



**UNIVERSIDADE POLITÉCNICA – A POLITÉCNICA**  
**INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO E UNIVERSITÁRIO DE NACALA – ISPUNA**

Licenciatura em Engenharia Eléctrica

**ESTUDO DA QUEIMA PRECOCE DOS TRANSFORMADORES DOS INVERSORES DE  
MÉDIA TENSÃO VSD – ROBICON**

**PAULO FÉLIX RAICE**

Nacala – Porto

2022

PAULO FÉLIX RAICE

ESTUDO DA QUEIMA PRECOCE DOS TRANSFORMADORES DOS INVERSORES DE  
MÉDIA TENSÃO VSD – ROBICON

Monografia a ser apresentada a Universidade  
Politécnica, Instituto Superior Politécnico e  
Universitário de Nacala, como requisito para  
obtenção do grau de Licenciatura e Engenharia  
Eléctrica.

Orientador: Lic. Culpa Elídio Pedro

---

Nacala – Porto

2022

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DA QUEIMA PRECOCE DOS TRANSFORMADORES DOS INVERSORES DE MÉDIA TENSÃO VSD – ROBICON

Monografia a ser apresentada à Universidade Politécnica, Instituto Superior Politécnico E Universitário De Nacala – ISPUNA, na obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Eléctrica, tendo sido atribuída a nota final (\_\_\_\_\_), \_\_\_\_\_ Valores.

Aprovado em \_\_\_\_/\_\_\_\_\_/2022

Os Júris

---

---

---

Presidenta da Mesa

---

Oponente

---

Supervisor

---

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho em primeiro lugar à Deus pela vida que me concedeu, pela saúde inestimável e pela sua bênção.

Aos meus pais pela educação que me concederam, pela atenção e pela imensurável força.  
Aos meus irmãos pela força e presença nos momentos difíceis e durante a caminhada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradecer a Deus por ter permitido estar aqui com saúde, e por ter tornado possível a realização da presente Monografia, e ao meu supervisor ... pelos ensinamentos, coerência e ponderações durante a elaboração da presente Monografia.

## **DECLARAÇÃO**

Eu, **Paulo Félix Raice** declaro que este projecto é resultado do meu próprio trabalho e está a ser submetida para a obtenção do grau de licenciatura na Universidade Politécnica – Nacala Porto. Ela não foi submetida antes para obtenção de nenhum grau elaboração de monografia de fim do curso.

Nacala-Porto, aos \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ 2022

---

**(Paulo Félix Raice)**

## **RESUMO**

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do estágio profissional do curso Licenciatura em Engenharia Eléctrica na empresa CLN na **Gerência de Manutenção Portuária**, na supervisão de Eléctrica e Automação num período de três (3) meses com o acompanhamento do **Leandro Tenório**, supervisor da equipe **Manutenção Preventiva Eléctrica e Automação Porto**, teve como objectivo consubstanciar relação entre teoria e a prática em campo. Este também se destina não só a descrever actividades desenvolvidas ao longo do estágio mas também apresentar um enquadramento do trabalho realizado com todo o conhecimento adquirido nas disciplinas do plano curricular com foco no ESTUDO DA QUEIMA PRECOCE DOS TRANSFORMADORES DOS INVERSORES DE MÉDIA TENSÃO VSD – ROBICON responsável pelo acionamento dos motores eléctricos das Transportadoras de Correia que tem um histórico de ter manifestado queimas sucessivas dos mesmos, no entanto isto foi merecedor de um estudo profundo para propor soluções com vista a evitar essas queimas e garantir confiabilidade dos equipamentos e operações sustentáveis.

**Palavras-Chave: Transformador, Inversor de Frequencia (VSD), Queima precoce.**

## **ABSTRACT**

The present work was developed within the scope of the professional internship of the Degree in Electrical Engineering at the company CLN in the Port Maintenance Management, in the supervision of Electrical and Automation in a period of three (3) months with the follow-up of Leandro Tenório, supervisor of the Maintenance team. Preventiva Elétrica e Automação Porto, aimed to substantiate the relationship between theory and practice in the field. This is also intended not only to describe activities carried out during the internship but also to present a framework of the work carried out with all the knowledge acquired in the subjects of the curricular plan with a focus on the STUDY OF EARLY BURNING OF TRANSFORMERS OF MEDIUM VOLTAGE INVERTERS VSD - ROBICON responsible for the activation of the electric motors of the Conveyors of Correia that have a history of having manifested successive burns of them, however this was worthy of a deep study to propose solutions in order to avoid these burns and guarantee the reliability of the equipment and sustainable operations.

**Keywords: Transformer, Frequency Inverter (VSD), Early burnout.**

## LISITA DE FIGURA

Fig.1: Modelo de enrolamentos de Transformador Monofásico.

Figura 2.: Modelos de construção de transformadores trifásicos.

Figura 3.: Desenho modelado de um trafo trifásico.

Figura 4.: Núcleo trifásico em construção laminada.

Figura 5.: Núcleo de um transformador trifásico.

Fig. 6.: Diagrama vectorial das amplitudes das tensões.

Fig.7.: Transformador funcionando em carga.

Fig. 8.: Diagrama vectorial do trafo em carga.

Fig. 9: Ilustração do fluxo de dispersão no transformador.

Figura 10.: Enrolamentos concêntricos ou tubulares dos transformadores.

Fig. 13.: Constituição de um aterramento.

Fig. 14.: Componentes de corrente no solo.

Figura 15.: Inversor de frequência, Altivar 71.

Figura 16.: Circuito de um conversor de frequência.

Figura 17.: Modulação PWM.

Figura 18.: Gráfico de tensão x frequência ( $V \times f$ ).

Figura 20.: Curva operacional para motor de indução.

Figura 22.: Resultado da medição da resistência de aterramento feita no terreno.

Figura 23.: Vestígios de infiltração de água para o transformador.

Figura 24.: Alinhamento Típico VFD GEN II do Perfect Harmony (Vistas Superior e Frontal).

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.: Primeiro dígito do grau de protecção dos invólucros eléctricos

Tabela 2.: Segundo dígito do grau de protecção dos motores e invólucros eléctricos

## **SIGLAS**

ISPUNA - Instituto Superior Politécnico E Universitário De Nacala

CLN - Corredor Logístico Integrado de Nacala

EDM - Electricidade de Moçambique

VSD - Variador de Frequência

PH – Perfecty Harmony

ETAP – Electrical Transient Analyzer Program

MRT - Monofilar por Retorno por Terra

CLP – Controlador Logico Programável

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor

PWM - Pulse Width Modulation

V - Tensão em Volts

I – Corrente em Ampere

N – Numero de Espiras

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Continua

TRAFO – Transformador

R - Resistência elétrica em  $\Omega$

ERP – Borracha etileno-propileno

XLPE – Polietileno reticulado

IP – Índice de protecção

## ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO .....	14
1.1. INTRODUÇÃO .....	14
1.2. Delimitação do tema .....	15
1.3. Problema de pesquisa.....	15
1.4. OBJECTIVOS.....	16
1.4.1. Objectivo Geral.....	16
1.4.2. Objectivos Específicos.....	16
1.5. HIPÓTESES .....	17
1.5.1. Hipótese básica .....	17
1.5.2. Hipóteses secundárias .....	17
1.5.3. Hipótese 1 .....	18
1.5.4. Hipótese 2 .....	18
1.5.5. Hipótese 3 .....	18
1.6. JUSTIFICATIVA .....	18
CAPÍTULO II: METODOLOGIA.....	20
2.1. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	20
2.1.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
2.2. Tipo de pesquisa .....	20
2.3. Técnica de colecta de dados.....	20
CAPÍTULO III: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	22
3.1. TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS .....	22
3.1.1. NECESSIDADE DA TRANSFORMAÇÃO DAS CORRENTES ALTERNADAS .....	22
3.2. PRINCÍPIO DE CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO .....	22
3.3. PRINCÍPIO DE CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	24
3.4. PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR .....	28
3.5. Funcionamento a vazio .....	28
3.6. Funcionamento com Carga .....	31
4. RESISTÊNCIA ÔHMICA E INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DOS ENROLAMENTOS.....	34
4.1. Resistência ôhmica.....	34
4.2. Reactância de dispersão primária e secundária.....	34
5. ATERRAMENTO ELÉCTRICO .....	38
5.1. Aterramento de Sistema e Sistema de Aterramento.....	42

6. INVERSORES DE FREQUÊNCIA .....	43
6.1. Gráfico escalar do inversor de frequência.....	46
7. CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES DE FREQUÊNCIA .....	48
7.1. Conversores com controle escalar.....	49
7.2. Conversores com controle vectorial.....	49
CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS .....	50
DESENHO DA PROPOSTA DE PROTECÇÕES CONTRA QUEIMA DO TRANSFORMADOR .....	50
SELECÇÃO DO TRANSFORMADOR .....	50
Levantamento das Potências Aparentes.....	50
Determinação do factor de demanda.....	50
Factor de crescimento da demanda .....	51
Determinação da demanda provável e da Instalação .....	51
DIMENSIONAMENTO DE PROTECÇÕES .....	51
ELOS FUSÍVEIS .....	51
RAMAL DE LIGAÇÃO AÉREO.....	52
PÁRA RAIOS .....	52
DISJUNTOR DE PROTECÇÃO DO TRANSFORMADOR NO SECUNDÁRIO .....	52
Verificação de poder de corte .....	52
DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES DO TRANSFORMADOR .....	53
Condutor Neutro .....	53
Condutor de Terra.....	54
CRITÉRIO DE QUEDA DE TENSÃO.....	54
CRITÉRIO DA CAPACIDADE DE CURTO-CIRCUITO.....	55
No Transformador.....	55
Aterramento eléctrico do transformador .....	57
Modelo de Cabine de Protecção do Transformador.....	57
CONCLUSÃO .....	61
RECOMENDAÇÕES .....	62
BIBLIOGRAFIA .....	63
ANEXOS .....	66
Cabine Instalada no site da empresa CLN .....	71

## **CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO**

### **1.1. INTRODUÇÃO**

Todos os equipamentos instalados na indústria apresentam degradação com o tempo, por meio de fenómenos físico – químicos, pela má instalação ou mesmo pelo próprio desgaste devido ao envelhecimento do equipamento. Os transformadores não estão isentos deste processo, visto que, por fazerem parte do grupo de equipamentos estáticos, isto é, sem partes móveis, podem se danificar devido a variações de temperatura, tensão, vibrações e outras condições que podem prejudicar o seu funcionamento e vida útil.

Neste trabalho, entende-se por falha a ocorrência que leva à perda da função transformador, isto é, o transformador é retirado forçosamente de operação. O defeito é a ocorrência que, caso o equipamento não sofra intervenção de correção, levaria o transformador à falha. Neste caso, pode-se programar a retirada de operação do transformador para correção da anomalia observada. Esta situação é preferível em todos os aspectos envolvidos, sejam eles, financeiros ou de segurança. No caso de retirada de operação de um transformador por meio de programação para sanar anomalias pode-se fazer o remanejamento das cargas por ele atendidas a fim de não interromper o fornecimento de energia.

Os transformadores dos inversores de média tensão VSD-ROBICON utilizados no site da empresa Nacala Logistics, em Nacala-à-Velha, alvo do estudo operam, em geral, no caso de transformadores interligadores de área (utilizados para interligar dois subsistemas de transmissão de tensões diferentes). No caso de transformadores de carga, a operação é realizada em separado, isto é, cada transformador atende a um barramento de maneira individual.

## 1.2. Delimitação do tema

Estudo da queima precoce dos transformadores dos inversores de média tensão VSD – ROBICON no terminal portuário de Nacala-à-Velha no Corredor Logístico Integrado de Nacala (CLN).

## 1.3. Problema de pesquisa

Diante do cenário actual, da empresa Corredor Logístico Integrado de Nacala, o presente trabalho visa propor um modelo de protecção eléctrica para o transformador dos inversores de média tensão VSD ROBICON, centrando-se principalmente na disponibilidade do equipamento e facilidade de monitoramento e operação do mesmo.

Com o resultado dos métodos científicos utilizados na análise da empresa Corredor Logístico Integrado de Nacala - CLN, através de observação foram identificadas as seguintes **manifestações fácticas**:

- ❖ Queima precoce dos transformadores dos inversores de média tensão VSD ROBICON por causa do ciclo de trabalho e operação.
- ❖ Mau funcionamento das protecções eléctricas instaladas para proteger os transformadores dos inversores de média tensão VSD ROBICON.
- ❖ O tempo de resposta das protecções eléctricas do transformador é demasiado longo ocasionando deste modo o curto-circuito e posterior queima precoce dos transformadores dos inversores de média tensão VSD ROBICON.

Acima mencionadas às manifestações fácticas chega-se a identificar o **problema da investigação** como sendo o seguinte:

Como podemos proteger electricamente de forma segura os transformadores dos inversores de média tensão VSD ROBICON contra queima precoce?

Partindo do princípio e tendo em consideração o problema de pesquisa levado a cabo, identificam-se como sendo as seguintes suas **causas**:

- ❖ Demasiado ciclo de trabalho do transformador, ocasionando o esforço na operação do mesmo.
- ❖ Oscilação frequente no fornecimento da energia eléctrica fornecida pela rede eléctrica.
- ❖ Imperfeição nas harmónicas durante o funcionamento do transformador.

## **1.4. OBJECTIVOS**

Objectivo Geral esta ligado a uma visão global e abrangente do tema. Relaciona-se com o conteúdo intrínseco, quer dos fenómenos e eventos, quer das ideias estudadas. Vincula-se directamente à própria significação da tese proposta pelo projecto (Lakatos & Marconi, 1992).

Objectivos específicos apresentam carácter mais concreto. Tem função intermediária e instrumental, permitindo, de um lado, atingir o objectivo geral e, de outro, aplicar este a situações particulares (Lakatos & Marconi, 1992).

A presente pesquisa o autor estabelece os objectivos que se seguem:

### **1.4.1. Objectivo Geral**

Proposta de protecções contra queima precoce do transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon para o terminal portuário de Nacala-à-Velha.

### **1.4.2. Objectivos Específicos**

- Apresentar a descrição do processo das protecções eléctricas usadas para o transformador do inversor de média tensão.
- Dimensionar as novas protecções para o transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon para o terminal portuário de Nacala-à-Velha.
- Desenhar o circuito eléctrico das protecções para o transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon para o terminal portuário de Nacala-à-Velha.
- Simular as protecções para o transformador do inversor de media tensão no software **ETAP** para os sistemas eléctricos de potência.

## **1.5. HIPÓTESES**

### **1.5.1. Hipótese básica**

O ponto básico do tema, individualizado e especificado na formulação do problema, sendo uma dificuldade sentida, compreendida e definida, necessita de uma resposta, “provável, suposta e provável”, isto é, uma hipótese (Lakatos & Marconi, 1992).

Hipótese de um trabalho científico é a suposição que fazemos, na tentativa de explicar o que desconhecemos e o que pretendemos demonstrar, testando variáveis que poderão legitimar ou não o que queremos explicar ou descobrir (Prodanov & de Freitas, 2013).

A principal resposta é denominada hipótese básica, podendo ser complementada por outras, que recebem a denominação de secundárias. Há diferentes formas de hipóteses; entre elas:

- as que afirmam, em dada situação, a presença ou ausência de certos fenómenos;
- as que se referem à natureza ou características de dados fenómenos, em uma situação específica;
- as que apontam a existência ou não de determinadas relações entre fenómenos;
- as que prevê variação concomitante, directa ou inversa, entre certos fenómenos etc.

### **1.5.2. Hipóteses secundárias**

São afirmações (toda hipótese é uma afirmação) complementares da básica, podendo (Lakatos & Marconi, 1992):

- abarcar em detalhes o que a hipótese básica afirma em geral;
- englobar aspectos não especificados na básica;
- indicar relações deduzidas da primeira;
- decompor em pormenores a afirmação geral;
- apontar outras relações possíveis de serem encontradas etc.

Após fazer vários estudos em campo junto a equipa de manutenção dos equipamentos eléctricos e automação, colectando os documentos de análise de falhas feitas em campo com os engenheiros e especialistas da equipe da confiabilidade chegam-se as seguintes hipóteses:

### **1.5.3. Hipótese 1**

Se as protecções para o transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon forem devidamente dimensionadas, poderemos aumentar a fiabilidade do equipamento e garantir a segurança na sua operação.

### **1.5.4. Hipótese 2**

Se formos a fazer o dimensionamento do aterramento eléctrico correctamente, com resistências nas faixas de 1 – 10 Ohm, podemos garantir o escoamento das cargas estáticas alojadas na carcaça do transformador e proteger contra as descargas atmosféricas.

### **1.5.5. Hipótese 3**

Se garantirmos a manutenção preventiva e preditiva do transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon poderemos garantir e redução das correctivas e proteger contra queima precoce.

