

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 623

**EFEITOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO  
NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO INDUSTRIAL**

**Elaine Cristina do Carmo Pimenta**

DATA DA DEFESA: 16/07/2010

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**EFEITOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO  
NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO INDUSTRIAL**

Elaine Cristina do Carmo Pimenta

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte - MG

Julho de 2010

**"Efeitos de Afundamentos de Tensão  
no Processo de Laminação Industrial"**

**Elaine Cristina do Carmo Pimenta**

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de *Mestre em Engenharia Elétrica*.

Aprovada em 16 de Julho de 2010.

Por:

---

Wallace do Couto Boaventura - Dr.  
Prof. DEE/UFMG - Orientador

---

Selênio Rocha Silva - Dr.  
Prof. DEE/UFMG

---

Márcio Eustáquio do Santos - Dr.  
Pesq. GERDAU/AÇOMINAS

Aos meus amados

André e Thales.

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus acima de tudo. A todas as oportunidades que Ele me entregou e confiou. Por todas as vezes que Ele me perdoou, mesmo que eu não tenha pedido. Pelas vezes que me carregou em seus braços, mesmo que eu não tenha merecido.

Aos meus queridos pais José e Maria, por terem me transformado em quem sou hoje. Por todas as noites mal dormidas de quando eu era bebê e precisei do apoio deles. Pela base forte e firme estrutura que me ergueu e sustentou todos esses anos. Por terem me ensinado a humildade. Hoje tenho em mim muito mais deles do que eu poderia imaginar.

Aos meus irmãos Wander Lúcio e Anderson como exemplo de dedicação, esforço, perseverança, atitude e fé.

A toda a minha família, ausentes e presentes, que me apoiaram e ficaram do meu lado sempre, nas horas de alegria e tristezas, de fartura e de dificuldade.

Aos meus queridos Marise e Toninho, pelo apoio na dificuldade, pelo carinho, dedicação, atitude e amor.

Para meus avós Teresinha e Divino, que vivem em meu coração e nas minhas preces.

Aos grandes e inesquecíveis amigos do CEFET-MG, em especial Anderson, Grazielle, Luís, Fernanda, Renata, Dênis, Fabrício, Ricardo, Gustavo e outros que ficaram registrados em minha memória como pessoas muito importantes na história da minha vida.

Ao Professor Wallace do Couto Boaventura, pela orientação, sabedoria, paciência e amizade.

Aos colegas e amigos, pela ajuda e solidariedade, em especial ao Alexandre, Emanuelle, Silvério, Geraldo, Leonardo, Carlos, Virna, Ângela, Fernando, Dênis Clei, Camila, Carvalho e Tumilla que me ajudaram muito no desenvolvimento e concretização deste trabalho, que nada mais é que meu grande sonho transformado em realidade.

Aos meus mentores profissionais Manoel Eustáquio dos Santos, Paulo Nazareth e Guilherme Barros de Melo, pelo apoio e incentivo.

## **Resumo**

O processo de laminação consiste em uma etapa importante na indústria siderúrgica devido a sua relação com o produto final, sendo responsável pelo tamanho e forma especificados, devendo operar com produtividade elevada e baixo custo. Interrupções súbitas no processo de laminação causam atrasos na produção, geram grandes gastos com manutenção e perdas de material (sucata). Considerando essa característica, este trabalho analisa a susceptibilidade dos motores de corrente contínua de acionamento de laminadores frente aos distúrbios na tensão de alimentação dos conversores CA-CC desses motores. A metodologia empregada é o levantamento de dados em campo e simulação computacional, tendo sido utilizado o pacote para cálculo de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo – PSCAD.

A partir do levantamento de dados e estudos teóricos realizados, o sistema elétrico incluindo o motor de acionamento de um laminador, foi modelado no PSCAD. Foram realizados estudos de curto-circuito, faltas fase-terra, distorção harmônica, susceptibilidade do circuito de sincronismo das pontes retificadoras e avaliação do desempenho do laminador frente a distúrbios na tensão de alimentação.

Os resultados do trabalho realizado permitiram a proposição de modificações que promovem uma otimização do desempenho do laminador frente aos afundamentos de tensão causados por faltas fase-terra em outros pontos do sistema elétrico. Esta otimização resulta na redução do número de paradas não programadas no laminador, acarretando aumento de produtividade e redução em perdas de produção.

## **Abstract**

The rolling mill process is an important step in the steel industry due to its relationship with the final product, being responsible for the specified size and shape, and operate with high productivity and low cost. Sudden interruptions in the rolling mill process cause delays in production, generate large maintenance expenses and losses of material (scrap). Considering this characteristic, this study examines the susceptibility of DC motors drive of the rolling mill front to disturbances in supply voltage of AC-DC converters of these motors. The methodology used is field data assembly and computer simulation, and has been used the package for calculation of electromagnetic transient time domain - PSCAD.

From the assembly data and theoretical studies performed, the system including the electric drive motor of a rolling mill was modeled in PSCAD. Were conducted studies of short-circuit, single line to ground faults, harmonic distortion, susceptibility of the synchronism circuit of the rectifier bridges and evaluating performance of the rolling mill front to disturbances in supply voltage.

The results of the work allowed to propose alterations that promote the optimization of the performance of rolling front voltage sags caused by single line to ground faults in other parts of the electrical system. This optimization results in the reduction of non planned stop in the rolling mill, resulting in increased productivity and reduction in production losses.

## Sumário

<b>Agradecimentos</b> .....	III
<b>Resumo</b> .....	IV
<b>Abstract</b> .....	V
<b>Sumário</b> .....	VI
<b>Lista de Figuras</b> .....	VIII
<b>Lista de Tabelas</b> .....	XII
<b>Glossário</b> .....	XIII
<b>Simbologia</b> .....	XIV
<b>Capítulo 1 – Introdução Geral</b> .....	1
1.1 – Introdução .....	1
1.2 – Objetivo .....	3
1.3 – Proposta de Trabalho .....	3
1.4 – Contribuições .....	4
1.5 – Organização do Texto.....	5
<b>Capítulo 2 – Afundamentos Momentâneos de Tensão</b> .....	7
2.1 – Introdução .....	7
2.2 – Origem e características dos AMT's .....	9
2.3 – Impacto dos AMT's nos processos industriais .....	12
2.3.1 – Medidas Preventivas.....	15
2.4 – Conclusões .....	17
<b>Capítulo 3 – Filosofias e Tipos de Aterramentos em Sistemas Elétricos Industriais</b> .....	19
3.1 – Introdução .....	19
3.2 – Configurações do Aterramento do Neutro dos Transformadores .....	22
3.2.1 – Aterramentos Industriais versus Aterramentos na Distribuição .....	25
3.3 – Sistemas com Neutro Solidamente Aterrado .....	26
3.3.1 – Falta Fase-Terra - FT .....	27
3.3.2 – Falta Fase-Fase-Terra - FFT .....	27
3.4 – Sistemas com Neutro Aterrado por Resistência .....	30
3.4.1 – Falta Fase-Terra - FT .....	32
3.4.2 – Falta Fase-Fase-Terra – FFT .....	32



