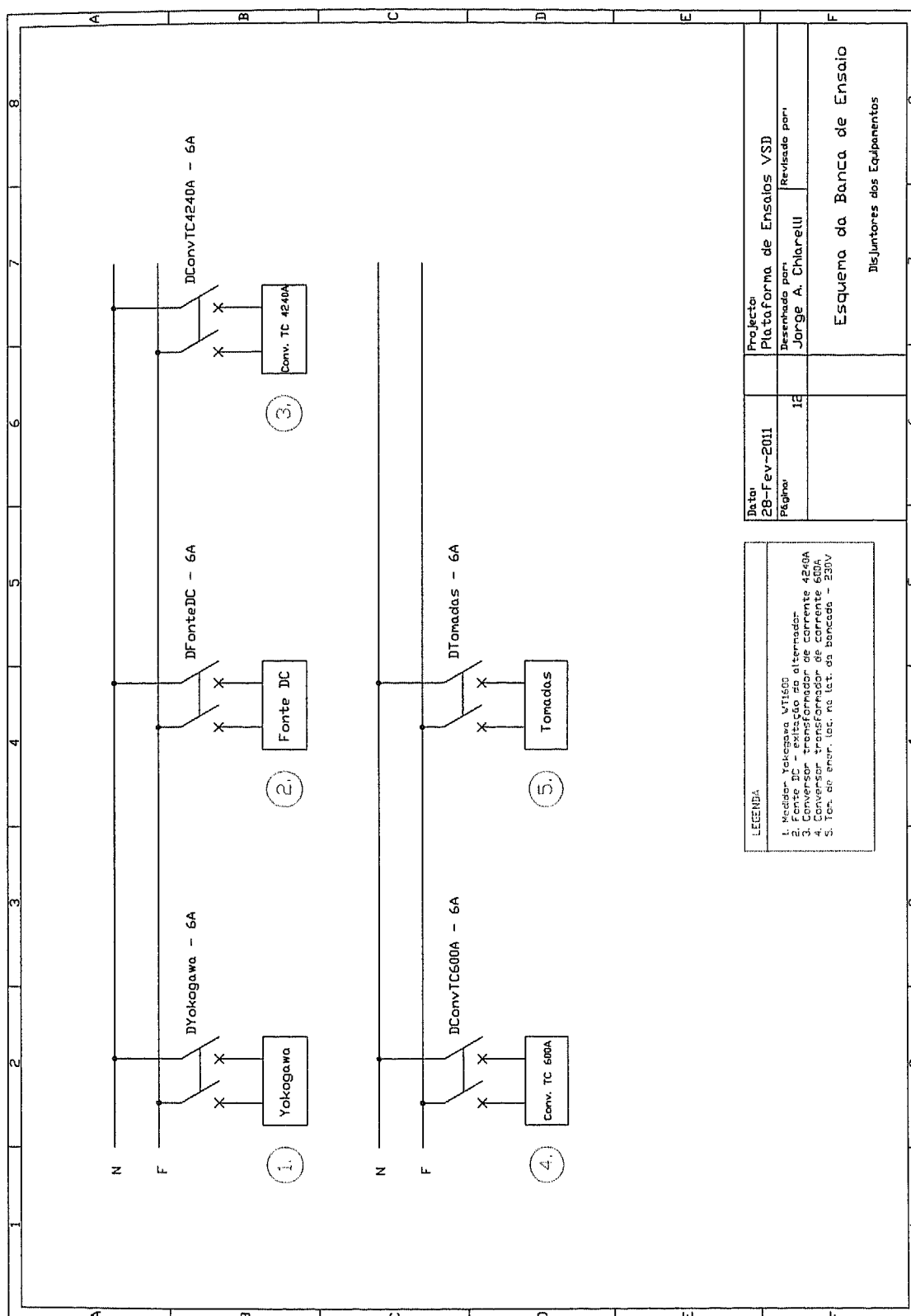


Figura 39 – Esquema da bancada de ensaios – Disjuntores dos equipamentos

A figura 39 representa os disjuntores usados para proteção dos equipamentos utilizados na bancada.

Trata-se de disjuntores bipolares termomagnéticos com proteção de sobrecarga e curto-circuito, todos com corrente nominal de 6A, incluindo os disjuntores usados nas proteções dos circuitos mostrados anteriormente.

Os equipamentos ligados à bancada são:

- ➔ Medidor de tensões, correntes, torque e velocidade;
- ➔ Fonte DC;
- ➔ Conversor do TC de 4240A;
- ➔ Conversor do TC de 600A;
- ➔ Tomadas para uso geral (ex.: computador).

Este módulo da bancada foi projetado, executado, integrado, e testado pela WEGeuro com a participação do autor.