## **1.6. JUSTIFICATIVA**

Actualmente as protecções eléctricas são feitas através de dispositivos eléctricos projectados para proteger os circuitos eléctricos contra surtos de tensão e corrente que de certa forma ocasionam harmónicas e causam mau funcionamento do equipamento em operação na indústria. Porém este método não garante a protecção continua dos equipamentos em serviço em estabelecimentos residenciais, comerciais ou industriais.

O tema do projecto de pesquisa abordado vai contribuir para o crescimento do conhecimento científico e para a empresa **Corredor Logístico Integrado de Nacala (CLN)**, melhorando assim a fiabilidade do equipamento, fazendo a boa gestão e monitoramento do mesmo de forma a garantir a sustentabilidade da empresa. O transformador do inversor de média tensão é protegido na sua entrada por um relé Ciprotek e disjuntor de Media Tensão e na sua saída fusíveis que alimentam a célula de potência, pois o mesmo está utilizando sistema de aterramento do tipo grelha cuja mesma está instalada no pátio de carvão de Nacala-à-Velha.

As protecções a serem dimensionadas para o transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon vai contribuir para os avanços da ciência e tecnologia em Moçambique, garantindo a melhor confiabilidade dos técnicos responsáveis pela manutenção do equipamento. Porém, o novo

sistema de aterramento eléctrico vai garantir que as descargas de cargas estáticas armazenadas na carcaça do transformador serão feitas devidamente para o solo e protegendo também contra as descargas atmosféricas. Porém, o mercado oferece poucas soluções para os técnicos industriais.

Actualmente com a ajuda de ferramentas da ciência e tecnologia é possível monitorar as protecções para o transformador do inversor de média tensão VSD-Robicon com mais precisão indústria mineira, estabelecimentos comerciais ou industriais através de dispositivos eléctricos de protecção.

## **CAPÍTULO II: METODOLOGIA**

### **2.1. METODOLOGIA DE PESQUISA**

#### **2.1.1. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Segundo Diehl e Tatim (2004, p. 98) “na metodologia devem ser claramente descritos os procedimentos que serão utilizados na pesquisa”. Para Bello (2007, p. 20) A Metodologia é “a explicação minuciosa, detalhada, rigorosa e exacta de toda acção desenvolvida no método (caminho) do trabalho de pesquisa”.

Nesta pesquisa serão usados, vários métodos para alcançar os objectivos específicos e geral, na seguinte linha metodológica.

#### **2.2. Tipo de pesquisa**

Neste trabalho optou-se pela pesquisa qualitativa, foi fundamentada por GIL (1991) Citado por SILVA e MENEZES (2001) que afirmou que “a finalidade deste tipo de pesquisa é de produzir ideias para serem implementadas na resolução de determinado problema, daí que se baseia em factos reais de interesse local”.

Nisto, o trabalho será realizado no Corredor Logístico Integrado de Nacala (CLN) estribando-se no contacto directo com responsáveis pela operação e manutenção do transformador de média tensão dos inversores de média tensão para as instalações da empresa.

#### **2.3. Técnica de colecta de dados**

- **Histórico - lógico** na análise da literatura, documentação técnica ligada aos Transformadores, que permitiu entre toda a lógica para determinar a investigação e as tendências futuras ligadas aos Transformadores dos inversores de média tensão, permitindo a melhor compreensão da pesquisa.
- **Hermenêutico - dialéctico** que consiste em uma metodologia interactiva, usada ao longo da pesquisa na compreensão, explicação e interpretação do objecto e campo de acção.
- **Análise - síntese** consistiu no processamento de informação obtidas em documentos e literaturas, no que tange a características do objecto e o alcance da investigação para tirar devidas conclusões.

➤ **Métodos e técnicas empíricas**

- ❖ Entrevista aos técnicos do sector de Manutenção Eléctrica da empresa Corredor Logístico Integrado de Nacala (CLN), cujos mesmos são responsáveis pela operação e manutenção do transformador de média tensão dos inversores de média tensão para as instalações da empresa.

Neste caso usou-se uma amostra de 15 funcionários do sector de Manutenção Eléctrica da empresa Corredor Logístico Integrado de Nacala (CLN).

- ❖ Pesquisas com o Engenheiro líder de equipe, a fim de avaliar o estado actual do monitoramento e o modelo da proposta das protecções eléctricas.
- ❖ Revisão de documentos técnicos para dar mais consistência na fundamentação do campo de acção do projecto de pesquisa.

## **CAPÍTULO III: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **3.1. TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS E TRIFÁSICOS**

#### **3.1.1. NECESSIDADE DA TRANSFORMAÇÃO DAS CORRENTES ALTERNADAS**

A exigência técnica e económica impõe a construção de grandes usinas eléctricas, em geral situadas muito longe dos centros de aproveitamento, pois devem utilizar a energia hidráulica dos lagos e rios das montanhas. Surge assim a necessidade do transporte da energia eléctrica por meio de linhas de comprimento notável de acordo com MARTIGNONI (1991:30).

Por motivos económicos e de construção, as secções dos condutores destas linhas devem ser mantidas dentro de determinados limites, o que torna necessária a limitação da intensidade das correntes nas mesmas. Assim sendo, as linhas deverão ser construídas para funcionar com uma tensão elevada, que em certos casos atinge a centenas de milhares de volts.

Estas realizações são possíveis em virtude de a corrente alternada pode ser transformada facilmente de baixa para alta tensão e vice-versa, por meio de uma máquina estática, de construção simples e rendimento elevado, que é o transformador para MARTIGNONI (1991:53). Os geradores instalados nas usinas geram a energia eléctrica com a tensão de aproximadamente 6000 volts. Para efectuar-se o transporte desta energia, eleva-se a tensão a um valor oportuno por meio de um transformador-elevador.

Para MARTIGNONI (1991) na chegada da linha, outro transformador executa a função inversa, isto é, reduz a tensão ao valor necessário para a utilização. Podem então ser escolhidas as três tensões, isto é, de geração, de transporte e de distribuição, com plena liberdade, dando-se a cada uma o valor que se apresenta mais conveniente. Naturalmente, nestas transformações o valor da intensidade de corrente sofrerá a transformação inversa à da tensão, pois o produto das mesmas, isto é, a potência eléctrica, deve ficar inalterada.

### **3.2. PRINCÍPIO DE CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR MONOFÁSICO**

Pelos conceitos trazidos da Electrotecnia, o funcionamento do transformador baseia-se nos fenómenos de Indução Mútua entre dois circuitos electricamente isolados, mas magneticamente ligados.

Para que a ligação magnética entre os dois circuitos mencionados seja a mais perfeita possível, é necessário que estes estejam enrolados sobre um núcleo magnético de pequena relutância. Este

núcleo deverá ter elevada permeabilidade e por isso seus entreferros devem ser muito reduzidos. Por motivos de construção este núcleo possui a forma indicada na fig. 1, e sendo destinado a canalizar um fluxo alternado deve ser realizado por um pacote de lâminas de ferro oportunamente isoladas para MARTIGNONI (1991).

Aplicando-se nos extremos de qualquer destes enrolamentos a tensão alternada que se quer transformar  $V_1$ , gera-se nos extremos do outro a tensão transformada  $V_2$ . A relação entre estas duas tensões chama-se relação de transformação do transformador, a qual, como se verá, é pouco diferente da relação entre o número das espiras  $N_1$  e  $N_2$  dos dois enrolamentos na perspectiva de MARTIGNONI (1991. p.75)

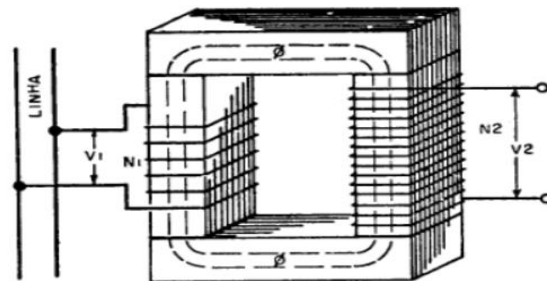


Fig.1: Modelo de enrolamentos de Transformador Monofásico.

Fonte: MARTIGNONI (1991)

O enrolamento alimentado pela tensão  $V_1$  que se quer transformar chama-se enrolamento primário e o outro, que fornece a tensão transformada  $V_2$ , chama-se enrolamento secundário. Analogamente, as duas tensões  $V_1$  e  $V_2$  são denominadas comumente de tensão primária e secundária. As correntes  $I_1$  e  $I_2$  que atravessarão os dois enrolamentos constituem as correntes primária e secundária do transformador. Como se sabe, os fenômenos de mútua indução são reversíveis, portanto nenhuma distinção pode ser feita entre os circuitos primário e secundário, pois os dois enrolamentos podem funcionar indiferentemente como primário ou secundário, bastando alimentar um ou outro. Construtivamente os dois enrolamentos de Alta Tensão (A.T.) o que tem maior número de espiras e enrolamentos de baixa tensão (B.T.) o que tem menor número de espiras segundo MARTIGNONI (1991).

Porém, o transformador funcionará como elevador de tensão quando se alimenta como primário o enrolamento B.T. e pelo contrário funciona como redutor de tensão quando se alimenta o enrolamento A.T.

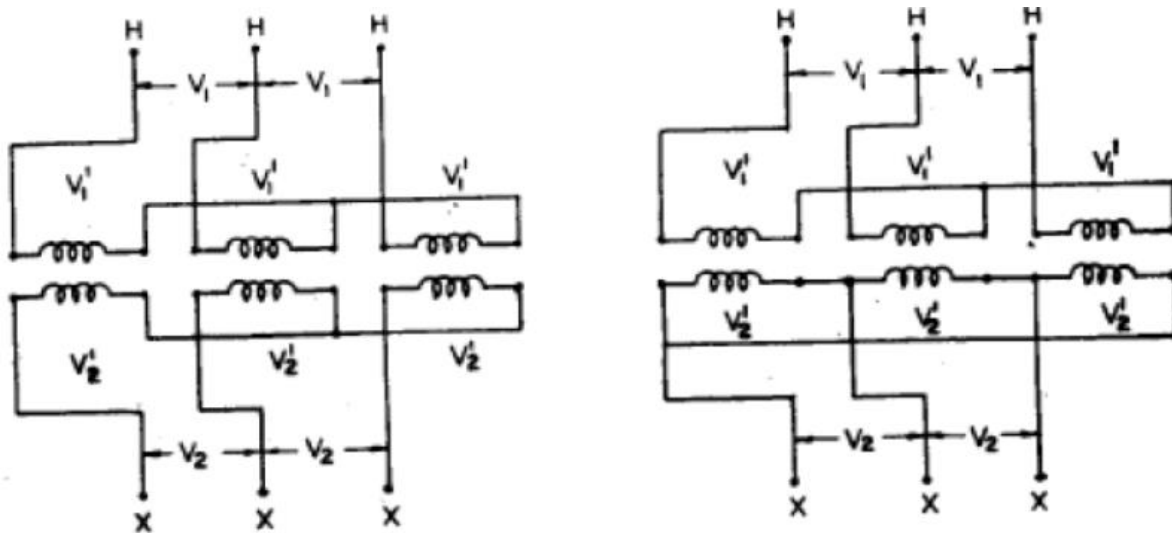
### 3.3. PRINCÍPIO DE CONSTRUÇÃO DO TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Para a transformação dos sistemas trifásicos podem-se empregar três transformadores monofásicos distintos e iguais entre si. Os três enrolamentos primários destes transformadores serão alimentados pela linha trifásica primária através de agrupamento em estrela ou triângulo. Dos três enrolamentos secundários que são também agrupados em estrela ou triângulo, sai a linha trifásica secundária. Podem-se realizar os quatro esquemas de agrupamento da figura 2.

Em qualquer dos casos a relação de transformação é considerada como a relação entre a tensão de linha primária  $V_1$  e a tensão de linha secundária  $V_2$ . Conforme o agrupamento, as tensões primárias e secundárias  $V_1'$  e  $V_2'$  relativa a cada transformador monofásico adquirem os valores indicados na fig.2, em correspondência a cada esquema.

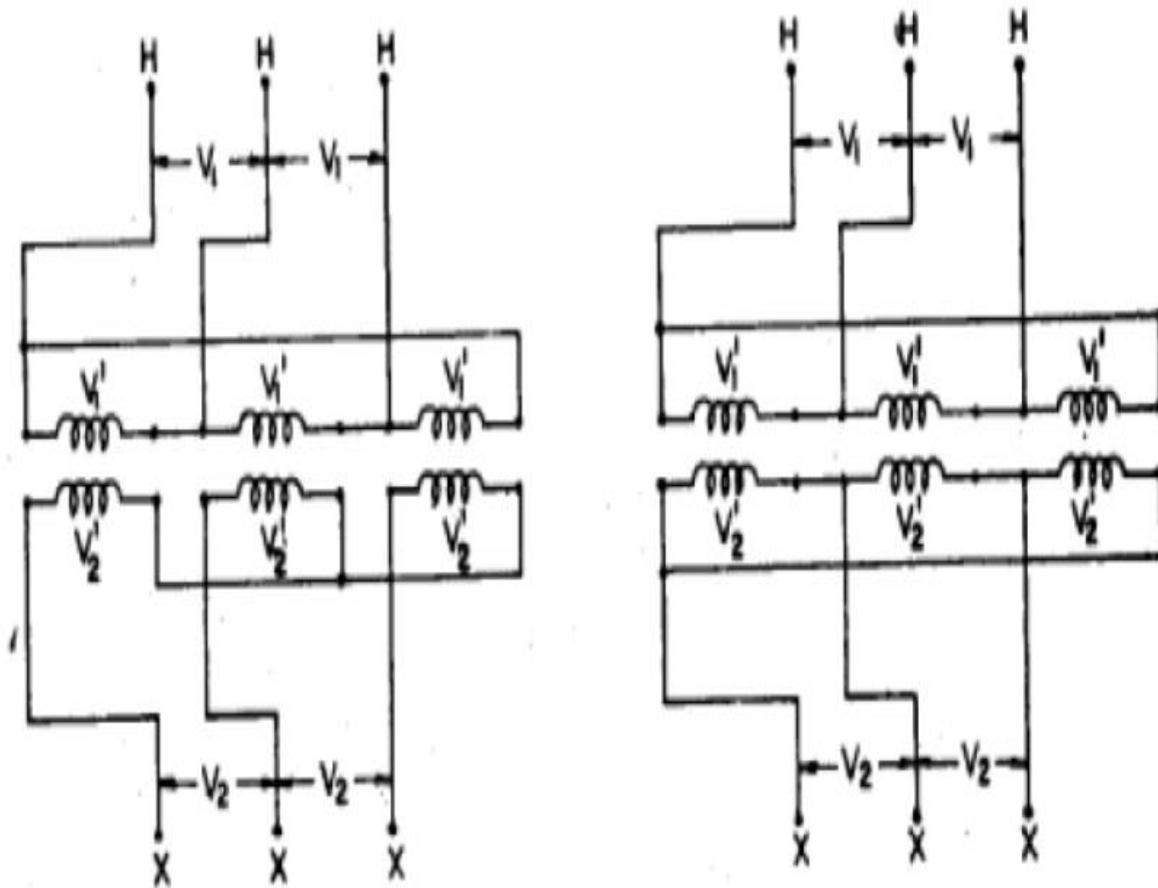
O emprego de transformadores monofásicos para sistemas trifásicos é limitado a casos especiais. Comumente, pela transformação dos sistemas trifásicos, empregam-se transformadores trifásicos, os quais são obtidos da reunião sobre o mesmo núcleo trifásico dos três transformadores monofásicos antes considerados.

O princípio sobre o qual são baseadas a possibilidade e a conveniência de se executar esta reunião de circuitos magnéticos relativos às três fases em um único conjunto é ilustrado na figura 3.



a) Y/Y:  $V_1' = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$  ;  $V_2' = \frac{V_2}{\sqrt{3}}$

b) Y/Δ:  $V_1' = \frac{V_1}{\sqrt{3}}$  ;  $V_2' = V_2$



c) Y/Δ:  $V_1' = V_1$  ;  $V_2' = \frac{V_2}{\sqrt{3}}$

d) Δ/Δ:  $V_1' = V_1$  ;  $V_2' = V_2$

Agrupamento “estrela - estrela”

Y/Y: esquema (a)

Agrupamento “estrela - triângulo”

Y/Δ: esquema (b)

Agrupamento “triângulo - estrela”

Δ/Y: esquema (c)

Agrupamento “triângulo - triângulo”

Δ/ Δ: esquema (d)

Figura 2.: Modelos de construção de transformadores trifásicos.

Fonte: MARTIGNONI (1991)

Os três núcleos monofásicos estão agrupados em estrela, isto é, cada coluna externa abriga tanto o enrolamento primário com o secundário de uma fase. A coluna central é desprovida de enrolamentos. Se os três enrolamentos primários possuem o mesmo número de espiras  $N_1$  e são alimentados por três tensões iguais e defasadas de  $120^\circ$  entre si, também os fluxos  $\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  e  $\Phi_3$  nas três colunas externas resultam iguais entre si e defasados a  $120^\circ$  um com respeito ao outro.