---

3.5 – Conclusões .....	35
<b>Capítulo 4 – Influência da Configuração do Sistema Elétrico na Susceptibilidade dos</b>	
<b>AMT's .....</b>	<b>37</b>
4.1 – Introdução .....	37
4.2 – Sistemas Elétricos Industriais .....	38
4.2 – Circuito Elétrico do Laminador .....	39
4.2.1 – Modelagem .....	41
4.2.2 – Estudos de Correntes Harmônicas .....	45
4.2.3 – Estudos de Afundamentos de Tensão .....	56
4.3 – Circuito de Referência de Tensão de Sincronismo .....	61
4.3.1 – Estudos de Faltas Fase-Terra .....	62
4.3.1.1 – Ponto de conexão aterrado na malha industrial .....	62
4.3.1.2 – Ponto de conexão isolado da malha industrial .....	65
4.4 – Conclusões .....	67
<b>Capítulo 5 – Conclusões e Propostas de Continuidade .....</b>	<b>70</b>
5.1 – Conclusões .....	70
5.2 – Propostas de Continuidade .....	72
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>74</b>

## Lista de Figuras

Fig.2.1 – Diagrama elétrico unifilar do sistema elétrico industrial .....	10
Fig.2.2 – Afundamento de tensão na saída dos conversores trifásicos CA-CC 6 pulsos .....	13
Fig.2.3 – Histórico de ocorrências de afundamentos de tensão.....	14
Fig.2.4 – Percentual de contribuição das laminações nas perdas financeiras potenciais .....	15
Fig.3.1 – Falta FFT em sistemas isolados .....	23
Fig.3.2 – Efeitos de tensões fase-neutro na ocorrência de uma falta FT em um sistema isolado.	24
Fig.3.3 – Circuito de simulação sistema solidamente aterrado .....	27
Fig.3.4 – Falta FT: Comportamentos das tensões FT num sistema com neutro solidamente aterrado .....	28
Fig.3.5 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro solidamente aterrado.....	29
Fig.3.6 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase no secundário do transformador .....	30
Fig. 3.10 – Sistema aterrado por resistência.....	31
Fig.3.11 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-terra num sistema com neutro aterrado por resistência.....	32
Fig.3.12 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro aterrado por resistência.....	33
Fig.3.13 – Falta FT: Tensões fase-fase no secundário do transformador.....	34
Fig.3.14 – Medição real do comportamento de uma falta fase-terra no 69kV.....	35
Fig.3.15 – Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-fase e fase-terra (a) antes da falta (b) após a falta	
Fig.3.16 – Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-terra num sistema com neutro aterrado por resistência	
Fig.3.17– Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro aterrado por resistência	
Fig. 4.1 – Esquema básico de laminação.....	40
Fig. 4.2 – Diagrama elétrico do laminador conectado ao sistema.....	41
Fig. 4.3 – Circuito de referência de tensão de <i>gate</i> .....	42
Fig. 4.4 – Placa do divisor de tensão .....	43
Fig. 4.5 – Diagrama esquemático utilizado nas simulações .....	45
Fig. 4.6 - Caso 1: Percentual de correntes harmônicas injetadas por um retificador 6 pulsos .....	47

---

Fig. 4.7– Comparação espectro de harmônicas e DHT primário x secundário PR 6 pulsos.....	48
Fig. 4.8 – Caso 2: Percentual de correntes harmônicas injetadas por um retificador de 12 pulsos.....	49
Fig. 4.9– Comparação DHT primário x secundário PR 12 pulsos .....	50
Fig. 4.10 – Comparativo de harmônicas injetadas na rede entre retificadores de 6 e 12 pulsos ..	50
Fig. 4.11 – Forma de onda das tensões de fase entre primário e secundário considerando um retificador de 12 pulsos.....	51
Fig. 4.12 – DHT 6 pulsos x 12 pulsos .....	52
Fig. 4.13 –Simulações motor CC - Caso 1: Neutro solidamente aterrado.....	53
Fig. 4.14 – Simulações motor CC - Caso 2: Resistência de aterramento $R=22.3\Omega$ .....	54
Fig. 4.15 – Simulações motor CC - Caso 3: Resistência de aterramento $R=66.4\Omega$ .....	54
Fig. 4.16 – Influência da alteração de velocidade na laminação .....	55
Fig. 4.17 – Circuito elétrico de referência de tensão para geração de pulsos dos tiristores da ponte retificadora.....	57
Fig. 4.18 – Comportamento das tensões em relação a terra no primário dos transformadores, considerando a fase C em curto-circuito fase-terra .....	58
Fig. 4.19 – Comportamento das tensões fase-fase no primário dos transformadores, considerando a fase C em falta a terra.....	59
Fig. 4.20 – Comportamento da tensão na fase C de referência de sincronismo para os conversores durante a falta FT na fase C do sistema de potência (considerando neutro conectado a malha industrial) .....	60
Fig. 4.21 – Simulação de falta pra terra na fase C considerando o ponto de neutro não conectado a malha industrial .....	61
Fig. 4.22 – Comportamento da tensão C de referência de sincronismo para os conversores CA-CC durante uma falta FT na fase C do sistema de potência (considerando neutro não conectado à malha industrial).....	61

---

## Lista de Tabelas

Tab 2.1 – Variação de Tensão de Curta Duração (VTDC's).....	8
Tab.2.2 – Medidas preventivas contra os impactos dos afundamentos de tensão causados por faltas fase-terra .....	16
Tab.3.1 – Comparativo das características de cada tipo de aterramento do neutro.....	22
Tab.3.2 – Comparativo de aterramento em sistemas industriais e sistemas de distribuição .....	26
Tab.4.1 – Dados do Transformador de Potência Trifásico Três Enrolamentos .....	43
Tab.4.2 – Dados do Motor do Laminador .....	44