7 Problemas Durante o *Start-up* do VSD

Após o término das instalações, chega a hora do *start-up* do VSD, sendo que para isso contamos com a presença de um técnico de fábrica da WEG automação, Pedro Henrique Mandetta.

Após alguns testes gerais, notamos a presença de algumas interferências em equipamentos de medição ligados ao mesmo posto de transformação onde se encontra o VSD, assim como ruídos audíveis em fontes chaveadas, e equipamentos ligando suas proteções contra sobrecorrente.

Após alguns testes, notamos que os problemas ocorriam assim que ligávamos o inversor regenerativo, ou seja, não era necessário um grande fluxo de corrente para causar o problema. Uma análise espectral teve de ser feita para que pudéssemos juntamente com a WEG automação encontrar uma solução para o ruído gerado.

Abaixo seguem as imagens referentes à análise. Todas as formas de onda foram captadas através de uma ponta de prova X100, ou seja, as imagens representam uma tensão com amplitude 100 vezes maior.

Podemos notar que nas figuras 40 e 41 a tensão não possui componentes harmônicas, pois se trata da tensão entre a fase “R” e o neutro quando o inversor regenerativo está desligado. Porém as figuras 42 e 43 mostram o contrário, podemos notar o surgimento de componentes harmônicas de frequências elevadas, componentes estas que causam os problemas mencionados anteriormente.