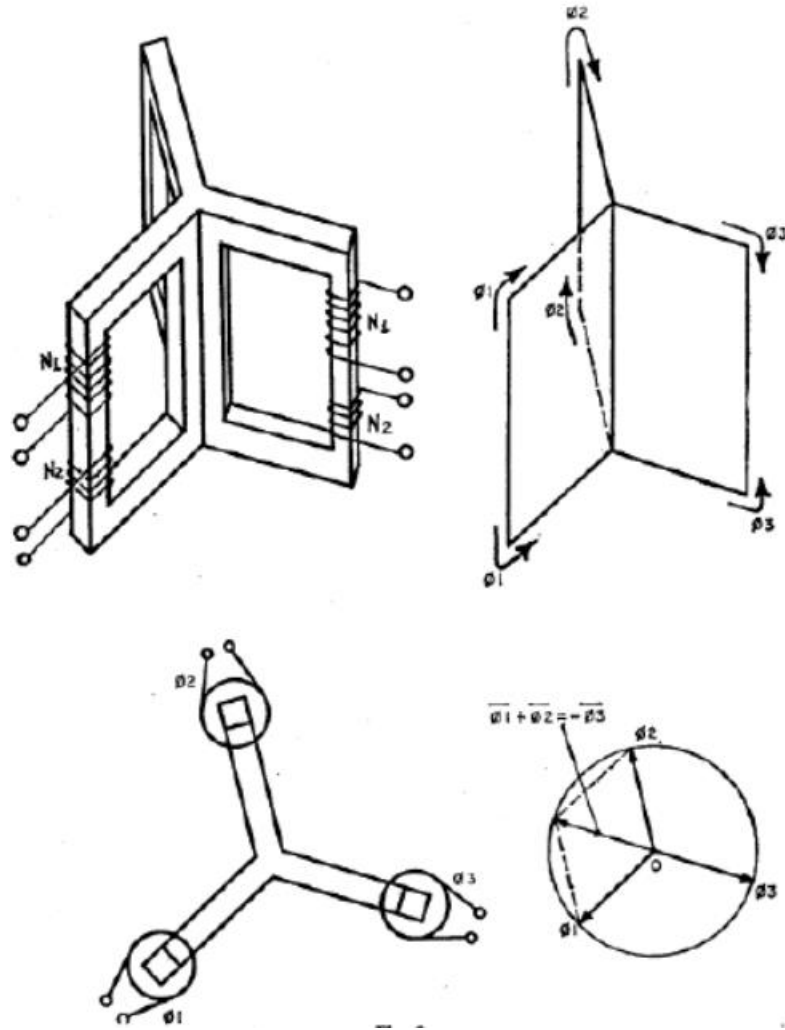


Figura 3.: Desenho modelado de um trafo trifásico.

Fonte: MARTIGNONI (1991)

A resultante destes três fluxos é nula e, portanto, a coluna central não é atravessada por fluxo magnético, o que permite eliminá-la sem que a distribuição dos fluxos nas colunas remanescentes resulte alterada. No caso exposto, cada coluna é atravessada por um fluxo igual e oposto à resultante dos outros dois fluxos; cada coluna, portanto, funcionará como retorno dos fluxos relativos às outras duas colunas.

Com a eliminação da coluna central, e dada a necessidade da construção laminada, o núcleo trifásico pode ser realizado a disposição de construção da fig.4.

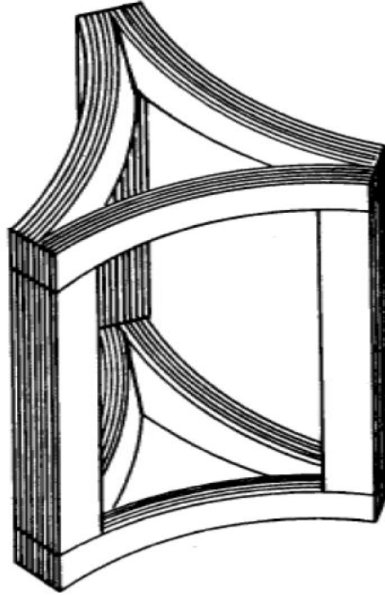


Figura 4.: Núcleo trifásico em construção laminada.

Fonte: MARTIGNONI (1991)

Com esta disposição consegue-se a vantagem de diminuir notavelmente o peso. O núcleo trifásico assim realizado resulta perfeitamente simétrico com relação às três colunas e os circuitos magnéticos das três fases apresentam a mesma relutância. As correntes magnetizantes relativas às três colunas resultarão, portanto, iguais entre si, isto é, constituem um sistema trifásico simétrico e equilibrado. O núcleo assim construído é, porém de construção difícil e é usado somente em casos especiais.

Nos transformadores trifásicos normais, com intuito de simplificar a construção, abandona-se a condição de simetria, que praticamente não tem importância, e dá-se ao núcleo a forma indicada na fig. 5. As três colunas são assim colocadas no mesmo plano para ligá-las entre si com uma simples travessa inferior e uma superior. No conjunto assim constituído os fluxos nas três colunas devem ainda resultar iguais entre si e defasados a  $120^\circ$ , pois cada um destes fluxos deve necessariamente induzir no respectivo enrolamento primário uma f.e.m igual e contrária à tensão aplicada. A relutância das três colunas adquire valores diferentes, sendo o da coluna central inferior aos das colunas laterais. As correntes magnetizantes também serão diferentes entre si, resultando as duas correntes magnetizantes relativas às colunas laterais levemente maiores que a corrente magnetizante da coluna central.

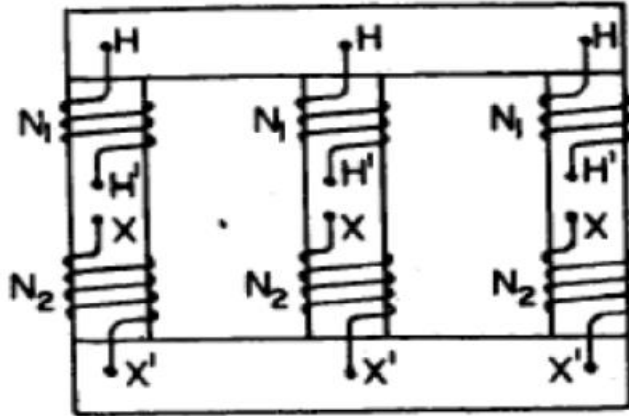


Figura 5.: Núcleo de um transformador trifásico.

Fonte: MARTIGNONI (1991)

Este desequilíbrio das correntes manifesta-se somente no funcionamento a vazio do transformador, pois no funcionamento com carga as correntes magnetizantes  $I_{\mu}$  relativas às três fases resultam desprezíveis com respeito às correntes primárias de reacção  $I_1'$ .

Excluindo-se este desequilíbrio, pode-se afirmar que o funcionamento do transformador trifásico em regime normal não difere substancialmente dos três transformadores monofásicos distintos, com idêntica ligação entre as fases. Em cada coluna do transformador trifásico pode-se então traçar um diagrama idêntico ao já considerado para o transformador monofásico.

### 3.4. PRINCÍPIO DO FUNCIONAMENTO DO TRANSFORMADOR

Para poder-se facilmente entender o princípio do funcionamento do transformador, é necessário analisar um transformador ideal, no qual sejam nulas as resistências eléctricas dos enrolamentos, as perdas no ferro e as dispersões magnéticas. Considera-se antes o funcionamento a vazio e depois com carga: o primeiro caso verifica-se quando se aplica ao enrolamento primário uma tensão  $V_1$  deixando o enrolamento secundário aberto; o segundo caso verifica-se quando o enrolamento secundário é efectivamente utilizado para alimentar um determinado circuito.

### 3.5. Funcionamento a vazio

Seja  $V_1$  o valor eficaz da tensão alternada com frequência  $f$ , aplicada nos extremos do enrolamento primário e seja  $N_1$  o número das espiras deste enrolamento.

Sendo o enrolamento secundário aberto, não é percorrido por nenhuma corrente, ficando inativo. Tendo suposto nula a resistência ôhmica, o enrolamento primário comporta-se como um circuito puramente indutivo. Este absorverá, portanto, determinada corrente  $I_\mu$ , defasada de  $90^\circ$  em atraso com respeito à tensão aplicada  $V_1$ . Esta corrente produzirá um fluxo  $\Phi$  que, na hipótese feita, fica totalmente canalizado no núcleo. Este fluxo é evidentemente um fluxo alternado que varia com a mesma fase da corrente  $I_\mu$  que o produz.

Se  $\Phi_M$  é o valor máximo deste fluxo e  $\omega=2\pi f$  (sua pulsação) ele induz, como é sabido, em cada espira que o abraça uma f.e.m cujo valor máximo é de  $10^{-8}\omega\Phi_M$ . Esta f.e.m é defasada de  $90^\circ$  em atraso com respeito ao fluxo, conforme mostra o diagrama da fig. 6.

No enrolamento primário composto de  $N_1$  espiras agrupadas em série, gera-se uma f.e.m (primária) que adquire o seu valor máximo:

$$E_{1M} = 10^{-8}\omega\Phi_M N_1$$

Esta f.e.m é representada no diagrama pelo vector  $E_1$  a  $90^\circ$  em atraso com respeito ao vector  $\Phi$  que representa o fluxo. Analogamente o mesmo fluxo induz no outro enrolamento composto por  $N_2$  espiras, a f.e.m. secundaria cujo valor máximo será:

$$E_{2M} = 10^{-8}\omega\Phi_M N_2$$

Esta f.e.m. é representada no diagrama pelo vector  $E_2$  a  $90^\circ$  em atraso cm respeito a  $\Phi$  e, portanto, em fase com  $E_1$ . Os valores eficazes das duas f.e.m., primária e secundária, são dados por:

$$E_{1M} = 10^{-8} \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_M \cdot N_1 = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_M N_1$$

$$E_{2M} = 10^{-8} \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_M \cdot N_2 = 10^{-8} \cdot 4,44 \cdot f \cdot \Phi_M N_2$$

De onde dividindo-se membro a membro obtém-se:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

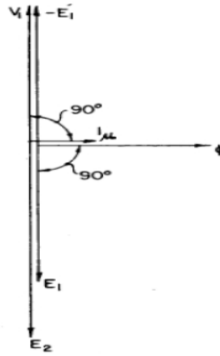


Fig. 6.: Diagrama vectorial das amplitudes das tensões.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Isto é, as duas f.e.m., primária e secundária, estão entre si na relação directa dos números das espiras dos respectivos enrolamentos.

O diagrama evidencia que as f.e.m. induzidas nos dois enrolamentos resultam em oposição de fase com a tensão primária. Portanto, a f.e.m., primária,  $E_1$  reage sobre a tensão aplicada  $V_1$  como uma força contraelectromotriz (f.c.e.m.).

Tendo suposto nula a resistência ôhmica, e, portanto, nula a queda de tensão correspondente, e nula as dispersões magnéticas, deverá resultar  $V_1 = -E_1$ . Esta condição determina o valor do fluxo que deve produzir-se no núcleo, pois devendo resultar  $E_1 = -V_1$  o fluxo no núcleo deverá adquirir o valor máximo  $\Phi_M$  que fica determinado pela relação,

$$\Phi_M = 10^8 \cdot \frac{E_1}{4,44 \cdot f \cdot N_1}$$

Se é fixada a tensão primária  $V_1$ , o fluxo no núcleo é completamente independente da forma e da relutância do sistema, a qual intervirá somente para determinar o valor da corrente magnetizante  $I_\mu$  necessária a produzi-lo.

Se  $R$  é a relutância do núcleo, correspondente ao valor máximo  $\Phi_M$  do fluxo, a corrente  $I_\mu$  deve alcançar um valor máximo  $I_{\mu M}$  que fica determinado pela relação.

$$N_1 I_{\mu M} = \Phi_M R$$

Pode-se dizer, então, que no funcionamento em vazio do transformador a tensão  $V_1$  aplicada ao enrolamento primário produz um fluxo que por sua vez gera no enrolamento primário a f.c.e.m  $E_1$  igual e contrária à tensão aplicada. Este fluxo é produzido pela corrente magnetizante  $I_\mu$ ; defasada de  $90^\circ$  em atraso sobre a tensão  $V_1$ .

Para se reduzir esta corrente ao menor valor possível, é necessário que a relutância do núcleo seja a menor possível.

No transformador ideal, a f.e.m primária  $E_1$  foi considerada igual à tensão aplicada  $V_1$ . Substituindo-se a f.e.m secundária  $E_2$  pela tensão que se manifesta nos extremos do circuito secundário  $V_2$  (com circuito aberto) pode-se escrever

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Isto quer dizer que, aplicando ao circuito primário a tensão  $V_1$ , nos bornes do secundário manifesta-se a tensão  $V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1$ . Construindo-se o enrolamento secundário com elevado número de espiras em relação ao primário, pode-se obter uma tensão secundária elevada, mesmo que a tensão primária seja muito pequena. Inversamente, alimentando-se o enrolamento possuidor de muitas espiras com uma tensão elevada, pode-se obter no outro enrolamento uma tensão reduzida.

Existe, assim, a possibilidade de realizar qualquer relação de transformação unicamente fixando convenientemente a relação das espiras  $\frac{N_1}{N_2}$ ; nos transformadores esta relação coincide com a relação  $\frac{E_1}{E_2}$ ; enquanto a relação  $\frac{V_1}{V_2}$  resulta, como será visto mais tarde, um pouco diferente em consequência das quedas de tensão nos enrolamentos.

### 3.6. Funcionamento com Carga

Se os bornes do enrolamento secundário, são ligados a uma impedância (que se supõe de caracter indutivo), como indica a fig. 7, a f.e.m  $E_2$  faz circular nesta a corrente  $I_2$ , que resultará defasada com respeito à f.e.m de certo ângulo  $\varphi_2$ , conforme diagrama vectorial da fig. 8.

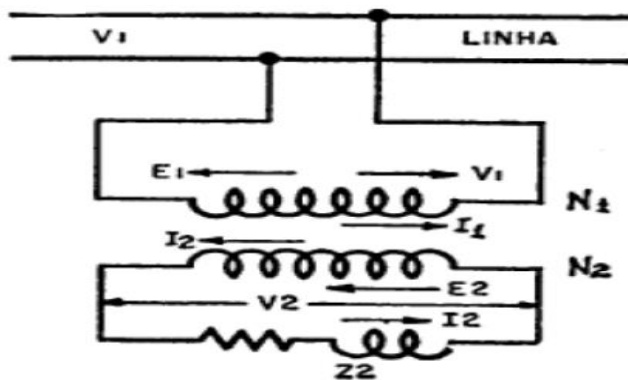


Fig.7.: Transformador funcionando em carga.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

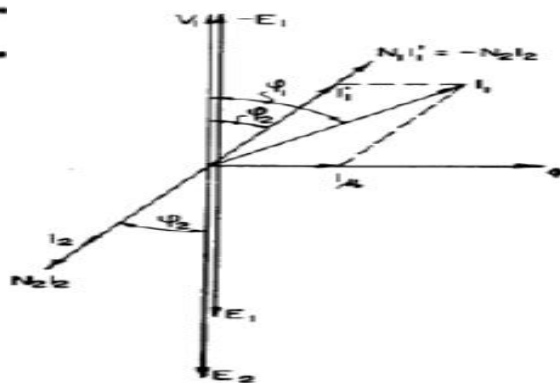


Fig. 8.: Diagrama vectorial do trafo em carga.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Esta corrente secundária, circulando nas espiras do enrolamento correspondente, produz sobre o núcleo uma força magnetomotriz expressa por:  $N_2 I_2$  em fase com  $I_2$ , a qual tende evidentemente a alterar o fluxo produzido pela força magnetomotriz  $N_1 I_\mu$ . Nestas condições, alteram-se as f.e.m. induzidas nos dois enrolamentos, o que produz no circuito primário um desequilíbrio entre a tensão aplicada  $V_1$  e a f.e.m. contrastante  $E_1$ .

O enrolamento primário absorverá uma corrente mais elevada. A nova corrente absorvida deverá ser tal que possa restabelecer o equilíbrio preexistente entre a tensão aplicada  $V_1$  e a correspondente f.e.m. É fácil compreender, portanto, que começando a circular uma corrente  $I_2$  no circuito secundário, no enrolamento primário é imediatamente chamada, além da precedente corrente magnetizante  $I_\mu$  uma nova corrente  $I_1'$  cuja f.m.m.  $N_1 I_1'$  se destina a equilibrar a f.m.m. secundária  $N_2 I_2$ .