---

## Glossário

AMT – Afundamento Momentâneo de Tensão

VTCD – Variação de Tensão de Curta Duração

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

PSCAD – *Power System CAD*

EDSA – *Electrical Power Systems Analysis and Design*

PLL – *Phase Locked Loop*

PLO – *Phase Locked Oscillator*

PLC – *Programmable Logic Controller*

rpm – rotações por minuto

ca – Corrente alternada

cc – Corrente contínua

dc – Direct Current

FT – Falta Fase-Terra

FFT – Falta Fase-Fase-Terra

FFT – Falta Trifásica

FFFT – Falta Trifásica a Terra

Eab1 – Tensão entre fases A e B no primário do transformador

Ebc1 – Tensão entre fases B e C no primário do transformador

Eca1 – Tensão entre fases C e A no primário do transformador

Eat1 – Tensão fase A para neutro no primário do transformador

Ebt1 – Tensão fase B para neutro no primário do transformador

Ect1 – Tensão fase C para neutro no primário do transformador

Eab2 – Tensão entre fases A e B no secundário do transformador

---

Ebc2 – Tensão entre fases B e C no secundário do transformador

Eca2 - Tensão entre fases C e A no secundário do transformador

Eat2 – Tensão fase A para neutro no primário do transformador

Ebt2 – Tensão fase B para neutro no primário do transformador

Ect2 – Tensão fase C para neutro no primário do transformador

Eab3 – Tensão entre fases A e B no terciário do transformador

Ebc3 – Tensão entre fases B e C no terciário do transformador

Eca3 – Tensão entre fases C e A no terciário do transformador

Eat3 – Tensão fase A para neutro no terciário do transformador

Ebt3 – Tensão fase B para neutro no terciário do transformador

Ect3 – Tensão fase C para neutro no terciário do transformador

---

## Simbologia

$I_{cc}$  – Corrente de Curto Circuito da rede

$R_{eq+}$  – Resistência equivalente da rede (sequencia positiva)

$X_{eq+}$  – Reatância equivalente da rede (sequencia positiva)

$Z_{eq+}$  – Impedância equivalente da rede (sequencia positiva)

$E_f$  – Tensão de entrada da ponte retificadora

$E_a$  – tensão na carga.

$I_a$  – Corrente na carga

$V_{11}$  – Velocidade do laminador 1

$V_{12}$  – Velocidade do laminador 2

## Capítulo 1

# Introdução Geral

## 1.1 – Introdução

Em uma indústria, de forma geral, a qualidade de energia elétrica é fundamental para garantir a estabilidade dos processos de fabricação, mantendo os resultados da produção conforme planejamento. É conhecido que problemas de qualidade de energia causam paradas bruscas em equipamentos, gerando grandes perdas financeiras, tanto devido à substituição de peças danificadas quanto em perdas de produção [1].

Inúmeros são os tipos de problemas relacionados com qualidade de energia, porém para esse trabalho foi considerada principalmente os afundamentos de tensão causados por faltas fase-terra, em virtude da característica do sistema elétrico estudado e da frequência de ocorrências desse tipo de falta.

As faltas fase-terra no sistema elétrico industrial estudado causam um afundamento de tensão entre fase e neutro na fase sob falta, até que o curto-circuito seja isolado pelo sistema



de proteção no ponto de falta. A duração desse afundamento então será o tempo de atuação da proteção contra faltas fase-terra nesse ponto.

É observado que devido a esse afundamento de tensão, o motor do laminador é desconectado do sistema, mesmo distante do ponto da ocorrência do curto-circuito. Com o intuito de solucionar ou minimizar esse problema relacionado a esse tipo de falta, houve a necessidade de quantificar, estudar e avaliar tanto as causas como os efeitos sobre a operação do laminador, ou seja, conhecer a susceptibilidade dos acionamentos de corrente contínua aos afundamentos de tensão causados pelas faltas fase-terra. Dentro desse contexto, as possíveis ações estão concentradas nos seguintes aspectos:

1° - Diminuição da incidência de afundamentos de tensão através da redução da magnitude, duração ou frequência de ocorrência;

2° - Diminuição da sensibilidade dos equipamentos susceptíveis, aumentando sua robustez e tolerância aos distúrbios.

Para se diminuir a incidência de afundamentos de tensão atuando em sua frequência de ocorrência, várias ações são validadas para intervenção sob aspectos de melhoria de procedimentos operacionais, terminações de cabos, especificação correta de equipamentos.

Além disso, verificou-se a importância do tipo de aterramento do sistema de potência e sua influência no comportamento das tensões durante uma falta fase-terra. O tipo do aterramento do sistema de potência pode fazer com que, o sistema elétrico permaneça com suas tensões entre fases inalteradas, mesmo sob condição de falta fase-terra.

Para agir no sentido de diminuir a sensibilidade dos componentes elétricos do laminador e aumentar sua tolerância em relação aos afundamentos causados pelas faltas fase-terra em pontos distantes, deparou-se com a influência do ponto de conexão do neutro do circuito de referência de tensão para os gatilhos dos tiristores da ponte retificadora, o que demandou estudos específicos.

## 1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar a susceptibilidade do acionamento dos motores de corrente contínua de laminadores frente a distúrbios de tensão de alimentação dos conversores CA-CC desse motor, visando à redução de custos através da redução do número de paradas não programadas do laminador.

## 1.3 – Proposta de Trabalho

Neste trabalho é proposta a análise do comportamento do sistema elétrico de um laminador frente a variações de tensão, especificamente os afundamentos momentâneos de tensão ou “*voltage sags*” causados pelas faltas fase-terra, mesmo que essas faltas estejam localizadas em pontos distantes em relação a esse equipamento. Como complemento, a proposta é a validação da influência do tipo de aterramento do sistema de potência durante a ocorrência de uma falta fase-terra demonstrando o comportamento das tensões do sistema elétrico para cada tipo.

Através de simulações realizadas em PSCAD, a exposição dos resultados e suas respectivas análises, os seguintes itens são propostos:

- Análise das características de dois tipos de aterramentos comuns em sistemas elétricos industriais e sua influência no comportamento das tensões durante uma falta fase-terra;
- Modelagem do sistema elétrico do laminador (fonte, transformador, conversores CA-CC, referência de tensão de sincronismo, motor CC);
- Estudo de correntes harmônicas;

- Simulação do comportamento do sinal de referência de tensão para geração de pulsos de gatilho para os tiristores dos retificadores, tanto com seu ponto neutro conectado à malha industrial, quanto conectado em outro ponto de aterramento (“isolado” da malha industrial).

## 1.4 – Contribuições

A principal contribuição deste trabalho é a melhoria do desempenho operacional de um laminador, ou seja, melhoria de sua susceptibilidade frente à ocorrência de faltas fase-terra em outros pontos do sistema de potência, que não seja em seu principal alimentador. Essa melhoria envolve redução de perdas financeiras causadas por paradas súbitas do processo de laminação, evitando perdas de produção, grandes tempos de manutenção, aquisição de novos componentes. Neste contexto são abordados os seguintes itens:

- Avaliação da influência do aterramento do neutro dos transformadores durante a ocorrência de uma falta fase-terra no comportamento das tensões de fase e tensões fase-neutro;
- Discussão e validação da proposta de alteração da conexão do ponto neutro do circuito de referência de tensão para geração de pulsos de gatilhamento dos tiristores das pontes retificadoras.