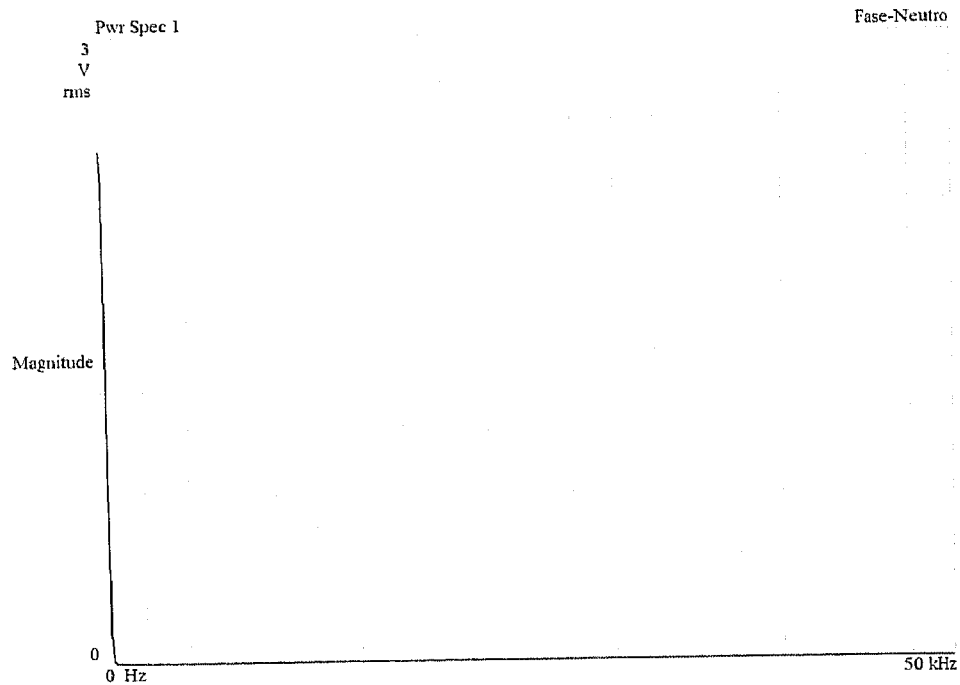


Figura 40 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo desligado

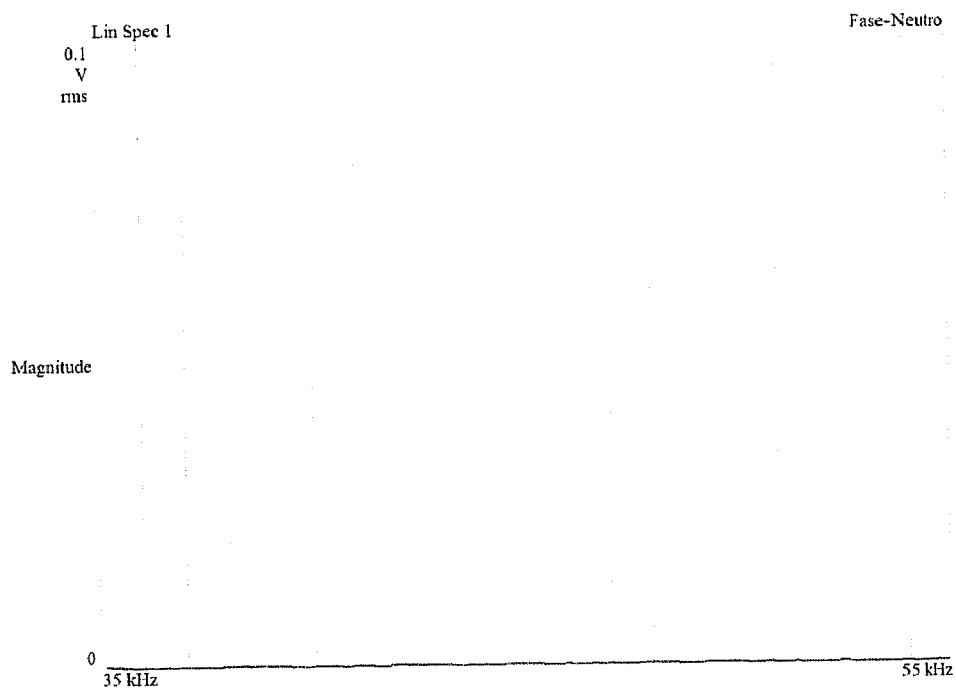


Figura 41 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo desligado

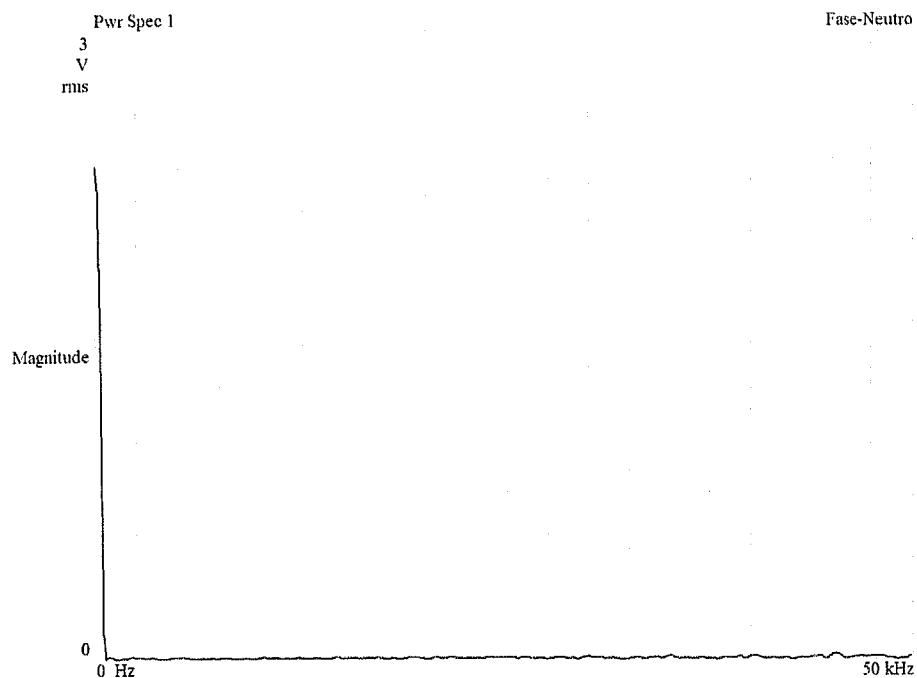


Figura 42 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado

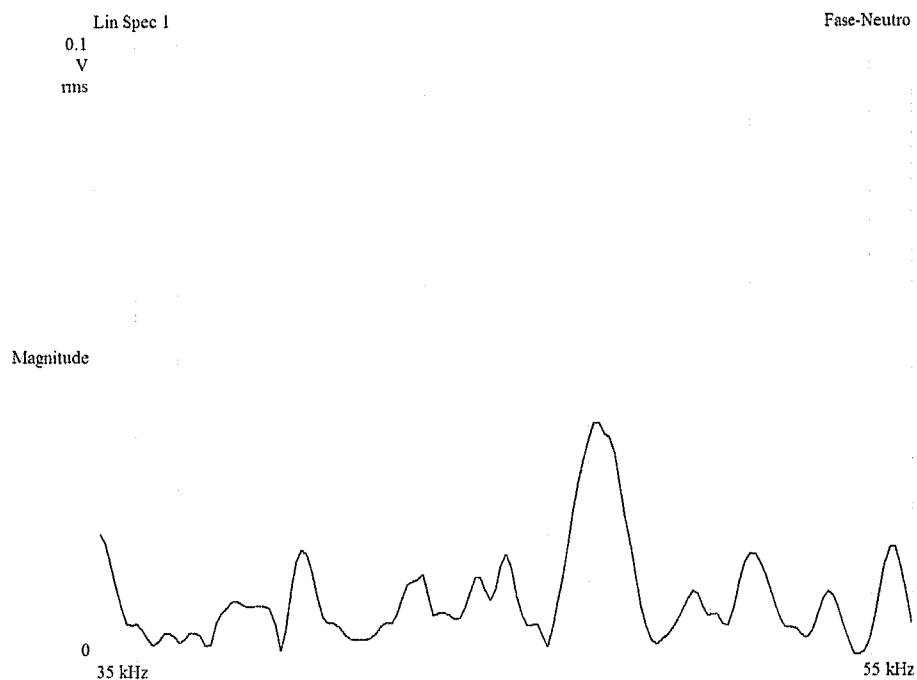


Figura 43 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado

As figuras 41 e 43 são ampliações das figuras 40 e 42 respectivamente, são ampliações da amplitude e da faixa de frequência, as mesmas foram geradas para que a visualização do gráfico fosse facilitada.