Sobre o diagrama vectorial da fig. 8 ao vector  $N_2 I_2$  contrapõe-se assim o vector igual e oposto  $N_1 I_1'$  e conseqüentemente a f.m.m. resultante será ainda a precedente  $N_1 I_\mu$  e o fluxo no núcleo adquire, portanto, o seu valor inicial  $\Phi$ . Restabelece-se assim o equilíbrio entre a tensão aplicada ao enrolamento primário  $V_1$  e a f.e.m. que a contrasta  $E_1$ .

Pode-se então dizer que o regime de funcionamento do transformador é determinado pela necessidade da f.e.m.  $E_1$  resultar constantemente igual e oposta à tensão aplicada  $V_1$ . Se esta última é mantida constante, também a f.e.m.  $E_1$  deve ser constante, e por isso deve ficar inalterado o valor do fluxo no núcleo, qualquer que seja a corrente  $I_2$  fornecida pelo enrolamento secundário. Esta necessidade obriga o enrolamento primário a absorver da linha que o alimenta, além da corrente magnetizante  $I_\mu$ , necessária à produção do fluxo, também outra corrente  $I_1'$  cuja f.m.m. resulta constantemente igual e oposta à f.m.m. produzida pela corrente secundária. Em cada condição da carga deve, portanto, resultar  $N_1 I_1' = N_2 I_2$ .

A corrente  $I_1'$  absorvida pelo enrolamento primário, a fim de vencer a reacção magnética provocada pela corrente fornecida pelo secundário, chama-se corrente primária de reacção, sendo representada sobre o diagrama por um valor  $I_1'$  directamente oposto ao vector da corrente secundária  $I_2$  e seu valor eficaz é determinado pela reacção  $N_1 I_1' = N_2 I_2$  de onde resulta:

$$I_1' = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad \text{ou} \quad \frac{I_2}{I_1'} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$$

Resulta que a corrente secundária  $I_2$  e a corrente primária de reacção  $I_1'$  estão entre si na relação inversa dos números das espiras dos respectivos enrolamentos, portanto também na relação inversa das duas f.e.m. correspondentes.

Pode-se então dizer que o transformador com carga a transformação que se verifica entre as f.e.m. primária e secundária é acompanhada pela transformação inversa entre a corrente secundária  $I_2$  e a correspondente corrente primária de reacção  $I_1'$ .

Deste facto resulta a necessária igualdade que deve existir, desprezando-se as perdas, entre a potência eléctrica fornecida pelo enrolamento secundário e a potência que é correspondentemente absorvida pelo enrolamento primário.

Dos factos expostos conclui-se que em um transformador com carga, quando o enrolamento secundário fornece determinada corrente  $I_2$ , o enrolamento primário absorve, da linha que o alimenta, uma corrente total  $I_1$ , que é resultante da corrente magnetizante  $I_\mu$  e da corrente de reacção  $I_1' = -I_2 \frac{N_2}{N_1}$ .

Esta corrente  $I_1$  constitui a corrente primária que corresponde à corrente secundária considerada. A corrente  $I_1$  resulta defasada com respeito à tensão  $V_1 = -E_1$  de um ângulo  $\varphi_1$ ; o qual depende do valor e da defasagem  $\varphi_2$ ; da corrente secundária.

Variando a carga do transformador, isto é, variando a corrente fornecida pelo enrolamento secundário, fica inalterada a corrente magnetizante  $I_\mu$ , mas varia junto à corrente  $I_2$  a corrente primária de reacção  $I_1'$ . Quando o transformador trabalha com carga reduzida, isto é, com uma pequena corrente secundária, também a corrente de reacção é pequena e, portanto, a corrente total primária  $I_1$  tende a aproximar-se da corrente magnetizante  $I_\mu$  e o ângulo  $\varphi_1$  aproxima-se de  $90^\circ$ . Quando, pelo contrário, o transformador trabalha a plena carga, acontece que a corrente magnetizante  $I_\mu$  resulta muito pequena com respeito à corrente de reacção  $I_1'$  e, portanto, a corrente total primária  $I_1$  é quase igual à corrente  $I_1'$  e pode-se escrever

$$\frac{I_1}{I_2} = \sim \frac{N_2}{N_1}$$

Assim sendo, desprezando-se a influência da corrente magnetizante, é possível expressar a corrente primária total a plena carga pela relação

$$I_1 = \sim \frac{N_2}{N_1} I_2$$

Com carga reduzida a corrente magnetizante não pode ser desprezada e a relação antes escrita refere-se somente à corrente de reacção  $I_1'$ .

## **4. RESISTÊNCIA ÔHMICA E INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DOS ENROLAMENTOS**

### **4.1. Resistência ôhmica**

Os enrolamentos primários e secundários do transformador apresentam inevitavelmente uma determinada resistência eléctrica.

Estas resistências são chamadas brevemente de resistência primária e secundária do transformador e são normalmente indicadas, em cada fase, com  $R_1$  e  $R_2$ . Estas exercem sobre o funcionamento do transformador um duplo efeito. Em primeiro lugar, determinam uma queda de tensão chamada queda ôhmica primária e secundária: em segundo lugar, produzem uma perda de energia por efeito Joule, cuja potência constitui a perda no cobre primário e secundário do transformador. Para conter esta perda em limites convenientes é necessário tornar suficientemente pequenas as resistências primárias e secundárias, escolhendo-se oportunamente a secção dos condutores do enrolamento.

O enrolamento A.T. que possui um número maior de espiras com menor secção, apresenta sempre uma resistência maior que a do enrolamento B.T. As resistências são, em geral, proporcionadas de maneira que, no funcionamento com carga nominal, as perdas nos dois enrolamentos resultam sensivelmente iguais entre si, isto é:

$$R_1 I_1^2 = R_2 I_2^2$$

Verifica-se, portanto,

$$\frac{R_1}{R_2} = \sim \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2$$

Esta condição é realizada fixando-se nos dois enrolamentos A.T. e B.T. a mesma densidade de corrente e construindo-se os enrolamentos com condutores cuja secção é proporcional às respectivas correntes.

### **4.2. Reactância de dispersão primária e secundária**

Falando-se do transformador ideal, foi suposto que todo o fluxo que interessa à máquina fique canalizado no núcleo, concatenando-se, portanto, totalmente, em ambos os enrolamentos. Na realidade existe certo fluxo disperso, o qual se fecha no ar ao redor do enrolamento.

Considerando-se, por exemplo, um transformador monofásico com o primário enrolado sobre uma coluna e o secundário sobre a outra, pode-se analisar a distribuição do fluxo indicado na figura

9. O fluxo principal  $\Phi$  fica efectivamente canalizado no núcleo e, portanto, concatena-se com ambos os enrolamentos primário e secundário.

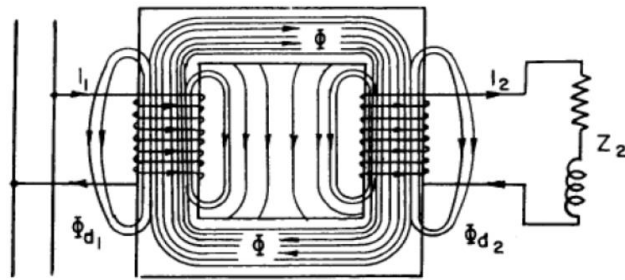


Fig. 9: Ilustração do fluxo de dispersão no transformador.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Quando o transformador funciona a vazio, este fluxo é produzido pela corrente magnetizante  $I_\mu$  pela conhecida relação:

$$N_1 I_\mu = \Phi R$$

Quando, pelo contrário, o transformador funciona com carga, o fluxo  $\Phi$  é produzido pela f.m.m. primária e secundária com base na equação.

$$\overline{N_1 I_1} + \overline{N_2 I_2} = \overline{\Phi R}$$

Este fluxo é verdadeiro fluxo útil do transformador, isto é, o que determina a transferência da energia do primário ao secundário.

O circuito primário é, porém, contornado por um fluxo  $\Phi_{d1}$  representado pelas linhas de força que saem do núcleo lateralmente e fecham-se no ar sem concatenar-se com o enrolamento secundário. Este fluxo constitui o fluxo disperso primário.

Como o fluxo disperso se desenvolve no ar, não está sujeito aos fenómenos de saturação, e mantém-se quase proporcional à corrente  $I_1$  que o produz. Indicando-se, portanto, com  $L'$  um coeficiente de proporcionalidade pode-se escrever

$$\Phi_{d1} = L' I_1$$

O coeficiente  $L'$  assim definido constitui a indutância de dispersão primária, medida em henry e a esta corresponde a reatância de dispersão primária, medida em ohm, fornecida por:

$$X' = \omega L'$$

Considerando-se o enrolamento secundário, observam-se os factos seguintes:

Enquanto o transformador trabalha a vazio, o enrolamento secundário não é percorrido por nenhuma corrente e, portanto, não gera nenhum fluxo: em tais condições o enrolamento secundário é atravessado unicamente pelo fluxo  $\Phi$ , produzido pela corrente magnetizante do enrolamento primário.

Quando, pelo contrário, o enrolamento secundário alimenta um circuito utilizador, este é atravessado por uma corrente  $I_2$ . Esta corrente faz agir sobre o núcleo uma f.m.m.  $N_2I_2$  a qual é equilibrada por uma f.m.m. igual e oposta  $N_1I_1'$ , devida à corrente primária de reacção  $I'$ . Nestas condições o fluxo principal no núcleo fica inalterado.

A corrente secundária produz também um fluxo  $\Phi_{d2}$ , o qual se fecha directamente no ar ao redor do enrolamento secundário sem interessar o primário: este fluxo constitui o fluxo disperso secundário, o qual é proporcional à corrente  $I_2$  que o produz. Indicando-se com  $L''$  um coeficiente de proporcionalidade pode-se escrever:

$$\Phi_{d2} = L''I_2$$

O coeficiente  $L''$  assim definido constitui a indutância de dispersão secundária, à qual corresponde, como no enrolamento primário, a reactância de dispersão.

$$X'' = \omega L''$$

Os valores das duas reactâncias de dispersão  $X'$  e  $X''$ , por uma dada frequência, dependem dos fluxos de dispersão e, portanto, dependem do tipo e da posição recíproca dos enrolamentos.

Evidentemente os fluxos dispersos resultarão tanto maiores quanto mais longe entre si estão os dois enrolamentos do transformador: a disposição sobre colunas distintas como a fig. 5, é, portanto, a que produz mais dispersões e por tal razão é raramente utilizada.

Nos enrolamentos concêntricos ou tubulares, fig. 10, a bobina 1 (**B.T.**) encontra-se ao redor do núcleo e a 2 (**A.T.**) encontra-se ao redor da primeira.

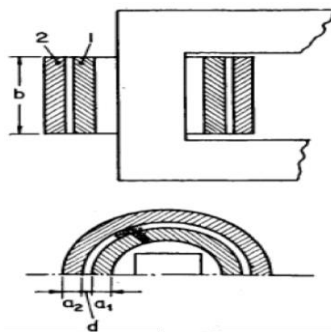


Figura 10.: Enrolamentos concêntricos ou tubulares dos transformadores.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

As indutâncias de dispersão desses enrolamentos são dadas por:

$$L_1 = \frac{0,4N_1^2}{b} \cdot \left( \frac{d}{2} l_{cum} + \frac{a_1}{3} l_{eu1} \right) 10^{-8} \text{ henry}$$

$$L_2 = \frac{0,4N_2^2}{b} \cdot \left( \frac{d}{2} l_{eum} + \frac{a_2}{3} l_{eu2} \right) 10^{-8} \text{ henry}$$

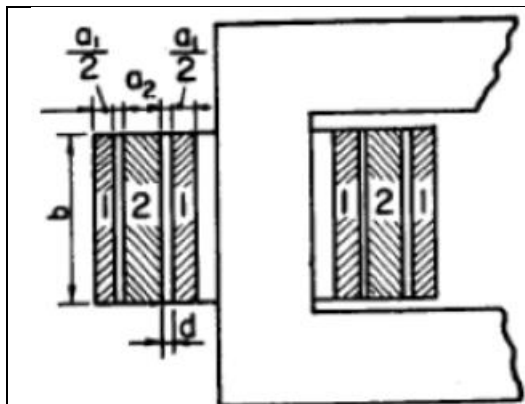


Figura 11: Enrolamentos tubulares duplos.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Onde:

$a_1$  – Espessura da bobina B.T. (cm)

$a_2$  – Espessura da bobina A.T. (cm)

$d$  – Espessura do isolante entre as bobinas (cm)

$l_{eu1}$  – comprimento médio da bobina B.T. (cm)

$l_{eu2}$  – comprimento médio da bobina A.T. (cm)

$$l_{eum} = \frac{l_{eu1} + l_{eu2}}{2} \text{ (cm)}$$

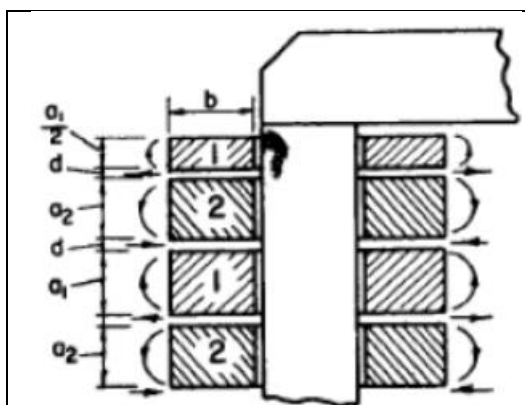


Figura 12: Enrolamentos com bobinas alternadas.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Pelos enrolamentos tubulares duplos, fig. 11, a indutância é aproximadamente a metade da anterior.

No enrolamento com bobinas alternadas os fluxos dispersos adquirem a forma indicada na fig. 12. A dispersão é tanto menor quanto mais finas e próximas estão as bobinas A.T. e B.T.: a dispersão é mínima se as bobinas terminais do enrolamento B.T. têm a metade das espiras possuídas pelas bobinas intermediárias.

## 5. ATERRAMENTO ELÉCTRICO

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), aterrar é colocar instalações e equipamentos no mesmo potencial da terra. Assim, em casos de uma fuga de corrente elétrica, a eletricidade tende a ir para o menor potencial; a terra, que tem o potencial próximo de zero. Desse modo, as pessoas próximas aos equipamentos energizados não recebem o choque elétrico.

No entanto, Aterramento é a arte de se fazer uma conexão com toda a terra. A conexão terra é na realidade a interface entre o sistema de aterramento e toda a terra, e é por esta interface que é feito o contato elétrico entre ambos ("terra" e sistema de aterramento).

FILHO (2011) defini que as instalações elétricas estão sujeitas a defeitos como falhas de isolamento de condutores ou partes energizadas que em contato com superfícies condutoras, poderão colocá-los sob um potencial elétrico diferente da terra. FILHO (2002) apresenta várias maneiras para aterrar um sistema elétrico, que vão desde uma simples haste, passando por placas de formas e tamanhos diversos, chegando às mais complicadas configurações de cabos enterrados no solo.

O aterramento elétrico, com certeza, é um assunto que gera um número enorme de dúvidas quanto às normas e procedimentos no que se refere ao ambiente elétrico industrial. Muitas vezes, o desconhecimento das técnicas para realizar um aterramento eficiente, ocasiona a queima de equipamentos, ou pior, o choque elétrico nos operadores desses equipamentos.

Para que um Sistema de Energia Elétrica opere corretamente, com uma adequada continuidade de serviço, com um desempenho seguro do sistema de proteção e, mais ainda, para garantir os limites (dos níveis) de segurança pessoal, é fundamental que o quesito Aterramento mereça um cuidado especial. Esse cuidado deve ser traduzido na elaboração de projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam consideradas todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido.

Os objetivos principais do aterramento são:

- Obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível, para correntes de falta a terra;
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes da falta dentro de limites de segurança de modo a não causar fibrilação;

- Fazer que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- Proporcionar um caminho de escoamento para terra de descargas atmosféricas;
- Usar a terra como retorno de corrente no sistema Monofilar por Retorno por Terra (MRT).
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Um dado importante, na elaboração do projeto de aterramento é o do conhecimento das características do solo, principalmente sua resistividade elétrica. Esta, além da importância para a engenharia elétrica, em termos de proteção e segurança, auxilia também em outras áreas como: Geologia, na localização de jazidas de minerais, lençol de água, petróleo, gás, etc.

O aterramento elétrico tem três funções principais:

- Proteger o usuário do equipamento das descargas atmosféricas, através da viabilização de um caminho alternativo para a terra, de descargas atmosféricas.
- “Descarregar” cargas estáticas acumuladas nas carcaças das máquinas ou equipamentos para a terra.
- Facilitar o funcionamento dos dispositivos de proteção (fusíveis, disjuntores, etc.), através da corrente desviada para a terra.

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Este se constitui basicamente de três componentes:

- As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos elétrodos;
- Elétrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado ao solo);
- Terra que envolve os elétrodos.