## 1.5 – Organização do Texto

Este texto foi dividido em cinco capítulos:

Capítulo 1 – Introdução Geral;

Capítulo 2 – Afundamentos Momentâneos de Tensão (AMT's);

Capítulo 3 – Filosofias de Tipos de Aterramento em Sistemas Elétricos Industriais;

Capítulo 4 – Influência da Configuração do Sistema Elétrico na Susceptibilidade dos AMT's;

Capítulo 5 – Conclusões Gerais.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos relacionados aos afundamentos momentâneos de tensão, assim como as variáveis que afetam suas características. É descrito o sistema elétrico simulado e as ocorrências comuns de faltas fase-terra em pontos distantes em relação ao alimentador do laminador. São ilustrados os impactos dos AMT's na indústria siderúrgica através da exposição de indicadores relacionados com o número de ocorrências, e qual o peso da contribuição das laminações em relação ao valor total dos prejuízos financeiros por perdas de produção.

O capítulo 3 mostra as formas de aterramentos do sistema de potência em indústrias: sistemas isolados, solidamente aterrados e aterrados por resistência. Os comportamentos das tensões fase-fase e fase-terra são simulados e analisados para cada caso, considerando o sistema sob falta fase-terra.

O capítulo 4 é dedicado à modelagem do circuito elétrico do laminador, incluindo seu circuito de referência de tensão de sincronismo. São considerados dois casos de simulação para avaliar o comportamento das tensões do circuito de referência de tensão para geração dos pulsos de gatilho para os tiristores das pontes retificadoras durante uma falta fase-terra no lado primário do transformador de potência: considerando o ponto de neutro conectado à malha de aterramento industrial, e considerando esse mesmo ponto não conectado à malha de aterramento industrial (conectado a um terminal de aterramento separado). A partir disso, é feita a avaliação do comportamento do motor CC do laminador frente a distúrbios na tensão causados por faltas fase-terra. Para complementar as análises da influência da configuração do sistema elétrico na qualidade de energia, são realizados estudos de correntes harmônicas que permitem identificar o ponto ideal da conexão do circuito de referência de tensão.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões gerais e as propostas de continuidade do trabalho.

## Capítulo 2

# Afundamentos Momentâneos de Tensão

## 2.1 – Introdução

As variações de tensão de curta duração ou VTCD's referem-se a um desvio significativo da amplitude da tensão por curto intervalo de tempo, englobando as variações momentâneas e temporárias de tensão [4]. Em termos gerais, as variações momentâneas de tensão, as quais compreendem as interrupções, afundamentos e elevação de tensão, variam em amplitude de menos de 0,1 pu a 1,10 pu e em tempo de menos de um ciclo até 3 segundos. As variações temporárias de tensão (interrupções, afundamentos e elevação de tensão), variam sob o mesmo valor de amplitude, porém em tempo superior a 3 segundos e inferior a 1 minuto. As definições podem ser verificadas na tabela 2.1.

Conceitualmente, a diferença entre variação momentânea e interrupção momentânea está no valor da amplitude da tensão. Interrupções são ocorrências severas e acontecem pontualmente. As variações ocorrem no sistema elétrico como um todo [14].

Tab. 2.1 – Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD's)

<b>Variações Momentâneas</b>	<b>Amplitude (pu)</b>	<b>Duração (segundos)</b>
<i>Interrupção Momentânea de Tensão (IMT)</i>	< 0,1	< = 3
<i>Afundamento Momentâneo de Tensão (AMT)</i>	>0,1 e < 0,9	>0,0167 e < = 3
<i>Elevação Momentânea de Tensão (EMT)</i>	> 1,10	> 0,0167 e < = 3

Interrupção é diferente de afundamento de tensão. Uma interrupção é deixar de fornecer, ou seja, quando um equipamento de proteção atua interrompendo o circuito. Os afundamentos de tensão ocorrem durante esse período de falta, mas nem sempre vão resultar em interrupção [23].

Na ocorrência de uma falta fase-terra em um sistema interligado, ocorre um afundamento momentâneo de tensão que permanece no sistema até que o ponto de falta seja isolado pela proteção. Muitas vezes, quando acontece esse tipo de ocorrência, muitos equipamentos são desconectados do sistema, causando uma errada impressão de falha de seletividade na coordenação da proteção do sistema elétrico. O que geralmente ocorre é que os controles de vários equipamentos estão ligados em tensão alternada e sua sensibilidade é alta quando há afundamentos de tensão, e em outros casos, as referências de tensão não estão adequadamente aterradas.

Esses problemas de qualidade de energia elétrica podem ser evitados na etapa de projeto através do conhecimento do modo de operação dos equipamentos e da adoção de uma filosofia de configuração que atenda aos requisitos de qualidade de energia para o cliente, inclusive sob condições de falta. É necessário conhecer os tipos de ocorrências comuns em sistemas elétricos industriais e criar meios de proteger o sistema da melhor maneira possível sem comprometer o processo de produção. Alguns desses aspectos que devem ser observados

podem ser resumidos em: forma de aterramento do neutro dos transformadores de potência e ponto de conexão do neutro dos circuitos de referência de tensão.

Considerando esses aspectos, cabe uma revisão dos conceitos de afundamentos de tensão para que, conhecendo o fenômeno e sua origem, ações possam ser tomadas para a melhoria do desempenho de um sistema elétrico específico. Sendo assim, o alcance das metas estabelecidas reflete em produtividade nos equipamentos industriais, reduzindo custos e perdas. Esse aspecto é uma importante contribuição da engenharia elétrica nos processos industriais [7].

## **2.2 – Origem e Características dos AMT's**

Os AMT's são geralmente provocados por partida de grandes motores e curto-circuito nos sistemas de energia [8]. Numa planta industrial, curtos-circuitos fase-terra são bastante comuns, causados por centelhamentos em terminações de cabos de potência, escavações, contatos com animais ou árvores em ramais de distribuição, poluição em cadeia de isoladores, e as próprias descargas atmosféricas. Quando ocorre um curto circuito, o AMT se inicia e continua presente até que a proteção atue, desconectando o circuito sob falta do sistema. O tempo de eliminação da falta típico para uma falta fase-terra no sistema elétrico estudado atinge valores próximos de 130ms. Na figura 2.1 podemos perceber a configuração típica de um sistema industrial, onde faltas fase-terra podem ocorrer em pontos diferentes do sistema elétrico, mas os AMT's atinge todo o sistema durante a falta.