A solução adotada foi projetada pela WEG automação. Trata-se de um filtro capacitivo composto por três capacitores de $10\mu\text{F}/750\text{V}$ na configuração “estrela aterrada” instalado entre o disjuntor aberto e o filtro LCL.

A figura 44 representa o filtro em questão.

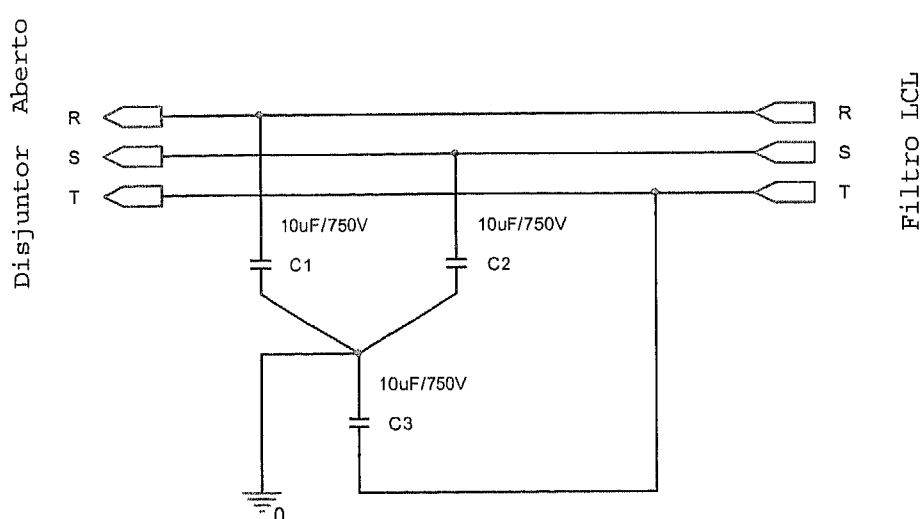


Figura 44 – Filtro capacitivo na configuração “estrela aterrada”

Após a instalação do filtro notou-se uma melhora significativa com relação às harmônicas geradas na tensão. Os problemas causados por ruído elétrico foram extintos.

As figuras 45 e 46 mostram o efeito gerado pela instalação do filtro. Podemos notar que não se trata de uma forma de onda com a mesma qualidade quanto à mostrada nas figuras 40 e 41, porém, é uma forma de onda melhor que à mostrada nas figuras 42 e 43, e como já falado, não gera problemas significativos.

Assim como as figuras 41 e 43 são ampliações das figuras 40 e 42 respectivamente, a figura 46 é uma amplificação da figura 45.

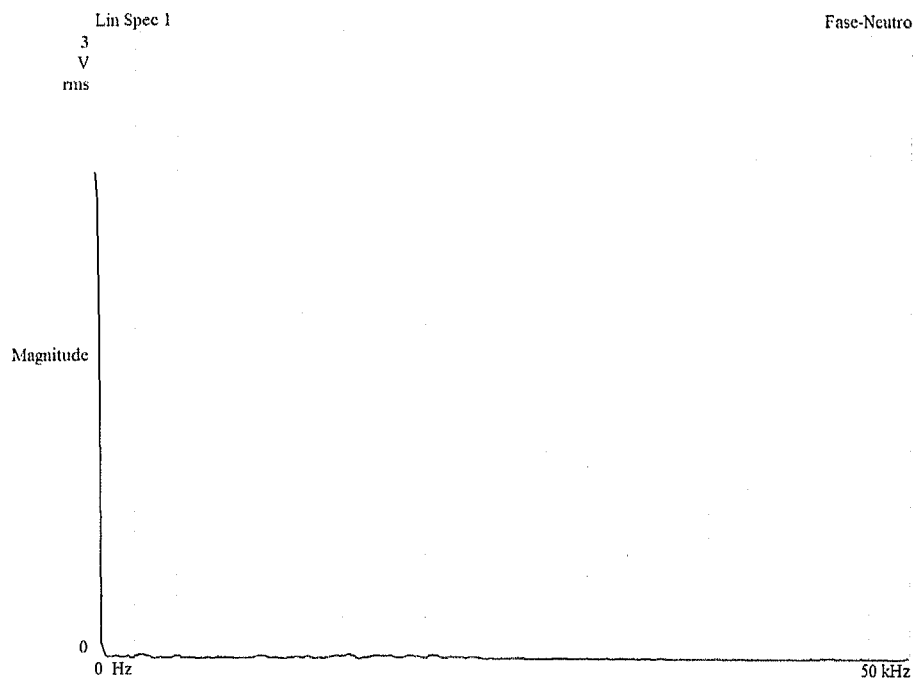


Figura 45 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado e com filtro instalado