Existem várias maneiras para aterrar um sistema elétrico, que vão desde uma simples haste, passando por placas de formas e tamanhos diversos, chegando às mais complicadas configurações de cabos enterrados no solo. O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo, dependendo da aplicação, este pode constituir-se em uma trilha numa placa de circuito impresso, na carcaça de um motor ou de um computador, ou ainda, no neutro de um sistema elétrico. Também os elétrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada. Basicamente, o eletrodo se constitui em qualquer corpo em qualquer corpo metálico enterrado no solo. Podem ser enumeradas algumas

configurações usuais, como cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas em reticulado. A forma, assim como a disposição geométrica dos elétrodos no solo são as mais variadas, de acordo com a aplicação.

Destacam-se:

- **As hastes verticais:** usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade, e que são muito práticas, por serem de fácil cravação;
- **Os elétrodos horizontais:** enterrados usualmente a profundidade da ordem de 0,5 metros, são usados principalmente quando a maior preocupação é o controle do gradiente de potencial na superfície do solo.

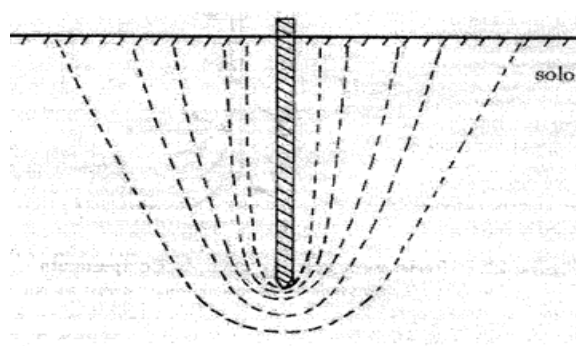


Fig. 13.: Constituição de um aterramento.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que, em geral, uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para terra. A perspectiva na qual o sistema enxerga o aterramento pode ser expressa através de sua impedância. A **impedância de aterramento** pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos elétrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

Esta impedância pode ser apresentada através de uma representação simplificada de aterramento por meio de um circuito equivalente, conforme a figura a seguir e explica sucintamente a origem da sua configuração.

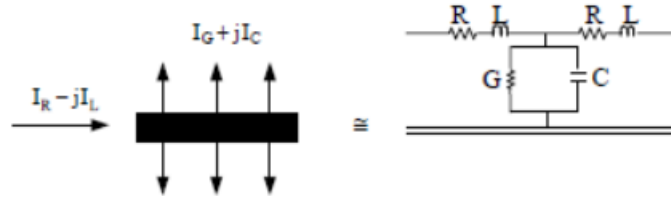


Fig. 14.: Componentes de corrente no solo.

Fonte: (MARTIGNONI, 1991)

Se uma porção limitada do elétrodo é considerada, pode-se notar que a corrente dissipada para o solo é composta pelas quatro componentes representadas na figura. A corrente que é injetada no elétrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do elétrodo. Nesta última parcela, a corrente longitudinal, é observada as perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos da corrente (interior e exterior do condutor). Em termos de circuito equivalente, a soma das energias correspondentes pode ser feita por meio de uma resistência e uma indutância em série.

Por outro lado, o campo elétrico no solo (um meio de resistividade  $\rho$  e permissividade  $\epsilon$ ), determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre estas correntes não depende da geometria dos elétrodos, mas da relação  $\sigma/\omega\epsilon$ , onde  $\sigma$  refere-se à condutividade do solo e  $\omega$  à frequência angular. A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais pode ser computada por meio de uma capacitância e uma condutância, colocadas em paralelo no circuito equivalente, (fig. 14).

Em muitas aplicações, não se refere à impedância de aterramento, mas à sua resistência. Isto se deve ao fato de que, nas condições dessas aplicações, os efeitos reativos são muito reduzidos. O valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela relação entre a tensão aplicada a um aterramento e a corrente resultante (neste caso, entende-se por tensão o potencial adquirido pelo aterramento referido ao infinito):

$$R_T = \frac{V}{I}$$

Para se estabelecer uma idéia da ordem de grandeza deste valor, deve-se considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui uma alta resistividade. Contudo, a seção reta do caminho percorrido por uma corrente no solo pode ser bastante ampla, de forma

que, a despeito da alta resistividade do solo, sua resistência pode ser pequena. A presença do aterramento se manifesta, na perspectiva do sistema, quando flui corrente pelos seus elétrodos. Na ausência da mesma, tem-se um potencial nulo nos elétrodos (mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado). A resistência de aterramento pode afetar o sistema de duas formas:

- **Através de uma influência ativa:** o seu valor pode ser determinante na limitação do valor da corrente que flui para o solo;
- **Numa perspectiva passiva:** deve-se considerar que o fluxo de corrente pelo aterramento resulta numa elevação de potencial no solo, transmitida ao ponto de aterramento do sistema, e que o valor dessa elevação de potencial  $V_T$  é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento.

$$V_T = R_T I$$

### 5.1. Aterramento de Sistema e Sistema de Aterramento

Cabe estabelecer a distinção entre Sistema de aterramento e Aterramento de sistemas. O primeiro termo relaciona-se ao sistema físico requerido. O segundo corresponde à forma como o sistema elétrico é conectado ao solo. Neste caso, existem basicamente três tipos de aterramento:

- **Sistema isolado:** não existe conexão condutiva proposital entre o sistema elétrico e o solo. O acoplamento entre ambos é fraco e se faz prioritariamente de forma capacitiva. O nível das máximas sobretensões possíveis neste tipo de sistema é elevado e existem dificuldades na localização de eventuais faltas para terra.
- **Sistema solidamente aterrado:** alguns pontos do sistema elétrico são conectados diretamente à terra, procurando-se um caminho de mínima impedância à passagem de eventual corrente de falta para o solo. Os valores elevados da corrente, resultante nesta eventualidade, sensibilizam os dispositivos de proteção, que prontamente comandam o desligamento da parte faltosa do sistema.
- **Sistema aterrado por impedância:** neste caso é interposta propositalmente uma impedância (resistência ou reatância) entre o sistema elétrico e seu aterramento físico, que procura limitar o valor da corrente de eventual falta, sem, contudo, eliminar a ligação condutiva do sistema ao solo. Tal forma de aterramento tenta implementar uma condição intermediária entre as duas alternativas citadas anteriormente, reunindo as vantagens de cada uma delas.

## 6. INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Há alguns anos, para se ter um controle preciso de verdade eram utilizados motores de corrente contínua. Entretanto, isso acarretava diversos problemas como custo do motor e necessidade de retificação da tensão de fornecimento para alimentar o motor. Com o advento da electrónica de potência aliada à necessidade de aumento de produção e diminuição de custos, dentro deste cenário surgiu a automação, ainda em fase inicial no Brasil (FRANCHI, 2008).

Uma grande infinidade de equipamentos foi desenvolvida para as mais diversas variedades de aplicações e sectores industriais. Um dos equipamentos mais utilizados nesses processos juntamente com o CLP é o inversor de frequência, mostrado na figura 6.18. Um equipamento versátil e dinâmico que permitiu o uso de motores de indução para controle de velocidade em substituição aos motores de corrente contínua. Vejamos a seguir o princípio básico do inversor de frequência.

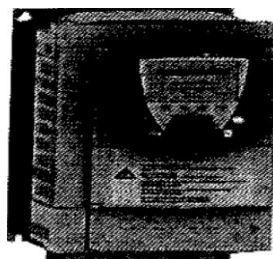


Figura 15.: Inversor de frequência, Altivar 71.

Fonte: (Cortesia: Schneider Electric)

O método mais eficiente de controle de velocidade de motores de indução trifásicos, com menores perdas no dispositivo responsável pela variação da velocidade, consiste na variação da frequência  $f_1$  da fonte alimentadora através de conversores de frequência, em que o motor pode ser controlado de modo a prover um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica.

Os motores de indução são equivalentes a um transformador em que o primário é o estator e o secundário é o rotor. Pelo equacionamento da máquina assíncrona, o conjugado desenvolvido pelo motor assíncrono é dado pela seguinte equação:

$$C = \varphi_m \cdot I_2$$

E a tensão aplicada na bobina de um estator é dada por:

$$E_1 = 4,44 \cdot F_1 \cdot N_1 \cdot \varphi_m$$

Sendo:

C: Conjugado do motor (N.m);

$\Phi_m$ : fluxo de magnetização;

$I_2$ : corrente no rotor (A)

$E_1$ : tensão no estator (V)

$F_1$ : Frequência da rede (Hz)

$N_1$ : número de espiras

O fluxo alternado  $\Phi_1$ , resultante da tensão no estator  $U_1$ , induz no estator uma f.e.m no rotor, a qual produz um fluxo  $\Phi_2$  proporcional à tensão  $U_2$  e inversamente proporcional à frequência. Portanto, temos:

$$\Phi_2 = U_2 / f$$

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, deve-se fazer variar a tensão  $U_1$  proporcionalmente com a variação da frequência  $f_1$ , mantendo, desta forma, o fluxo constante.

O avanço da electrónica de potência permitiu o desenvolvimento de conversores de frequência com dispositivos de estado sólido, inicialmente com tirístores e actualmente com transistores, mais especificamente o IGBT, transistor bipolar de porta isolada. Os cicloconversores antecederam, de certa forma, os actuais inversores. Eles eram utilizados para converter 60Hz da rede em uma frequência mais baixa, era uma conversão CA-CA. Já os inversores utilizam a conversão CA-CC e, por fim, em CA novamente.

Os inversores podem ser classificados pela sua topologia, que é dividida em três partes, sendo a primeira para o tipo de retificação de entrada, a segunda para o tipo de controle do circuito intermediário e a terceira para a saída.

Rectificador: na rede de entrada, a frequência é fixa em 60Hz, sendo transformada pelo Rectificador em contínua (Rectificador de onda completa). O filtro transforma essa tensão em contínua com valor de aproximadamente:

$$V_{cc} = 1.41 \times V_{rede}$$

Controle de chaveamento: a figura 6.19 mostra um diagrama esquemático do circuito de um inversor de frequência:

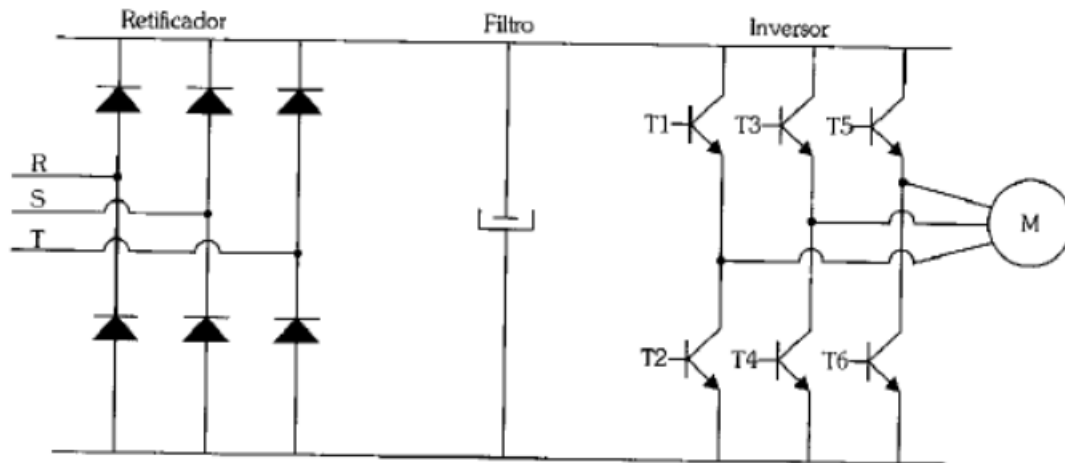


Figura 16.: Circuito de um conversor de frequência.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

A tensão contínua é conectada aos terminais de saída pelos tirístores **T1** a **T6**, que funcionam no corte ou na saturação como uma chave estática.

O controle desses circuitos é feito pelo circuito de comando, de maneira a obter um sistema de tensão alternada em que as frequências estão defasadas em  $120^\circ$ .

Devem ser escolhidas a tensão e a frequência que permitem que a tensão  $U_2$  seja proporcional à frequência  $f$  para que o fluxo  $\Phi_2$  e o torque sejam constantes.

O circuito de comando dos transistores de potência é o elemento responsável pela geração dos pulsos de controle dos transistores de potência a partir do uso de microcontroladores digitais. Tal técnica tornou-se possível e extremamente confiável. Atuando sobre a taxa de variação do chaveamento das bases dos transistores, controla-se a frequência do sinal trifásico gerado. Como o modulador recebe um sinal de corrente contínua ou é alimentado em corrente contínua, a frequência e a tensão de saída do modulador para o motor independem da rede de alimentação do conversor, facto que permite que o conversor possa ultrapassar a frequência nominal da rede.

A figura 6.20 mostra as tensões de saída em forma senoidal, para uma frequência com período **T**. A tensão de saída varia de acordo com o método de modulação denominado PWM (Pulse Width Modulation) que fornece uma corrente senoidal ao motor para uma frequência de modulação na faixa de **2kHz**.

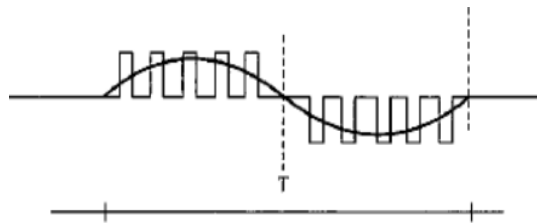


Figura 17.: Modulação PWM.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

Independentemente da topologia utilizada, o princípio de funcionamento se baseia em uma tensão CC no circuito intermediário e devemos transformar em tensão CA para accionar o motor o motor AC. Foi mostrado anteriormente um circuito em blocos de um inversor com a topologia PWM, que é a mais utilizada nos inversores de frequência actuais. Como a tensão é fixa no diagrama, devemos, então, chavear os transistores de saída pela modulação de largura de pulso para obtermos uma forma de tensão CA sintetizada e de frequência variável.

Com isso, estamos aptos a variar a velocidade do motor. A variabilidade da frequência é muito grande, e pode ser de forma escalar ou vectorial. Como a escalar é mais comum, vamos comentá-la. A escalar, como o próprio nome sugere, é uma relação directa entre frequência e tensão.

Observe no gráfico seguinte uma forma mais sucinta dessa descrição.

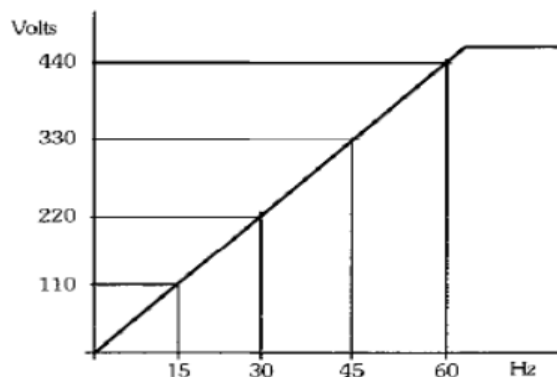


Figura 18.: Gráfico de tensão x frequência ( $V \times f$ ).

Fonte: (FRANCHI, 2008)

### 6.1. Gráfico escalar do inversor de frequência

Com a elevação da frequência do sinal imposto à armadura do motor e manutenção do valor da tensão, a corrente de magnetização da máquina cai proporcionalmente e, com ela, o fluxo magnético estabelecido no entreferro. Consequentemente, caindo o fluxo magnético, cai o

conjugado disponibilizado por ela. É a *operação com enfraquecimento de campo*. O conjugado eletromagnético da máquina enfraquece e, com isso, determinamos uma área acima da frequência nominal que achamos de região de enfraquecimento de campo, em que o fluxo começa a decrescer, portanto o torque começa a diminuir.

A curva *Conjugado x velocidade do motor* accionado com conversor de frequência pode ser colocada da seguinte maneira:

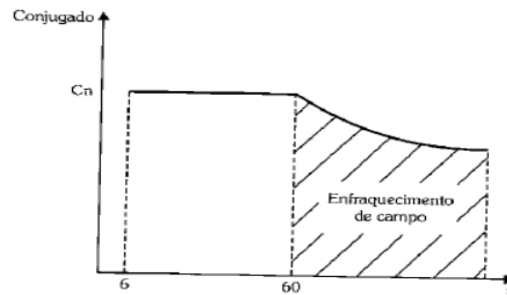


Figura 19.: Enfraquecimento do campo.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

Podemos notar que o conjugado permanece constante até a frequência nominal. Acima desse ponto o conjugado começa a decrescer.

É preciso tomar cuidado especial na aplicação de inversores para accionamento de motores em baixa rotação, pois os motores do tipo fechado com ventilação externa são autoventilados. Em baixas rotações, tipicamente abaixo de 50% da rotação nominal, o fluxo de ar pela carcaça é deficiente. A retirada de calor é prejudicada e a potência fornecida pelo motor deve ser reduzida para não ocorrer a queima dos materiais isolantes de seu enrolamento da armadura.