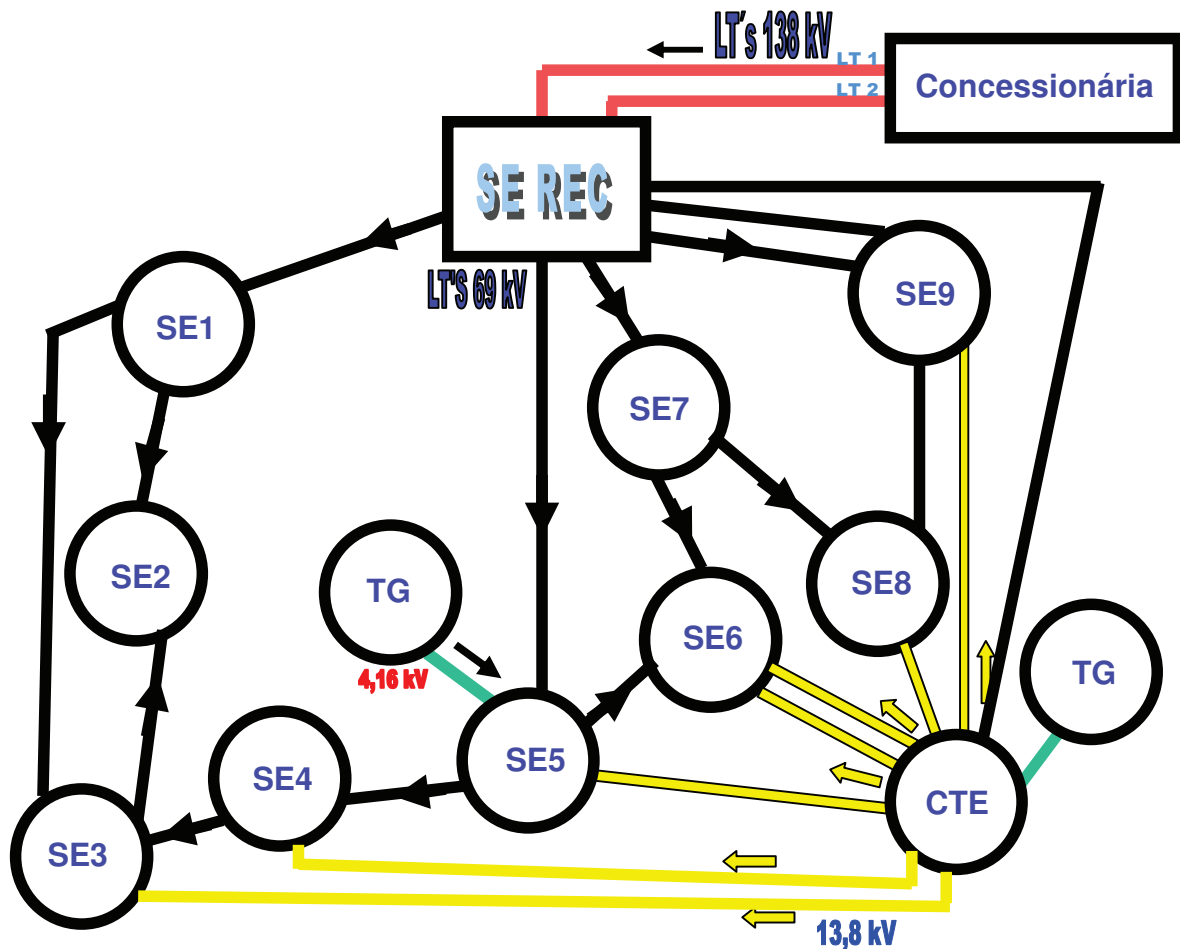


Fig. 2.1 – Diagrama elétrico do sistema industrial

Na operação de sistemas elétricos em anel, são identificadas vantagens em relação à flexibilidade de alimentação de uma mesma subestação através de pontos alternativos [9]. Porém na ocorrência de um curto-circuito em qualquer ponto dessa ligação em anel, todo o sistema estará sujeito ao afundamento de tensão até a eliminação do ponto de falta. Esse comportamento se dá devido as características de impedância do sistema elétrico.

Os afundamentos de tensão podem ser equilibrados ou desequilibrados, de acordo com o tipo de falta que deu origem ao distúrbio. As faltas trifásicas (FFF) e trifásicas à terra (FFFT) são simétricas e geram, portanto, afundamentos de tensão também simétricos e severos, porém raros [10].

A maioria das falhas ocorridas nos sistemas elétricos industriais é as faltas fase-terra, que gerando afundamentos de tensão menos severos, porém, desequilibrados e assimétricos. Na tabela 2.2 podemos verificar um levantamento do percentual dos tipo de curtos-circuitos nos sistemas elétricos industriais.

Tab. 2.2 – Percentual de ocorrências de curto-circuito [66]

<b>Tipos de curtos-circuitos</b>	<b>Ocorrências (%)</b>
<b><math>3\phi</math></b>	<b>6</b>
<b><math>2\phi</math></b>	<b>15</b>
<b><math>2\phi</math>-terra</b>	<b>16</b>
<b><math>1\phi</math>-terra</b>	<b>63</b>

Uma das características importantes do afundamento de tensão é a sua duração, portanto é fundamental que se analise sua evolução no tempo. Por isso, as características da proteção do sistema elétrico são de suma importância [13]. A garantia que o sistema de proteção está devidamente em funcionamento, garante que o curto circuito permanecerá no sistema o menor tempo possível desde a sensibilização do relé de proteção até a completa abertura dos contatos dos disjuntores e extinção do arco em suas câmaras de extinção. Essa prática melhora o desempenho do sistema elétrico sob condições de falta.

Cada nível de tensão possui um valor típico para atuação da proteção de forma instantânea que geralmente depende do tipo construtivo do disjuntor [14]. Nos estudos realizados, para uma tensão de 69kV, esse valor pode variar de 50 ms até 167 ms. Conforme histórico de atuações e análises de oscilografias, o tempo típico é de 130 ms.

## 2.3 – Impacto dos AMT’s nos processos industriais

Um Afundamento Momentâneo de Tensão atinge as indústrias de forma danosa e prejudicial, pois vários equipamentos apresentam sensibilidade quanto às variações de tensão [15]. Um AMT tanto pode levar um equipamento ao funcionamento inadequado, afetando a produção industrial e a qualidade do produto, ou danificando os equipamentos do processo. A primeira ocorrência citada acontece quando o equipamento analisado durante o AMT não chega a interromper o funcionamento, mas apenas modifica seu funcionamento (perda de sincronismo, perda de torque, entupimento de vias, etc.). A segunda possibilidade ocorre quando o equipamento atingido suspende o funcionamento, interrompendo o processo de produção. Ambas as possibilidades implicam em prejuízos para a indústria.

Geralmente em usinas siderúrgicas, existem várias áreas industriais com processos diferentes, e que são interligadas pelo sistema elétrico. Por um lado, essa configuração é interessante por oferecer segurança e operabilidade, pela possibilidade de uma única área receber duas alimentações ou mais. Por outro lado, os afundamentos de tensão afetam ao sistema como um todo, podendo causar desligamentos (por vezes, indevidos) em equipamentos e falhas em processos. Nas figuras 2.1 e 2.2, temos um exemplo da deformação da tensão na saída de um conversor CA-CC trifásico de 6 pulsos na ocorrência de um afundamento de tensão monofásico na entrada do conversor [16].

A tensão eficaz reduz para um valor de aproximadamente 85% de sua tensão nominal durante um intervalo de 60ms. Dependendo do tipo e especificação do equipamento conectado a essa fonte, o mesmo poderá se comportar de forma errônea ou até mesmo ter seu processo interrompido.