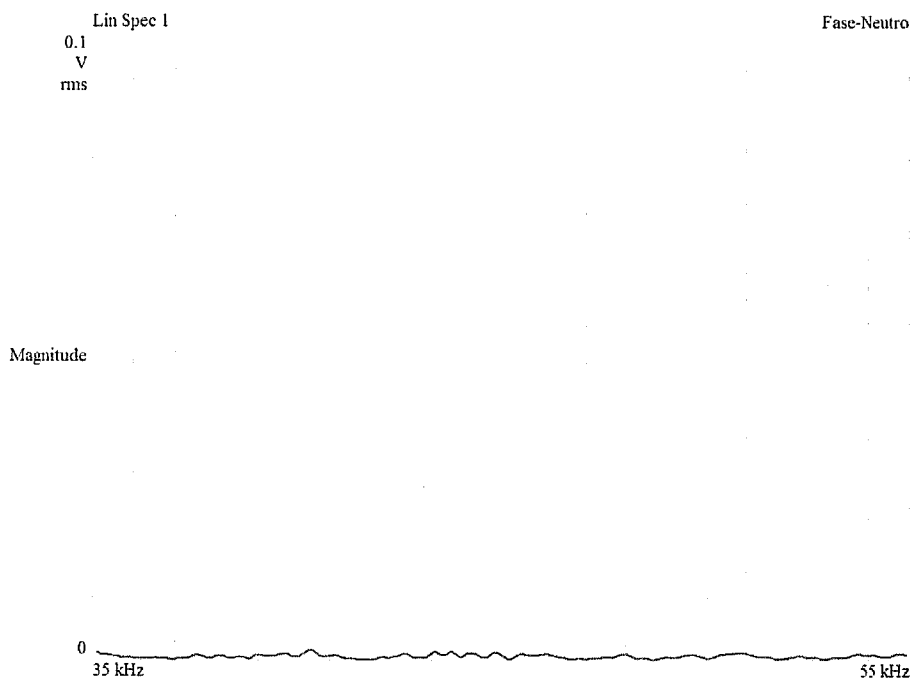


Figura 46 – Análise espectral da tensão entre a fase “R” e o neutro com o inversor regenerativo ligado e com filtro instalado

8 Cálculo da economia de energia com a utilização da Plataforma

Este capítulo apresentará o cálculo da economia de energia com a utilização da plataforma de ensaios, porém, para isso devemos fazer algumas considerações, são elas:

- ➔ Os valores de potência foram coletados durante um ensaio em que o motor em ensaio tinha sua alimentação proveniente do alternador;
- ➔ Estão sendo consideradas as perdas no motor de arrasto, no alternador, no motor em ensaio e no freio, para isso, foi assumido um rendimento de 90% em cada uma das máquinas;
- ➔ Os dados para o cálculo não foram adquiridos em condições de cargas nominais. Pois o motor ligado ao sistema 2 tem dois pólos e o motor em ensaio tem quatro pólos. Diante desta situação, a corrente do sistema 2 teve de ser limitada para que não ultrapassasse os 1900A (valor nominal da corrente do motor ligado ao sistema 2). Fazendo assim com que o sistema 2 consumisse aproximadamente apenas metade da potência nominal do motor em ensaio;
- ➔ Os valores de potência foram medidos pelo Yokogawa WT1600.

A figura 47 representa o fluxo de potências através da plataforma de ensaios, do motor de arrasto, do alternador, do motor em ensaio e do motor freio respectivamente.

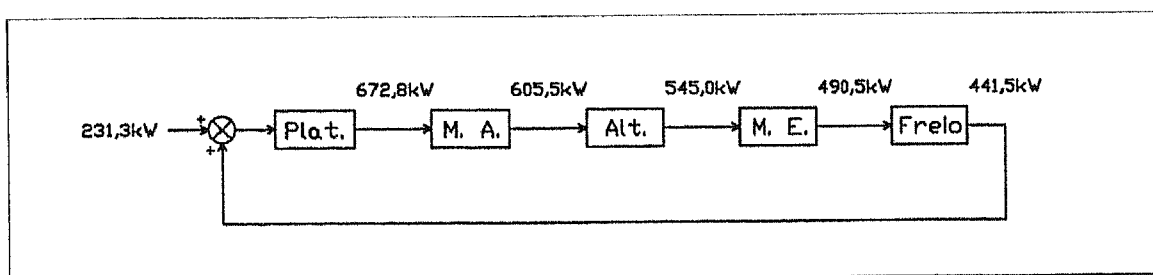


Figura 47 – Diagrama de potências da plataforma de ensaios com recuperação de energia

Podemos notar que são consumidos 231,3kW da rede elétrica para ensaiar um motor com 490,5kW de potência.