Os fabricantes propõem uma curva operacional como a mostra a seguir, para evitar danos à máquina, em que um factor é aplicado ao conjugado nominal para determinar a sua capacidade de trabalho.

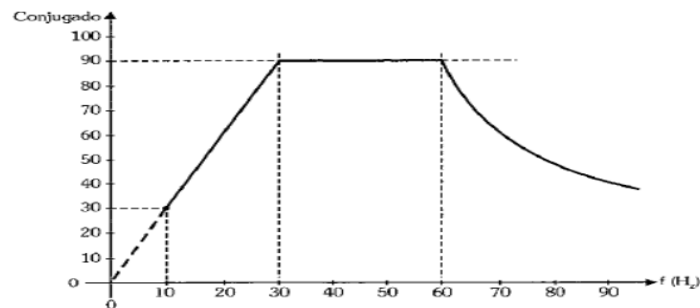


Figura 20.: Curva operacional para motor de indução.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

Uma solução seria especificar o motor com um factor de serviço maior, ou então aumentar a classe de isolamento para que as bobinas resistam à maior temperatura, ou ainda especificar um motor com uma carcaça maior para que se tenha maior área para a troca térmica.

Nos motores de indução trifásico com ventilação independente, a troca independe da velocidade impressa pela alimentação do eixo. Assim, o conjugado solicitado a ela pode ser otimizado. Dentro de um intervalo que vai dos 10Hz até a frequência nominal, é possível ter um conjugado de 90% do conjugado nominal, conforme o gráfico seguinte:

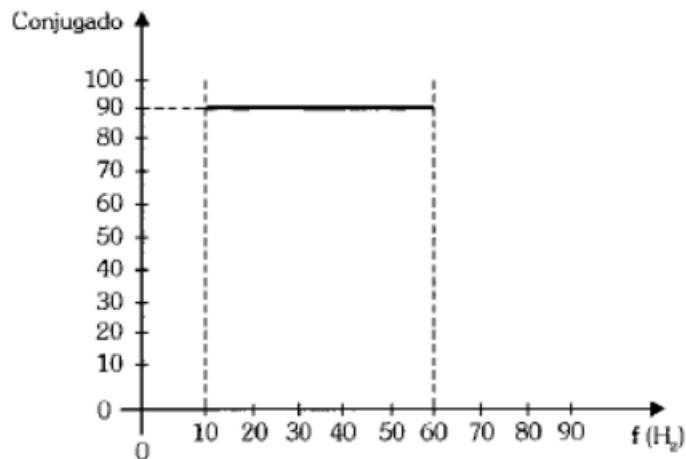


Figura 21.: Gráfico de Conjugado para máquinas com ventilação independente.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

Os inversores devem garantir que a variação da tensão aplicada seja proporcional à frequência, o que é feito pelo ajuste automático dos disparos dos transistores por sistemas microprocessados. Para motores de aplicação normal, não é necessário um ajuste muito preciso da velocidade ou do controle do conjugado. Para esses casos, é bastante razoável uma precisão de velocidade de 0,5% da rotação nominal, sem variação da carga e de 3 a 5 % com variação de carga de até 100% do conjugado nominal. Usualmente, a faixa de variação da frequência é pequena, algo entre 6 e 100Hz.

## 7. CLASSIFICAÇÃO DOS CONVERSORES DE FREQUÊNCIA

A estrutura electrónica de potência dos conversores que trabalham com modulação por largura de pulso é praticamente a mesma. O que os diferencia são as variações que ocorrem no seu circuito de comando. De acordo com as estruturas de comando, temos dois tipos de conversores distintos:

### **7.1. Conversores com controle escalar**

Esta família de conversores é composta de sistemas cuja exigência se restringe ao controle da velocidade do motor, sem controle do torque desenvolvido e sem conhecimento da dinâmica do processo sob controle. São sistemas que imprimem um certo erro de velocidade que, dada a aplicação, pode ser facilmente assimilado pelo sistema controlado. Os motores acionados por essa família de conversores têm ou devem atender a exigências normais e o controle é feito em malha aberta (sem realimentação), isto é, não existe, normalmente, um tacogerador instalado no eixo do motor para realimentar a estrutura controladora do conversor. A faixa de frequências operadas, normalmente, vai dos 10Hz aos 60Hz.

### **7.2. Conversores com controle vectorial**

O avanço das técnicas de controle permitiu que as novas estruturas de comando geradas pudessem atender às sofisticadas solicitações do controle de velocidade com respostas rápidas e de alta precisão.

As máquinas de corrente contínua com sistemas de controle em malha fechada já atendiam a essas solicitações e, no acionamento em potência, tinham total domínio. Com o avanço teórico das técnicas vetoriais de controle, em que a avaliação das variáveis internas do motor, num processo dinâmico, é efectuada e passada ao sistema controlador, a regulação da máquina de indução trifásica tornou-se mais precisa e mais próxima do controle alcançado com a máquina de corrente contínua.

A corrente de armadura do motor, menos as perdas no ferro, pode ser analisada como formada por duas parcelas distintas: aquela que é responsável pela magnetização da máquina e, conseqüentemente, pelo fluxo magnético que atravessa o entreferro, e aquela outra parcela do ramo de força do circuito. Portanto, tendo conhecimento dessas grandezas, tem-se conhecimento dos fluxos de energia que a máquina necessita, por meio da análise da corrente da armadura. O sinal vindo do eixo do motor, colectado por um tacogerador de pulsos, fornece uma malha fechada de controle, o que possibilita:

- Alto desempenho dinâmico;
- Operação suave no intervalo de velocidades especificadas para o conversor;
- Pequenas oscilações no conjugado motor, quando ocorrem variações na carga;
- Grande precisão de velocidade.

Para o estudo em questão, foi verificado que o variador de velocidade (VSD) instalados na oficina do porto são os **VSD Robicon Perfect Harmony** ou também denominados Robicon de harmónica perfeita, pois este protege a carga contra flutuações de energia eléctrica, proveniente da rede da EDM. Salientar que para o estudo em questão o fornecimento de energia é feito de forma híbrida, isto é, por meio dos Geradores instalados na planta e por meio da energia fornecida pela empresa Electricidade de Moçambique.

## CAPÍTULO IV: APRESENTAÇÃO ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

### DESENHO DA PROPOSTA DE PROTECÇÕES CONTRA QUEIMA DO TRANSFORMADOR

#### SELECÇÃO DO TRANSFORMADOR

##### Levantamento das Potências Aparentes

Dados da chapa característica do motor

$$P_{Mec} = 560kW \quad I_N = 123A \quad V = 3300V \quad \cos \varphi = 0.83$$

$$n\% = \frac{P_{Mec}}{P_{Elect}}$$

$$n\% = \frac{P_{Mec}}{\sqrt{3} * V * I * \cos \varphi} = \frac{560}{\sqrt{3} * 3300 * 123 * 0.83} = 96$$

$$S_M = \frac{P_{Mec}}{\cos \varphi} = 674.7kVA$$

$$S_M = \sum S(kVA)$$

$$S_M = 674.7kVA$$

##### Determinação do factor de demanda

$$FD = \frac{D_{MAX}}{S_N}$$

O transformador só alimenta o motor, portanto a  $D_{MAX} = 674.7kVA$  e usar-se-á a potência do transformador comercial mais próximo da demanda máxima que é  $S_N = 750KVA$ , logo teremos:

$$FD = \frac{674.7}{750} = 0.9$$

### Factor de crescimento da demanda

O FCD deve ser previsto por um factor anual de crescimento ( $FAC_{\%}$ ), dentro de um período estipulado de anos (PEA).

Para o presente trabalho, assume-se:  $FAC\%=5\%$  e  $PEA=5$  anos.

Assim, pode-se escrever a relação abaixo:

$$FCD = \left(1 + \frac{FAC_{\%}}{100}\right)^{PEA}$$

$$\text{Logo teremos: } FCD = \left(1 + \frac{5}{100}\right)^5 = 1.28$$

### Determinação da demanda provável e da Instalação

$$DP = FD * S_M$$

$$DP = 0.9 * 674.7 = 607.23kVA$$

$$D_{INST} = FCD * FD * S_M$$

$$D_{INST} = 1.28 * 0.9 * 674.7 = 777.25kVA$$

Desta relação  $S_{N,CALCULADA} \leq S_{N,COMERCIAL}$ , escolhe-se o transformador comercial de 800kVA.

## DIMENSIOAMENTO DE PROTECÇÕES

### ELOS FUSÍVEIS

$$I_{N,PRI} = \frac{S_N}{V_{L,PRI} * \sqrt{3}}$$

$$I_{N,PRI} = \frac{800 * 10^3}{3.6 * 10^3 * \sqrt{3}} = 128.3A$$

A partir deste valor a tabela da **CELLTA** determina o elo fusível com a potência de 800kVA e tensão primaria de 3.6kV e se encontra o elo fusível de **152H-H**.

$$I_{ELO} > FCD * (I_{CARGA} * 1.5)$$

$$I_{ELO} > 1.28 * (128.3 * 1.5)$$

$$I_{ELO} > 246.34$$

Com chave fusível de **300A**.

### **RAMAL DE LIGAÇÃO AÉREO**

Com isto, os cabos de fase e neutro serão de Cobre, ao invés do alumínio devido as suas características eléctricas e mecânicas.

Considerando a demanda de  $800kVA$ , a tabela 2 da Celesc N-321.002 temos o valor até 1700 kVA. Para o condutor de fase  $25mm^2$  e o valor de  $25mm^2$  para o condutor de neutro.

### **PÁRA RAIOS**

Sabendo do valor da tensão primária de 3.6kV, a norma E321.0002 determina o uso de resistores não lineares a óxido metálico ( $Z_n O$ ) e corrente nominal de descarga de 10kA.

Com o valor da tensão primária selecciona-se o resistor não linear com o código 3.05.20.031-3 na Tabela 4 da Celesc N-321.002.

### **DISJUNTOR DE PROTECÇÃO DO TRANSFORMADOR NO SECUNDÁRIO**

$$I_{N,SEC} = \frac{S_N}{V_{L,SEC} * \sqrt{3}}$$
$$I_{N,SEC} = \frac{800 * 10^3}{1.1 * 10^3 * \sqrt{3}} = 419.89A$$

### **Verificação de poder de corte**

Calcular o curto-circuito nos terminais do transformador é semelhante ao cálculo do curto-circuito nos terminais de protecção, tendo em consideração pontes entre o transformador e o quadro geral de comando e protecções curtas.

$$S_{CC} = \sqrt{3} * V * I_{CC}$$

$$I_{CC} = \frac{S_{CC}}{\sqrt{3} * V}$$

Sabendo que,

$$I_{CC} = \frac{10 * S}{Z_{\%}}$$

$$I_{CC} = \frac{100 * S}{Z_{\%} * \sqrt{3} * V} = \frac{100 * 800}{6.7 * \sqrt{3} * 1.1} = 6.27kA$$

### **DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES DO TRANSFORMADOR**

O dimensionamento dos condutores eléctricos do transformador do lado do secundário (B.T) é efectuado tendo como base  $I_{N,SEC}$  (a corrente eléctrica do secundário), e obedecendo procedimento padrão como o comprimento mínimo recomendado de 50m, o factor de potência sem correcção de 0.8, a temperatura para projectos de 60 °C e factor de correcção de 0,93. Com estes dados as seguintes relações são verificadas:

$$I_{N,SEC} = \frac{S_N}{V_{L,SEC} * \sqrt{3}}$$

$$I_{N,SEC} = \frac{800 * 10^3}{1.1 * 10^3 * \sqrt{3}} = 419.89A$$

$$I_{CABO} = \frac{I_{N,SEC}}{FC}$$

$$I_{CABO} = \frac{419.89}{0,93} = 451.5A$$

Na tabela 13 da **Construfios**, com a corrente de 451.5A para 3 condutores carregados no método de instalação **D**, a secção ideal é de **400 mm<sup>2</sup>** que suporta uma corrente de **464A**.

**400 mm<sup>2</sup> com isolamento XLPE por cada fase**

#### **Condutor Neutro**

Na tabela 23 da **Construfios**, segundo tabelado quando o valor do condutor de fase for de **400 mm<sup>2</sup>** o condutor neutro é de **185 mm<sup>2</sup>**.

**185 mm<sup>2</sup> com isolamento XLPE**

### Condutor de Terra

Na tabela 24 da **Construfios**, segundo tabelado quando o valor do condutor da fase for superior que  $50 \text{ mm}^2$  o valor do condutor terra será a sua metade, desde que seja o valor comercial mais próximo, assim sendo, para  $400 \text{ mm}^2$  o condutor neutro é de  $185 \text{ mm}^2$ .

### 185 mm<sup>2</sup> com isolação XLPE

### CRITÉRIO DE QUEDA DE TENSÃO

Para o cálculo de queda de tensão para circuito trifásicos, tem-se:

$$S_C = \frac{100 * \sqrt{3} * \rho * \sum(I_C * L_C)}{\Delta V_C * V_L}$$
$$\Delta V_C = \frac{\sqrt{3} * I_C * L_C * (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{10 * N_{CP} * V_L}$$

Assume-se que a distância entre o secundário do transformador e o quadro de distribuição geral é de 50m e uma queda de tensão de 1% nesse trecho.

$$\rho_{cobre} = \frac{1}{56}$$

$$S_C = \frac{100 * \sqrt{3} * \frac{1}{56} * 451.5 * 50}{1 * 1.1 * 10^3} = 12.7 \text{ mm}^2 < 400 \text{ mm}^2$$

Segundo a tabela 8 da **Construfios** para o cabo de  $400 \text{ mm}^2$  tem-se:  $R = 0.06 \text{ m}\Omega/\text{m}$  e  $X = 0.10 \text{ m}\Omega/\text{m}$

$$\text{O } FP = \cos \varphi = 0.80 \rightarrow \varphi = 36.87^\circ$$

$N_{CP}$  é o número de condutor por fase em paralelo, como os condutores não serão duplicados por fase o valor será unitário.

$$\Delta V_C = \frac{\sqrt{3} * I_C * L_C * (R \cos \varphi + X \sin \varphi)}{10 * N_{CP} * V_L}$$
$$\Delta V_C = \frac{\sqrt{3} * 451.5 * 50 * (0.06 * \cos 36.87^\circ + 0.10 * \sin 36.87^\circ)}{10 * 1 * 1100} = 0.11\% < 1\%$$

## CRITÉRIO DA CAPACIDADE DE CURTO-CIRCUITO

### No Transformador

Aplicando a fórmula que relaciona a queda de tensão percentual de curto-circuito com a impedância de curto-circuito do transformador.

$$Z_{CC} = \frac{Z_{\%} * V^2}{100 * S}$$

$$Z_{CC} = \frac{6.7 * 1100^2}{100 * 800}$$

$$Z_{CC} = 101.34m\Omega$$

$$R_{\%} = \frac{P_W}{10 * S_N}$$

$$R_{\%} = \frac{560}{10 * 800} = 0.07\%$$

$$R = R_{\%} * \frac{V_N^2}{100 * S_N}$$

$$R = 0.07 * \frac{1100^2}{100 * 800} = 1.059m\Omega$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$X = \sqrt{(101.34)^2 - (1.059)^2} = 101.33m\Omega$$

### No Cabo

Para o cabo de 400mm<sup>2</sup> já se sabe que:  $R = 0.06m\Omega/m$  e  $X = 0.10m\Omega/m$ . Conhecendo o valor do comprimento do cabo condutor do transformador ao Quadro geral, aplicam-se as seguintes relações:

$$R_C = R * L$$

$$R_C = 0.06 * 50 = 3m\Omega$$

$$X_C = X * L$$

$$X_C = 0.10 * 50 = 5m\Omega$$

$$Z_{EQ} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$R_{EQ} = \sum R = R_T + R_C = 1.059 + 3 = 4.059m\Omega$$

$$X_{EQ} = \sum X = X_T + X_C = 101.33 + 5 = 106.33m\Omega$$

$$Z_{EQ} = 4.059 + j106.33 = 106.4 \angle 88.1^\circ$$

O cabo deverá suportar a corrente de curto-circuito nos terminais do barramento do quadro geral de distribuição. Assim, como calculado a corrente de curto-circuito  $I_{CC} = 6.27kA$ .

$I_{CC}$  → Corrente de curto-circuito, em kA.

$T_e$  → Tempo de eliminação do defeito, em segundos.

$T_f$  → Temperatura máxima de curto circuito suportado pela isolamento do condutor, em °C.

$T_i$  → Temperatura máxima admissível pelo condutor em regime normal de operação, em °C.