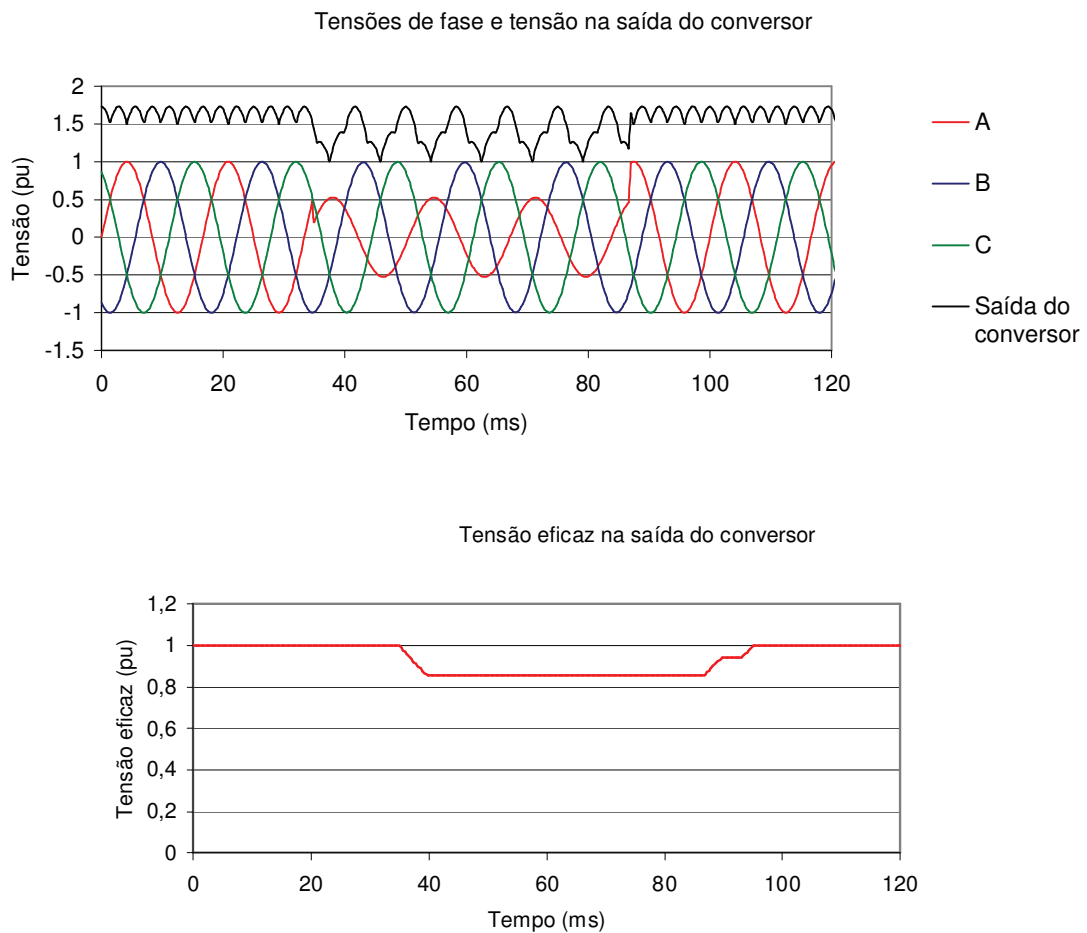


Fig. 2.2 – Afundamento de tensão na saída dos conversores trifásicos CA-CC 6 pulsos [16]

Observando o levantamento das ocorrências nos últimos 3 anos de afundamentos momentâneos de tensão realizado no sistema elétrico industrial em estudo, pode-se conhecer a relevância do impacto dos mesmos, assim como sua frequência de ocorrência. As causas internas estão definidas como problemas gerados dentro da planta industrial, como falhas de isolamento e curtos circuitos. As causas externas são ocorrências fora dos limites da empresa,

como descargas atmosféricas nas linhas de transmissão e curtos-circuitos a partir da concessionária.

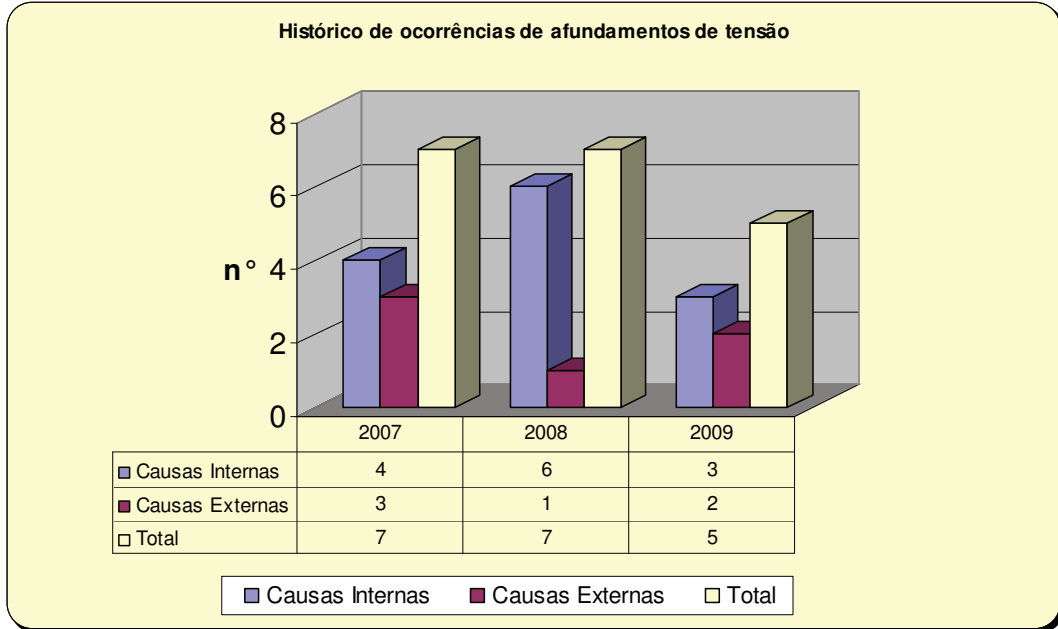


Fig.2.3 – Histórico de Ocorrências de afundamentos de tensão

As áreas de maior impacto por perda de produção na usina siderúrgica são alto-forno e aciaria onde está concentrado a base de fabricação do gusa (ferro fundido) e o aço, respectivamente. Em seguida estão as laminações, que fabricam produtos que possuem maior valor agregado, e que é o último passo antes da entrega pra o cliente. De todo o montante financeiro envolvido nas perdas de produção, geradas por paradas devido a AMT's, o impacto das laminações é bastante significativo, o que pode ser verificado através da análise da figura 2.3.