A seguir, podemos notar na figura 48, o fluxo de potências através da plataforma de ensaios convencional.

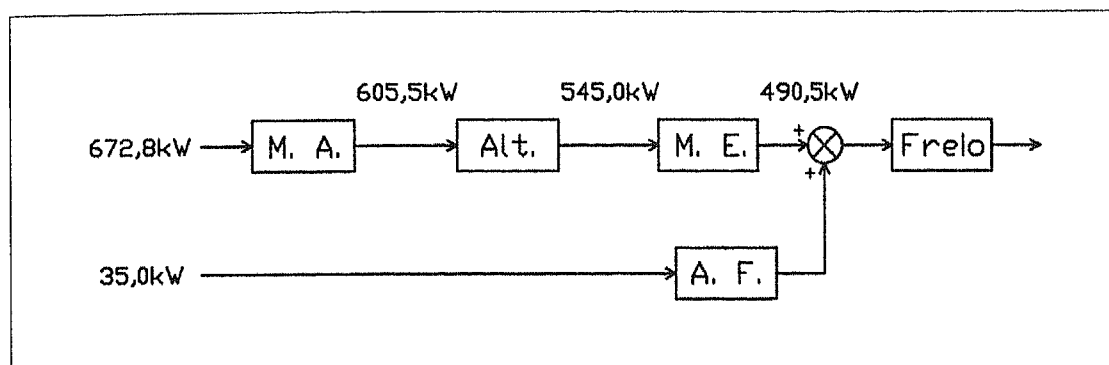


Figura 48 – Diagrama de potências da plataforma convencional

Neste caso, para ensaiarmos um motor com a mesma potência, são consumidos da rede elétrica 672,8kW, além do consumo do acionamento do freio, que é de 35kW. Totalizando uma potência consumida de 707,8kW.

Desta maneira, concluímos que a economia de energia com a utilização da plataforma de ensaios com recuperação de energia é de aproximadamente 67,32%, uma vez que,

$$100\% - \left(\frac{231,3kW}{707,8kW} \cdot 100\% \right) = 67,32\%$$

Vale lembrar que este valor pode ser maior ou menor, dependendo da potência a ser ensaiada.

9 Procedimentos de Ensaios

Existem várias maneiras de se fazer os ensaios desejados, porém, para que houvesse uma padronização na utilização da plataforma, e também para que os ensaios fossem facilitados, foram criados procedimentos de ensaios, procedimentos estes que explicam passo a passo desde a energização da plataforma até o controle de carga do motor em ensaio.

9.1 Arranque do Alternador

- ➔ Direcionar o seccionador do sistema 1 para o motor de arrasto do alternador (quadro VSD);
- ➔ Destruar o disjuntor principal (quadro VSD);
- ➔ Ligar o disjuntor auxiliar (quadro VSD);
- ➔ Ligar o sistema regenerativo;
- ➔ Carregar o sistema 1 com a configuração “Usuário 1” (ver procedimento “Parametrização do Sistema 1”);
- ➔ Colocar o sistema 1 no modo local;
- ➔ Ligar o sistema 1;
- ➔ Ajustar a velocidade desejada.

9.2 Ensaio com Carga no Sistema 2 – Alimentação Proveniente do Alternador

- ➔ Direcionar o seccionador do sistema 1 para o motor de arrasto do alternador (quadro VSD);
- ➔ Destruar o disjuntor principal (quadro VSD);
- ➔ Ligar o disjuntor auxiliar (quadro VSD);

- ➔ Ligar o sistema regenerativo;
- ➔ Selecionar o transdutor de torque de 15kN.m;
- ➔ Selecionar o TC desejado;
- ➔ Ajustar os relés de sobrecorrente conforme K do TC;
- ➔ Ajustar o relé de sobre tensão ($V_{relé} = \frac{1}{3} \cdot V$);
- ➔ Carregar o Yokogawa com a configuração “SIS1-2” (ver procedimento “Parametrização do Yokogawa”);
- ➔ Ligar o contactor de saída do alternador (as excitações 1 e 2 devem estar desligadas);
- ➔ Selecionar o estado 2;
- ➔ Ligar a fonte DC;
- ➔ Selecionar a excitação 2 (a tensão de saída da fonte deve ser menor ou igual a 1,5V);
- ➔ Excitar o alternador até a tensão desejada;
- ➔ Posicionar o potenciômetro do sistema 2 no mínimo (sentido anti-horário);
- ➔ Colocar o sistema 2 no modo local;
- ➔ Dar início a subida da carga.