Para cabos em **ERP/XLPE**  $T_f = 250$  °C e  $T_i = 90$  °C.

$$S_C = \frac{\sqrt{T_e * I_{CC}}}{0.34 * \sqrt{\log\left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i}\right)}}$$

$$S_C = \frac{\sqrt{0.5 * 6.27}}{0.34 * \sqrt{\log\left(\frac{234 + 250}{234 + 90}\right)}}$$

$$S_C = \frac{\sqrt{3.135}}{0.34 * \sqrt{\log(1.494)}} = 36.68mm^2 \rightarrow 50mm^2 < 400mm^2$$

Portanto, o cabo de 400mm<sup>2</sup> atende ao critério de curto circuito. Finalmente, verificasse que o cabo ideal é de 400mm<sup>2</sup>, visto que atende aos critérios de capacidade de condução de corrente, queda de tensão e curto-circuito.

### **Aterramento eléctrico do transformador**

Olhando para a natureza de instalação este transformador possui um aterramento comum juntamente com a estrutura da cabine que protege contra infiltração de água e poeira. Foi feita a medição da resistência de aterramento do transformador e notou-se que esta é menor ou igual a  $2\Omega$ , porém notamos que a resistência de aterramento esta nos padrões limites admissíveis e garante a protecção e escoamento de cargas eléctricas acumuladas na carcaça. De salientar que o tipo de aterramento é do tipo malha, instalada no site da oficina da empresa Corredor Logístico e Integrado de Nacala que garante a protecção não só do transformador do VSD de média tensão, mas também de outros equipamentos instalados no mesmo. Verifica-se o resultado da medição da resistência de aterramento na figura 22.



Figura 22.: Resultado da medição da resistência de aterramento feita no terreno.

Fonte: (Autor)

### **Modelo de Cabine de Protecção do Transformador**

Por meio de estudos feitos em campo verificou-se que uma das causas da queima do transformador de VSD de média tensão é a infiltração de água e poeira que atravessa as paredes da cabine em todas as direcções. Nota-se que o índice de protecção que esta sendo usado na cabine que serve como comodo do transformador não é aplicável para este equipamento, visto que facilita a entrada de água e posterior queima do transformador. Por meio da mesma verifica-se nas imagens da figura 23, a ilustração de vestígios de infiltração de água através da cabine para o transformador.



Figura 23.: Vestígios de infiltração de água para o transformador.

Fonte: (Autor)

Desta feita o autor propõe a mudança desta cabine que servirá como novo comodo de protecção do transformador adequando a segurança e operação do equipamento as condições encontradas no site da CLN com um grau de protecção assim também denominado como IP.

A carcaça, como involucrio, deve oferecer eficaz protecção ao motor no meio em que ele opera. A NBR 6146 estabelece diversos graus de protecção para os invólucros eléctricos. Em geral, o grau de protecção dos invólucros eléctricos é normalmente expresso em dois dígitos. O primeiro indica protecção contra corpos sólidos, o segundo dígito indica protecção contra água.

Dígito	Indicação do primeiro dígito
0	Não é protegido
1	Protegido contra objetos sólidos maiores que 50 mm
2	Protegido contra objetos sólidos maiores que 12 mm
3	Protegido contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm
4	Protegido contra objetos sólidos maiores que 1,0 mm
5	Protegido contra poeira prejudicial ao motor
6	Totalmente protegido contra poeira

Tabela 1.: Primeiro dígito do grau de protecção dos invólucros eléctricos.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

<b>Dígito</b>	<b>Indicação do segundo dígito</b>
0	Não protegido
1	Protegido contra quedas verticais de gotas de água
2	Protegido contra queda de gotas de água para uma inclinação máxima de 15°
3	Protegido contra água aspergida de um ângulo de 60° na vertical (chuva)
4	Protegido contra projeções de água de qualquer direção
5	Protegido contra jatos de água de qualquer direção
6	Protegido contra ondas do mar ou de água projetada em jatos potentes
7	Protegido contra imersão em água, sob condições definidas de tempo e pressão
8	Protegido contra submersão contínua em água, nas condições especificadas pelo fabricante

Tabela 2.: Segundo dígito do grau de protecção dos motores e invólucros eléctricos.

Fonte: (FRANCHI, 2008)

Para o projecto em questão, conforme visto e referido nas tabelas do índice de protecção (IP) acima o autor propõe que a cabine que servirá como cômodo do transformador tenha um grau de protecção ou **IP64**. Pois este índice de protecção vai garantir a protecção total contra entrada de poeira e protecção contra projeções de água de qualquer direcção. Abaixo na figura 24, as vistas da cabine que servirá como involucro para o VSD e transformador, proposta pelo autor com o índice de protecção **IP64**. A figura 24 mostra um típico alinhamento em estilo GEN II no qual cada VFD normalmente consiste de seis gabinetes. Esses gabinetes são: O gabinete de entrada de alimentação, O gabinete transformador/ventilador, O(s) gabinete(s) de células, O gabinete de potência de saída e O gabinete de controle.

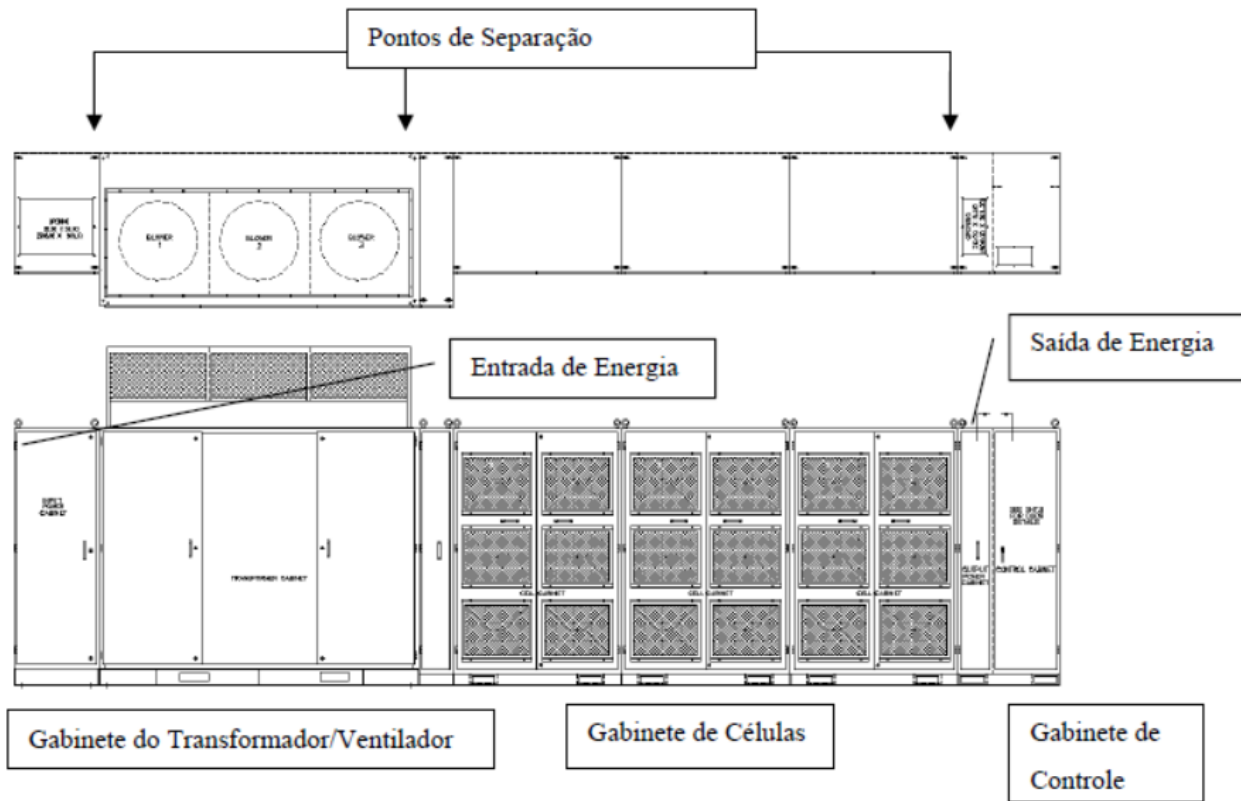


Figura 24.: Alinhamento Típico VFD GEN II do Perfect Harmony (Vistas Superior e Frontal).

Fonte: (Autor)

## CONCLUSÃO

O desenho da proposta de protecções contra queima do transformador do VSD de média tensão instalado na oficina da empresa Corredor Logístico e Integrado de Nacala vai contribuir para o melhoramento e aumento de tempo de vida útil do transformador. Tornou-se possível alcançar o objectivo de propor as novas protecções eléctricas com o modelamento eléctrico nos padrões do fabricante do equipamento e com algum conhecimento técnico adquirido por meio de experiência de trabalho e a partir de literaturas técnicas.

Usando as metodologias de investigação científica de análise e síntese de informação, que consistiu na busca de informações com os técnicos de manutenção e o departamento de confiabilidade, integrando a possibilidade de ter um modelo de novas protecções contra os curto-circuitos e queima precoce do transformador do VSD de média tensão (MT).

A proposta de protecções contra queima precoce do transformador do VSD de média tensão será uma grande valia para a empresa Corredor Logístico e Integrado de Nacala e para a sua equipe de manutenção e operação. Esta proposta técnica de protecções eléctricas irá garantir a sustentabilidade do activo(equipamento) e da empresa.

## **RECOMENDAÇÕES**

Recomenda-se para os trabalhos futuros que se investigue a possibilidade de ter um sistema de aterramento separado do aterramento da malha instalada no pátio de carvão de Nacala-à-Velha. Aplicativos que vão fazer as leituras à grandes distâncias e mostrar os gráficos de protecção e cortar o sistema de fornecimento de energia sempre que houver um surto de tensão, visto que este trabalho se limita em garantir a protecção eficiente do transformador, melhoramento do índice de protecção da cabine e redução do tempo para atuação das protecções em caso de surgimento de curto-circuito.

## **BIBLIOGRAFIA**

FILHO. V. S, Aterramentos Elétricos, Artliber Editora, 2002.

FILHO. D. L. L, Projetos de instalações elétricas prediais, | 21 agosto 2011.

FRANCHI, Claiton Moro, ACIONAMENTOS ELÉCTRICOS, 4ª Edição, São Paulo, Editora Érica Ltda., 2008.

MARTIGNONI, A. (1991). TRANSFORMADORES. São Paulo: Globo.

Prodanov, C. C., & de Freitas, E. C. (2013). METODOLOGIA DO TRABALHO CIENTÍFICO: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico (2ª edição ed.). Rio Grande do Sul, Brasil: Novo Hamburgo: Feevale.

THIOLLENT, M. (1998). Metodologia da pesquisa-ação (8ª edição ed.). São Paulo: Cortez.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Manual para correção do fator de potência**. Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2009.

LAKATOS, Eva Maria & MARCONI, Marina Andrade; *Metodologia de Investigação Científica*. 3ª Edição, São Paulo, Editora Atlas, 1999.

LAKATOS, E. & MARCONI, M. (1992). *Metodologia do Trabalho Científico*. 4a edição, Atlas. São Paulo.

A.A.M.B. Cotrim, “Instalações elétricas”, 4ª Ed., São Paulo: *Prentice Hall*, 2003.

H. Creder, “Instalações elétricas”, 15ª Ed., Rio de Janeiro: *LTC*, 2007.

J. Niskier, A.J. Macintyre, “Instalações elétricas”, 5ª Ed. Rio de Janeiro: *LTC*, 2008.

D.L. Lima Filho, “Projetos de instalações elétricas prediais”, 11ª Ed., São Paulo: *Erica*, 2007.

M.E.M. Negrisoli, “Instalações Elétricas”, 3ª Ed., São Paulo: *Edgard Blucher*, 1987.

D.P. Guerrini, “Iluminação: teoria e projeto”, 2ª Ed., São Paulo: *Erica*, 2008.

J. Mamede Filho, “Instalações elétricas industriais”, 5ª Ed., Rio de Janeiro: *LTC*, 2007.

G. Cavalin, S. Cervelin, “Instalações elétricas prediais”, 19ª Ed., São Paulo: *Erica*, 2009.

AES-Sul, CEEE, RGE, “Regulamento de instalações consumidoras em baixa tensão - RIC BT”, 2006.

AES-Sul, CEEE, RGE, “Regulamento de Instalações Consumidoras em Média Tensão - RIC MT”, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5410: Instalações elétricas em baixa tensão”, 2004.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5419: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas”, 2001.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas “NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV”, 2003.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas “NBR 13301: Redes telefônicas internas em prédios”, 1995.

Carlos Ferreira, *Máquinas Eléctricas I - Transformadores*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.

A. Tranter, *Manual de Electricidade das Motos*, Edições CETOP, Portugal, 1995.

Miguel de Castro, *Manual do Alternador, Bateria e Motor de Arranque*, Plátano Edições Técnicas, Portugal, 1991.






Toyota, *Módulo de Electromagnetismo*, Salvador Caetano - I.M.V.T. S.A., Portugal, 1995.

Carlos Ferreira, *Máquinas Eléctricas II - Alternadores*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.

Toyota, *Módulo de Electromagnetismo*, Salvador Caetano - I.M.V.T. S.A., Portugal, 1995.

## ANEXOS

**Tabela 8**

TABELA B – RESISTÊNCIAS ELÉTRICAS E REATÂNCIAS INDUTIVAS DE FIOS E CABOS ISOLADOS EM PVC, HEPR E XLPE AO AR LIVRE (VALORES EM $\Omega$ / KM)											
Seção (mm <sup>2</sup> )	Rcc (A)	Condutores isolados – Cabos Unipolares ao Ar Livre (B)									
		Circuitos FF / NN									
		S = de		S = 2 de		S = 10 cm		S = 20 cm		Trifólio	
											
Rca XL		Rca XL		Rca XL		Rca XL		Rca XL			
1.5	12.1	14.48	0.16	14.48	0.21	14.48	0.39	14.48	0.44	14.48	0.16
2.5	7.41	8.87	0.15	8.87	0.2	8.87	0.37	8.87	0.42	8.87	0.15
4	4.61	5.52	0.14	5.52	0.2	5.52	0.35	5.52	0.40	5.52	0.14
6	3.08	3.69	0.13	3.69	0.19	3.69	0.33	3.69	0.39	3.69	0.14
10	1.83	2.19	0.13	2.19	0.18	2.19	0.32	2.19	0.37	2.19	0.13
16	1.15	1.38	0.12	1.38	0.17	1.38	0.30	1.38	0.35	1.38	0.12
25	0.73	0.87	0.12	0.87	0.17	0.87	0.28	0.87	0.34	0.87	0.12
35	0.52	0.63	0.11	0.63	0.17	0.63	0.27	0.63	0.32	0.63	0.11
50	0.39	0.46	0.11	0.46	0.16	0.46	0.26	0.46	0.31	0.46	0.11
70	0.27	0.32	0.10	0.32	0.16	0.32	0.25	0.32	0.30	0.32	0.10
95	0.19	0.23	0.10	0.23	0.16	0.23	0.24	0.23	0.29	0.23	0.10
120	0.15	0.19	0.10	0.18	0.15	0.18	0.23	0.19	0.28	0.19	0.10
150	0.12	0.15	0.10	0.15	0.15	0.15	0.22	0.15	0.27	0.15	0.10
185	0.099	0.12	0.10	0.12	0.15	0.12	0.21	0.12	0.26	0.12	0.10
240	0.075	0.09	0.10	0.09	0.15	0.09	0.20	0.09	0.25	0.09	0.10
300	0.060	0.08	0.10	0.07	0.15	0.07	0.19	0.08	0.24	0.08	0.10
400	0.047	0.06	0.10	0.06	0.15	0.06	0.18	0.06	0.23	0.06	0.10
500	0.037	0.05	0.10	0.05	0.15	0.05	0.17	0.05	0.23	0.05	0.10
630	0.028	0.04	0.09	0.04	0.15	0.04	0.16	0.04	0.22	0.04	0.09
800	0.022	0.04	0.09	0.03	0.14	0.03	0.15	0.04	0.20	0.04	0.09
1000	0.018	0.03	0.09	0.03	0.14	0.03	0.14	0.03	0.19	0.03	0.09

**Tabela 23**

TABELA 23	
Seção Reduzida do Condutor Neutro	
Seção dos Condutores Fase (mm <sup>2</sup> )	Seção Reduzida do Condutor Neutro (mm <sup>2</sup> )
S ≤ 25	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
400	185

Tabela 24

TABELA 24	
Seção mínima do condutor de proteção	
Seção do condutor fase (mm <sup>2</sup> )	Seção do condutor proteção (mm <sup>2</sup> )
1,5	1,5 (mínima)
2,5	2,5
4	4
6	6
10	10
16	16
25	16
35	16
50	25
70	35
95	50
120	70
150	95
185	95
240	120
300	150

**Tabela 13**

Seção Nominal mm²	Métodos de Referência definidos na tabela 11											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Números de Condutores Carregados											
Cobre												
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	196	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	276	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1122	923	711	596
800	885	792	805	721	1158	1020	925	837	1311	1074	811	679
1000	1014	908	923	826	1332	1173	1088	957	1515	1237	916	767