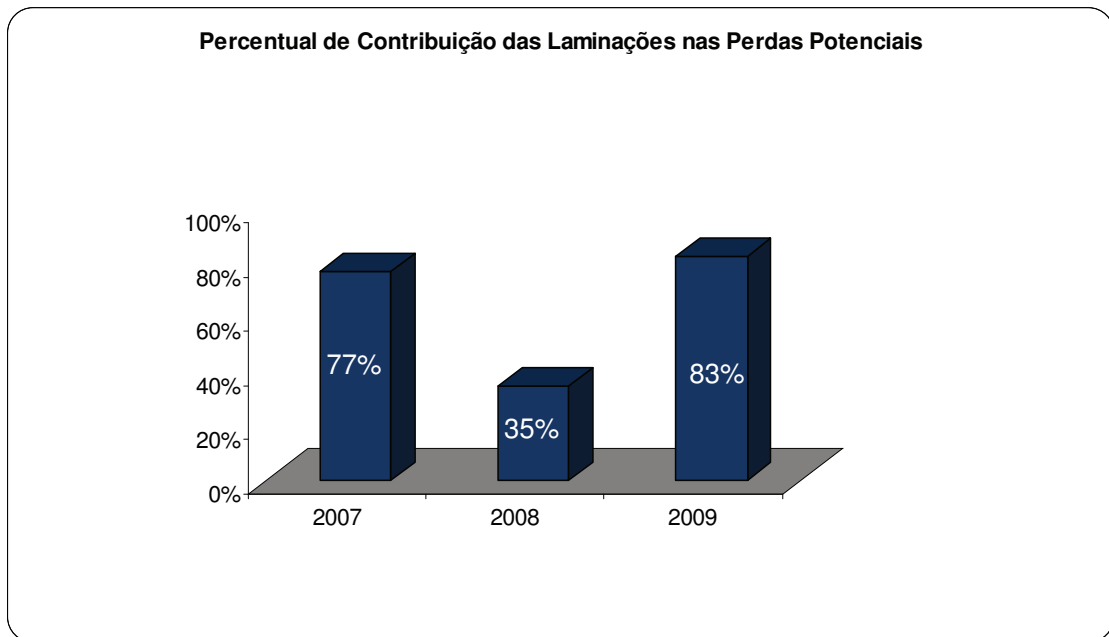


Fig.2.3 – Percentual de contribuição das Laminações nas perdas financeiras potenciais

Considerando os três últimos anos, temos em média, 65% dos potenciais de perdas financeiras geradas por paradas súbitas de processos industriais devido a AMT's é proveniente das laminações.

Essas perdas refletem um valor significativo de perdas para a indústria envolvendo custos de várias naturezas, como perdas de produção, perdas de produto, necessidade de execução de limpeza, transtorno no momento do religamento, devido principalmente ao “agarre” de material entre os cilindros de laminação [17].

### 2.3.1 – Medidas Preventivas

Tempos de interrupção reduzidos e menores perdas financeiras estabelecem o equilíbrio desejado nos processos industriais para garantia de produtividade com menor custo. Dentro do que já foi exposto, algumas ações já são adotadas para a prevenção dos prejuízos causados pelos afundamentos momentâneos de tensão, como as manutenções preventivas

[18]. Na tabela 2.2 são descritas algumas medidas preventivas relacionadas com as causas detectadas.

Tab. 2.2 – Medidas Preventivas contra os impactos dos afundamentos de tensão causados por faltas fase-terra

<b>Causas</b>	<b>Medidas Preventivas</b>
Falhas de equipamentos	Manutenção periódica adequada; Cuidados na especificação de projeto e compra; Sistema aterrado por resistência a fim de limitar corrente de falta
Descargas atmosféricas	Proteção e blindagem de equipamentos, LT's e ramais de distribuição.
Contatos com árvores	Limpeza da faixa de servidão das LT's; Podas de árvores próximas aos ramais de distribuição.
Poluição	Limpeza das cadeias de isoladores e outras partes isolantes de equipamentos e subestações.
Falha Humana	Treinamento; Modernização/Automação.

No que se trata de falha de equipamentos, o impacto dos afundamentos de tensão podem ser minimizados na fase de projeto ao considerar o aterramento do neutro dos transformadores com limitação de corrente, de forma que as componentes de tensão entre fases possam permanecer sãs durante um curto fase-terra. O cálculo do resistor de aterramento deve levar em conta a queda de tensão no mesmo, para que, além de garantir a proteção das pessoas (pela limitação da corrente e controle das tensões de passo e toque), o sistema também garanta a operabilidade do sistema de potência quando na ocorrência de uma falta fase-terra.

Problemas caracterizados como falhas de equipamentos estão relacionados com vários fatores como: equipamentos sensíveis a pequenas variações de tensão, em alguns casos os inversores de frequência [19]; equipamentos eletromecânicos de proteção (relés e disjuntores) que não atuam ou atuam com um tempo maior do que o especificado por falta de manutenção ou obsolescência; circuitos elétricos de equipamentos que possuem configuração de aterramento do neutro indevida.

A incidência de descargas atmosféricas sobre o sistema de energia elétrica provoca sobretensões que poderão ultrapassar a isolação da cadeia de isoladores, ocasionando curtos-

circuitos fase-terra, ocasionando assim os afundamentos de tensão. Segundo pesquisas realizadas, a maioria das faltas, em linhas de transmissão, são devido à ocorrência de descargas atmosféricas que, por sua vez, são as principais causas do afundamento de tensão [20] e [21]. Cabe ressaltar, que nem todas as descargas atmosféricas resultam em afundamento de tensão, pois depende basicamente de sua intensidade e das características do sistema elétrico.

Em relação a poluição, sabe-se que existe um grande nível de poluição em empresas siderúrgicas. Essa poluição é depositada sobre os isoladores e equipamentos do sistema elétrico, reduzindo seu nível de isolamento e contribuindo para o aumento do número de ocorrências de faltas à terra quando da incidência de sobretensões.

Além das causas acima citadas, existem várias outras que são consideradas como interferências. São elas: queimadas acidentais ou intencionais debaixo de linhas de transmissão; contatos acidentais de guindastes ou escavações; vandalismo, contato com animais, entre outras.

O controle total preventivo contra os afundamentos de tensão dentro de todo o sistema elétrico pode ser difícil e inviável, dependendo da extensão do mesmo. Ao se trabalhar com todas as possibilidades relacionadas à melhoria do desempenho do sistema elétrico, deve-se iniciar o trabalho de análise do funcionamento dos equipamentos com o intuito de tentar reduzir sua sensibilidade sem afetar os processos de produção.

## **2.4 – Conclusões**

O direcionamento de esforços para amenizar os possíveis transtornos e prejuízos associados aos distúrbios da qualidade da energia elétrica tem sido uma grande preocupação dos profissionais da área de engenharia elétrica [22]. Os afundamentos de tensão são as causas



mais comuns de distúrbios de QEE dentro da indústria. Esses distúrbios geram grandes perdas por paradas súbitas no processo de produção, além de:

- i) perdas na produção com geração de material sucitado;
- ii) atrasos na produção, condição insatisfatória para os clientes;
- iii) grandes tempos de parada para manutenção;
- iv) quebra de equipamentos;
- v) intervenção de reparo para os equipamentos danificados.