9.3 Ensaio com Carga no Sistema 3 – Alimentação Proveniente do Alternador

- ➔ Direcionar o seccionador do sistema 1 para o motor de arrasto do alternador (quadro VSD);
- ➔ Destruar o disjuntor principal (quadro VSD);
- ➔ Ligar o disjuntor auxiliar (quadro VSD);
- ➔ Ligar o sistema regenerativo;

- ➔ Selecionar o transdutor de torque de 10kN.m;
- ➔ Selecionar o TC desejado;
- ➔ Ajustar os relés de sobrecorrente conforme K do TC;
- ➔ Ajustar o relé de sobre tensão ($V_{relé} = \frac{1}{3} \cdot V$);
- ➔ Carregar o Yokogawa com a configuração “SIS1-3” (ver procedimento “Parametrização do Yokogawa”);
- ➔ Ligar o contactor de saída do alternador (as excitações 1 e 2 devem estar desligadas);
- ➔ Selecionar o estado 2;
- ➔ Ligar a fonte DC;
- ➔ Selecionar a excitação 2 (a tensão de saída da fonte deve ser menor ou igual a 1,5V);
- ➔ Excitar o alternador até a tensão desejada;
- ➔ Posicionar o potenciômetro do sistema 3 no mínimo (sentido anti-horário);
- ➔ Colocar o sistema 3 no modo local;
- ➔ Dar início a subida da carga.

9.4 Ensaio com Carga no Sistema 2 – Alimentação Proveniente do Sistema 1

- ➔ Direcionar o seccionador do sistema 1 para o quadro de saída (quadro VSD);
- ➔ Destravar o disjuntor principal (quadro VSD);
- ➔ Ligar o disjuntor auxiliar (quadro VSD);
- ➔ Ligar o sistema regenerativo;
- ➔ Selecionar o transdutor de torque de 15kN.m;
- ➔ Selecionar o TC desejado;

- Ajustar os relés de sobrecorrente conforme K do TC;
- Ajustar o relé de sobre tensão ($V_{relé} = \frac{1}{3} \cdot V$);
- Carregar o Yokogawa com a configuração “SIS1-2” (ver procedimento “Parametrização do Yokogawa”);
- Carregar o sistema 1 com a configuração “Usuário 2” (ver procedimento “Parametrização do Sistema 1”);
- Selecionar o estado 1;
- Colocar o sistema 1 no modo local;
- Ligar o sistema 1;
- Ajustar a velocidade desejada;
- Posicionar o potenciômetro do sistema 2 no mínimo (sentido anti-horário);
- Colocar o sistema 2 no modo local;
- Dar início a subida da carga.

9.5 Ensaio com Carga no Sistema 3 – Alimentação Proveniente do Sistema 1

- Direcionar o seccionador do sistema 1 para o quadro de saída (quadro VSD);
- Destravar o disjuntor principal (quadro VSD);
- Ligar o disjuntor auxiliar (quadro VSD);
- Ligar o sistema regenerativo;
- Selecionar o transdutor de torque de 10kN.m;
- Selecionar o TC desejado;
- Ajustar os relés de sobrecorrente conforme K do TC;
- Ajustar o relé de sobre tensão ($V_{relé} = \frac{1}{3} \cdot V$);

- ➔ Carregar o Yokogawa com a configuração “SIS1-3” (ver procedimento “Parametrização do Yokogawa”);
- ➔ Carregar o sistema 1 com a configuração “Usuário 3” (ver procedimento “Parametrização do Sistema 1”);
- ➔ Selecionar o estado 1;
- ➔ Colocar o sistema 1 no modo local;
- ➔ Ligar o sistema 1;
- ➔ Ajustar a velocidade desejada;
- ➔ Posicionar o potenciômetro do sistema 3 no mínimo (sentido anti-horário);
- ➔ Colocar o sistema 3 no modo local;
- ➔ Dar início a subida da carga.

9.6 Parametrização do Sistema 1

- ➔ Carregar o respectivo usuário:

P0204: - 7, carrega usuário 1 (motor em ensaio alimentado pelo alternador);

- 8, carrega usuário 2 (motor em ensaio (alimentação VSD) em conjunto com o sistema 2);

- 9, carrega usuário 3 (motor em ensaio (alimentação VSD) em conjunto com o sistema 3).

Carrega/Salva Parâmetros. Possibilita salvar os parâmetros atuais do inversor em uma área de memória EEPROM do módulo de controle ou, o contrário, carregar os parâmetros com o conteúdo dessa área.