**Tabela 2 da Celesc N-321.002**


DEMANDA TOTAL DA INSTALAÇÃO (kVA)	RAMAL DE LIGAÇÃO OU ENTRADA AÉREO			
	CABOS FASE (Nu)		CABO NEUTRO (Nu)	
	Alumínio (AWG)	Cobre (mm <sup>2</sup> )	Alumínio (AWG)	Cobre (mm <sup>2</sup> )
ATÉ 1700	2	25	2	25
1701 a 2300	2	35	2	25
2301 a 3500	1/0	35	2	25
3501 a 5000	4/0	50	2/0	35

**Tabela 4 da Celesc N-321.002**

**NLZ-P  
10KA**

**CARACTERÍSTICAS e DIMENSÕES**

**DIMENSIONS and CHARACTERISTICS**



Código	Tensão Nominal	Máxima Tensão de Operação Contínua	Tensão Residual		Distancia de Escoamento	Dimensões ( mm )		
Reference	Rated Voltage	Maximum Continuous Operating Voltage	Discharge Voltage			Dimensions ( mm )		
		MCOV	Fronte Ingreme Front-to-Wave 1 μ (max.)	Corrente de 10kA Current of 10kA 8 x 20μ (max.)		A	B	C
	( kV )	( kV AC )	( kV )	( kV )	( mm )			
NLZP-0310	3	2.55	10.60	9.90	430	286.0	203.0	
NLZP-0610	6	5.10	21.20	19.80				
NLZP-0910	9	7.65	32.40	29.90				
NLZP-1010	10	8.40	35.90	33.90				

## Tabela da Celta

**TABELA DE SELEÇÃO DOS FUSÍVEIS LIMITADORES DE CORRENTE Celta TIPO HH PARA TRANSFORMADORES**

Potência	Un 3,6kV		Un 7,2kV		Un 12 kV		Un 17,5kV				Un 25kV				Un 36kV		Un 52kV		Un 72,5kV	
trifásica	Us 3,3kV		Us 6,6kV		Us 11,9kV		Us 13,2kV		Us 13,8kV		Us 23kV		Us 25kV		Us 34,5kV		Us 44kV		Us 72,5kV	
kVA	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic	Ip	Ic
10	1,53	4	0,88	4	0,49	4	0,44	4	0,42	4										
15	2,29	6	1,32	4	0,73	4	0,66	4	0,63	4										
30	4,57	12,5	2,63	7,5	1,46	4	1,32	4	1,26	4	0,76	4	0,7	4						
45	6,85	20	3,95	10	2,19	5	1,97	5	1,89	5	1,13	4	1,04	4	0,76	4				
75	11,5	30	6,57	20	3,65	10	3,29	10	3,15	10	1,89	5	1,74	5	1,26	4	0,99	4		
112,5	17,2	40	9,86	25	5,47	15	4,93	12,5	4,72	12,5	2,83	7,5	2,6	7,5	1,89	5	1,48	5		
150	22,9	50	13,2	30	7,29	20	6,57	15	6,29	15	3,77	10	3,47	10	2,52	6	2,97	6	1,26	4
225	34,3	75	19,7	40	10,9	25	9,86	25	9,43	20	5,66	12,5	5,2	12,5	3,77	10	2,96	7,5	1,89	5
300	45,7	100	26,3	60	14,6	30	13,5	30	12,6	30	7,54	20	6,94	15	5,03	12,5	3,95	10	2,52	6
500	76,1	200	43,8	100	24,3	50	21,9	50	20,9	50	12,6	30	11,6	25	8,36	20	6,57	15	4,19	10
750	114	250	65,7	150	36,5	75	32,9	60	31,5	60	18,9	40	17,4	40	12,6	25	9,86	20	6,29	12,5
1000	152	300	87,6	200	48,6	100	43,8	100	43,8	90	41,9	90	25,2	50	16,8	40	13,2	25	8,38	20
1500			131	300	72,9	150	65,7	150	62,9	120	37,7	75	34,7	75	25,2	50	19,7	40	12,6	25
2000					97,2	200	87,6	180	83,5	150	50,3	100	46,3	100	33,5	80	26,3	50	16,8	40
2500								105	180	62,9	120	57,8	120	41,9	100	32,9	60	21	50	

**Un - Tensão nominal do limitador de fusível**  
**Us - Tensão de serviço na instalação**  
**Ip - Corrente nominal do transformador**  
**Ic - Corrente nominal do fusível limitador tipo HH**

**Cabine Instalada no site da empresa CLN**



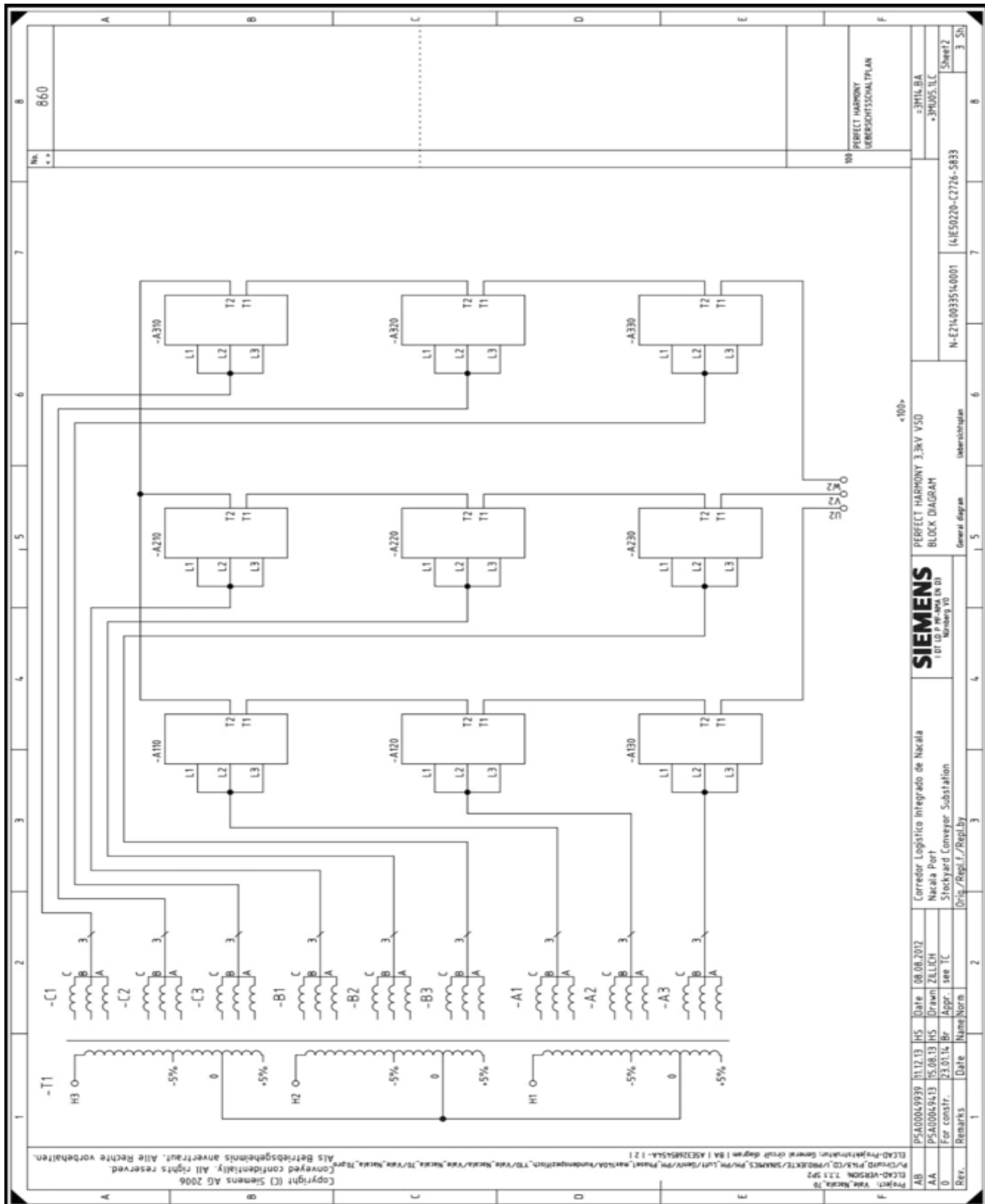


DIAGRAMA UNIFILAR DO CIRCUITO DE POTÊNCIA DO VSD PERFECT HARMONY

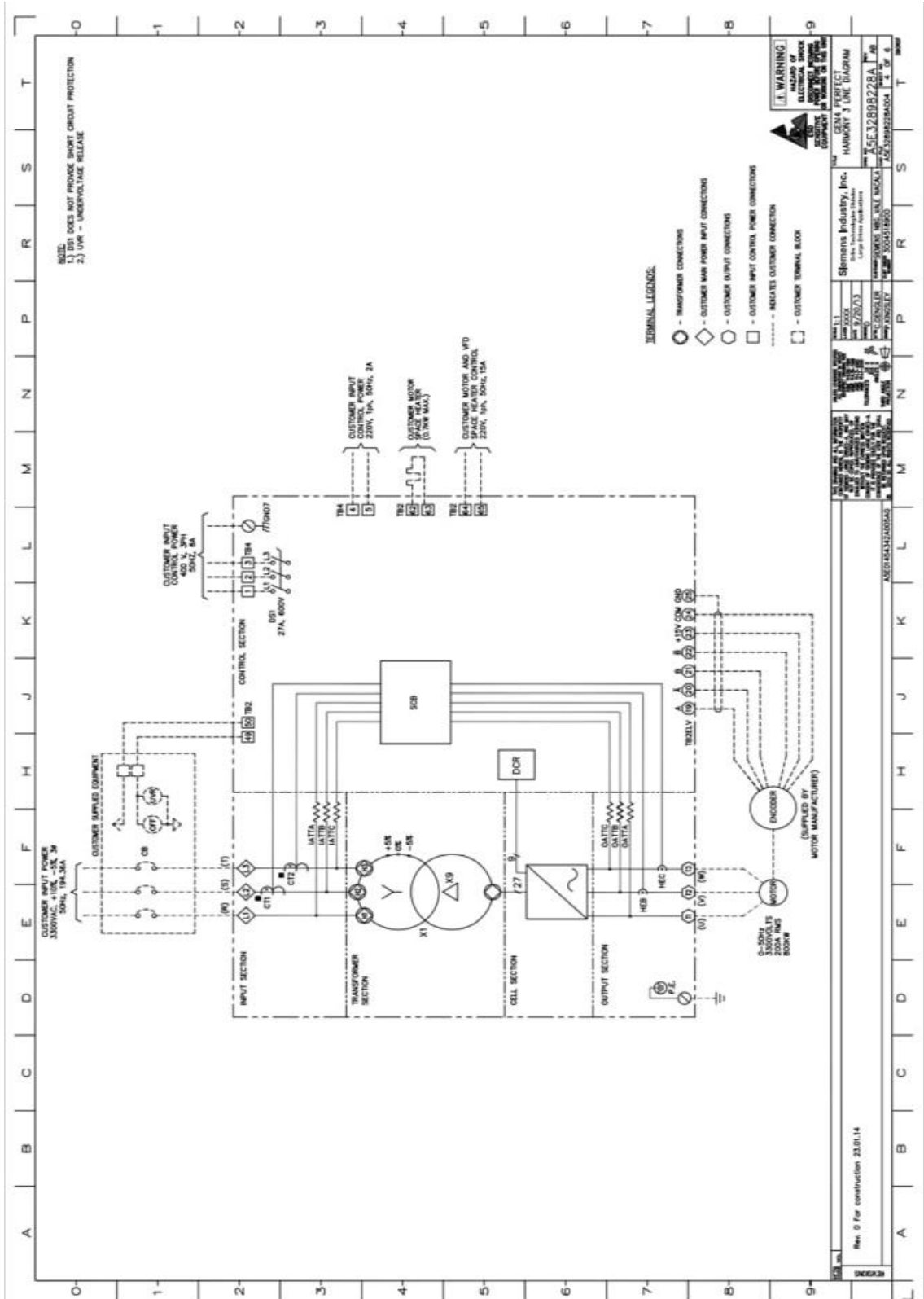


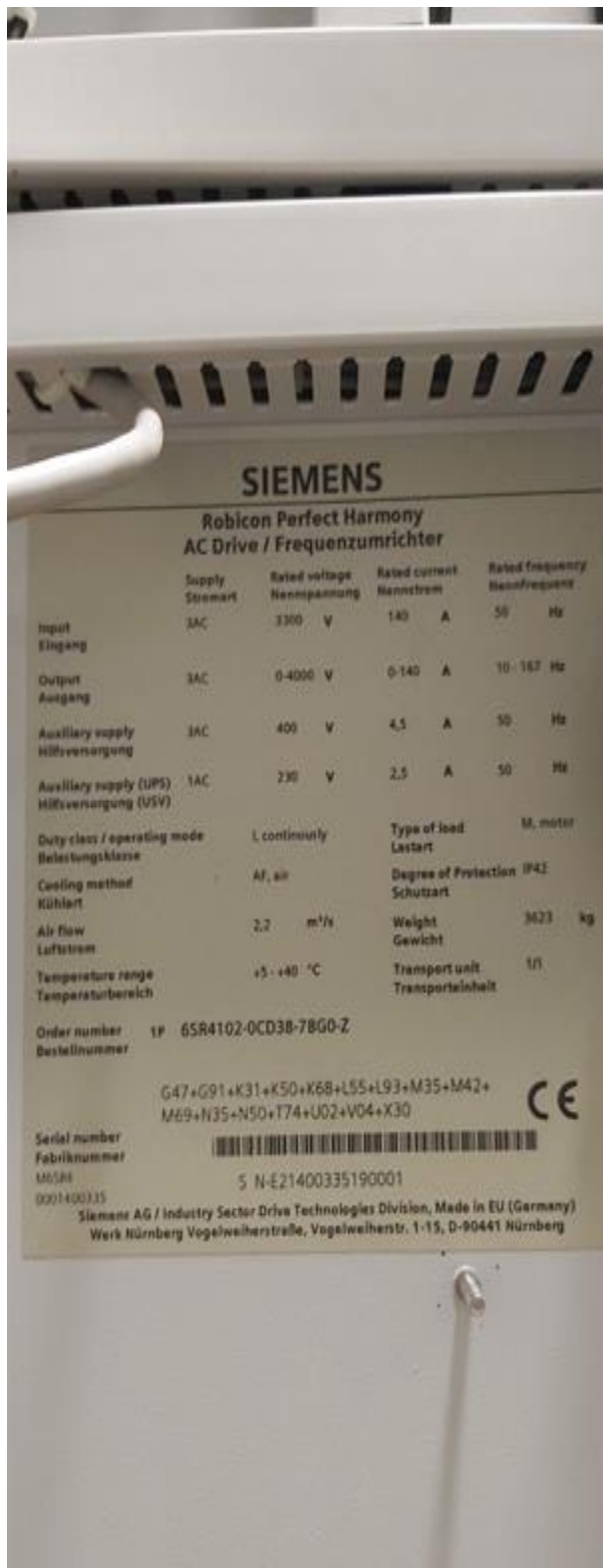
DIAGRAMA UNIFILAR FONTE VSD E MOTOR



ESQUEMA DE LIGAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DOS ENROLAMENTOS DO TRANSFORMADOR DO VSD PH

<b>ASA</b>						
<b>TRAFODAU GMBH</b>						
<b>3 - phase - PERFECT HARMONY- transformer</b>						
Type DHXSP				No. . 132.022	Kind PT	IEC 60076-11
System		1 - YN	2 - d	3 -	Year of manuf.	2013
Rated power		800 kVA	9 * 88,9 VA	kVA	Rated frequency	50 Hz
Rated voltage	1	3465 V	V	V	Connect. symbol	*)
	2	3300 V	9 * 771,2 V	V	Cooling method	AF
	3	3135 V	V	V	Thermal class	200 / 200
	4	V	V	V	Max. temp. insul.	200 / 200 °C
	5	V	V	V	Max. temp. rise	95 / 95 K
Rated current		140,0 A	9x66,7 A	A	Environmental class	E0
Imped. voltage		6,7 %	%	%	Fire behaviour class	F0
Um		3,6 kV	1,1 kV	kV	Climatic class	C1
Insulation level		LI 30 AC 12	AC 20		Operation	CMR
Transformer for in-door location				Total-weight		1810 kg
Nominal cooling air flow volume 1,2m³/s				Degree of protection		IP 00
*YN;d5(+20°);d5(0°);d1(-20°)						
<b>A5E32671275</b>						
ASA-Trafobau GmbH. Landstr. 2A D-34454 Bad Arolsen			Tel. +49 (0)5691 8902 0 Fax. +49 (0)5691 8902 22 E-mail info@asa-trafo-bau.de			

PLACA DE CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DO VSD ROBICON – PH



PLACA DE CARACTERÍSTICAS DO VSD ROBICON - PH