No caso de carregamento do usuário 1, a parametrização acaba aqui.

- ➔ Dados de placa do motor:

P0400: 0 a 690V;

Tensão nominal do motor.

P0401: 0 a $1,3 \times I_n$;

Corrente nominal do motor.

P0402: 0 a 18000rpm;

Rotação nominal do motor.

P0403: 0 a 300Hz;

Frequência nominal do motor.

P0404: 0,33 a 2500CV.

Potência nominal do motor.

→ Correntes de sobrecarga:

P0156: 0,1 a $1,5 \times I_n$;

Corrente de sobrecarga à velocidade nominal ($1,05 \times I_n$). Esses parâmetros são utilizados para proteção de sobrecarga do motor.

A corrente de sobrecarga do motor é o valor de corrente (P0156, P0157 e P0158) a partir do qual, o inversor entenderá que o motor está operando em sobrecarga. Quanto maior a diferença entre a corrente do motor e a corrente de sobrecarga, mais rápida será a atuação da falha F072 (sobrecarga no motor).

P0157: 0,1 a $1,5 \times I_n$;

Corrente de sobrecarga a 50% da velocidade nominal ($0,9 \times I_n$).

P0158: 0,1 a $1,5 \times I_n$.

Corrente de sobrecarga a 5% da velocidade nominal ($0,5 \times I_n$).

→ Limites de velocidades:

P0133: 0 a 18000rpm;

Limite de referência de velocidade mínima. Define o valor de limite mínimo de referência de velocidade do motor quando o inversor é habilitado.

P0134: 0 a 18000rpm;

Limite de referência de velocidade máxima. Define o valor de limite máximo de referência de velocidade do motor quando o inversor é habilitado.

P0208: 0 a 18000.

Fator de escala da referência. Define a velocidade síncrona do motor.

9.7 Parametrização do Yokogawa

- ➔ Pressionar a tecla "File";
- ➔ Pressionar a tecla "Load";
- ➔ Selecionar a pasta "SC4-00";
- ➔ Pressionar a tecla "Select";
- ➔ Selecionar o respectivo arquivo de configuração:

- SIS1-2.SET (motor em ensaio em conjunto com o sistema 2);

- SIS1-3.SET (motor em ensaio em conjunto com o sistema 3).

- ➔ Pressionar a tecla "Load Exec";
- ➔ Pressionar a tecla "ESC".

10 Conclusão

A WEGeuro vem se atualizando constantemente em vários aspectos e setores da empresa, um deles é o laboratório de ensaios de protótipos.

A criação de uma plataforma de ensaios com recuperação de energia mostra o interesse nessa constante atualização, a preocupação com o consumo desnecessário de energia e consequentemente a diminuição de custos.

Diante de um projeto como este, podemos notar a real importância e avanço da eletrônica de potência no acionamento de máquinas elétricas, principalmente no que diz respeito ao controle de velocidade e torque.

No período de projeto e execução da plataforma, mais especificamente falando da bancada de ensaios, muito foi aprendido com relação à aquisição de dados dos ensaios, assim como a automação que foi usada na bancada, desde os instrumentos de medição, até a bancada propriamente dita.

Durante o processo de criação e instalação notamos o surgimento de alguns problemas relacionados às instalações elétricas, tal como o surgimento de componentes harmônicas na tensão que alimenta a plataforma de ensaios, gerando problemas em alguns equipamentos. Porém, resolvidos com a instalação de filtros.

De uma forma geral, pode-se dizer que os objetivos do estágio foram cumpridos, porém, com a exceção de alguns itens, como é o exemplo da comutação entre Y/Δ e a saída em média tensão do alternador. Não impedindo o funcionamento da plataforma, apenas impondo algumas limitações.

11 Referências Bibliográficas

- [1] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. J.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6. Ed. Nova Iorque: McGrall-Hill Companies, Inc., 2003. 703 p.
- [2] KLUMPNER, C.; BLAABJERG, F.; THOEGERSEN, P. **Alternate ASDs: Evaluation of the converter topologies suited for integrated motor drives**. IEEE Industry Applications Magazine, 2006. 83 p.
- [3] LANDER, C. W. **Eletrônica Industrial: Teoria e Aplicações**. 2. Ed. São Paulo: Makron Books, 1996. 647 p.
- [4] MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBINS, W. P. **Power Electronics: Converters, Applications and Design**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc., 1989. 667 p.
- [5] RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: Circuitos, Dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999. 828 p.
- [6] WEG. **CFW-11: Manual de Programação**. Jaraguá do Sul: WEG, 2010. 288 p.
- [7] YOKOGAWA. **WT1600: Digital Power Meter User's Manual**. 4. Ed. Yokogawa Electric Corporation, 2004. 423 p.



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000122282