Dessa forma, justifica-se desenvolver pesquisas e adotar soluções para minimizar os prejuízos que os afundamentos de tensão geram nos processos industriais, pois a perda financeira é bastante significativa. Pesquisas e análises relacionadas à qualidade de energia e melhoria do desempenho do sistema elétrico sob condições de falta são essenciais na competitividade das indústrias, reduzindo custos e aumentando a produtividade.

Nessa seqüência são abordados aspectos relativos ao aterramento, que além de estarem diretamente relacionado com a QEE, suas filosofias e aplicações influenciam a propagação do afundamento de tensão dentro do sistema elétrico industrial.

## Capítulo 3

# Filosofias e Tipos de Aterramentos em Sistemas Elétricos Industriais

## 3.1 – Introdução

A garantia da operabilidade de um sistema elétrico industrial parte dos princípios mínimos de qualidade de energia que são exigidos pelos equipamentos como módulo e fase de tensão, frequência, etc. Além disso, é também de extrema importância conhecer o comportamento do sistema elétrico frente aos distúrbios causados na qualidade de energia que são provenientes de faltas. Conforme citado anteriormente, o tipo de falta mais comum nos sistemas elétricos industriais é a falta a terra (FT). Os afundamentos que são provenientes desses tipos de ocorrências podem acarretar paradas em equipamentos fundamentais para os resultados de produção de uma planta industrial. Essas paradas geram grandes perdas devido ao atraso na produção, e em relação a quebras de equipamentos importantes, acarretando altos tempos de paradas para manutenção e reparo.

Para que um sistema de energia elétrica opere corretamente, com uma adequada continuidade de serviço, desempenho seguro do sistema de proteção e com garantia dos limites de segurança pessoal, é fundamental que o 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 de falta a que o sistema possa ser submetido. Além disso, garantir que o sistema continue em operação no caso de uma falta fase-terra, através do correto dimensionamento do tipo de aterramento da conexão dos neutros dos transformadores de potência.

É importante se conhecer bem a diferença entre sistemas de aterramento e aterramento de sistemas. Sistemas de aterramento são as configurações existentes sob o solo (malhas de aterramento, eletrodos) que alteram as características físicas do mesmo. Já o aterramento de sistemas consiste nas várias formas em que os neutros dos transformadores e geradores são conectados a terra [25].

Dentro desses temas, é importante salientar que os principais objetivos dos sistemas de aterramento são:

- Obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível, para correntes de falta a terra, limitando os potenciais produzidos dentro da subestação;
- Proteção de pessoas, controle de tensões de passo e toque.

Na indústria, o aterramento de sistemas, que é a conexão entre os neutros de geradores e transformadores à malha industrial, possui como principais objetivos [25]:

- Limitar a corrente de falta fase-terra em limites de segurança para pessoas e para os equipamentos (quanto maior a resistência, maior é a redução do valor da corrente de curto circuito fase-terra);
- Fazer que os equipamentos de proteção se sensibilizem e isolem rapidamente as falhas à terra, facilitando sua localização;

Além desses objetivos, temos também que um aterramento bem dimensionado garante a operabilidade dos equipamentos mesmo sob ocorrência de uma variação momentânea de tensão causada por uma falta fase-terra. Garante também o conhecimento das sobretensões que o sistema estará submetido, proporcionando o correto dimensionamento do isolamento dos componentes do sistema elétrico.

Baseadas nas definições do IEEE Green Book (IEEE Standard 142) [26], são revisados alguns conceitos em relação a aterramento de sistemas:

i) sistemas com neutro isolado: sistemas sem conexões intencionais para a terra;

ii) sistemas com neutro solidamente aterrados: são aqueles que são conectados diretamente a terra, através da conexão do ponto de neutro sem nenhuma impedância intencionalmente inserida;

iii) sistemas com neutro aterrados por resistência: são aqueles que são aterrados através de uma impedância, onde o principal elemento é uma resistência.

Para que o conceito seja corretamente fundamentado é necessário que esteja consolidado entre os inspetores e técnicos da área operacional, quais são os princípios do aterramento em sistemas elétricos industriais [27], com o intuito de que sejam absorvidas com clareza a finalidade e funcionalidade do aterramento. É necessário que o conceito das interferências do aterramento na QEE durante um distúrbio causado por uma falta fase a terra seja conhecido.

Nos próximos itens são descritos os principais tipos de aterramento comuns em sistemas elétricos industriais. São listadas as características de cada um deles, e os efeitos nas formas de onda de tensão frente falta a terra em alimentadores radiais de sistemas interligados.

## **3.2 – Configurações do Aterramento do Neutro dos Transformadores**

O aterramento do sistema elétrico industrial possui algumas particularidades que são importantes e não comparáveis aos sistemas de distribuição. Em algumas aplicações, os neutros dos sistemas elétricos industriais são isolados, ou seja, não aterrados. Porém todo sistema elétrico possui conexão a terra através de capacitâncias fase-terra dos condutores de fase. Essas impedâncias são muito elevadas e as correntes resultantes de uma falta fase-terra têm valor muito baixo, praticamente zero. Dessa maneira, por exemplo, quando há ocorrência de uma falha de isolamento num cabo de alimentação, não há correntes de falta circulando para a terra, ou seja, a operabilidade dos equipamentos é mantida. Na ocorrência de uma segunda falta, numa outra fase (não tendo sido a primeira falta removida), ocorrerá uma circulação de corrente entre fases de valor bastante elevado que dificulta a atuação da proteção: o estudo de seletividade deve prever a abertura de dois disjuntores simultaneamente.

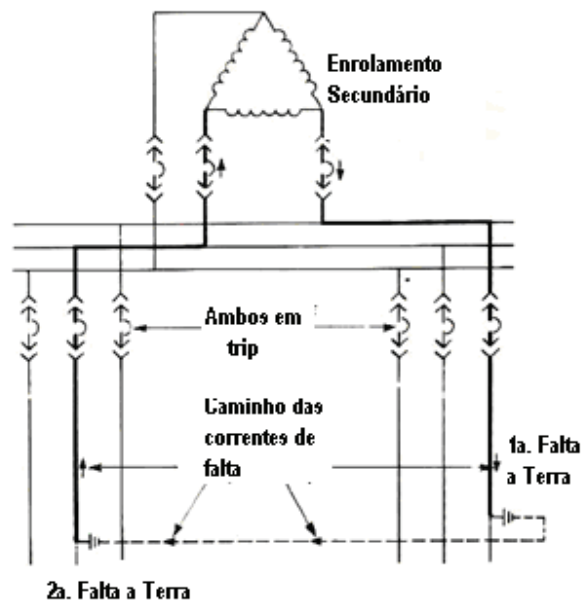


Fig.3.1 – Falta FFT em sistemas isolados [26]

Dessa forma, figura 3.1 ilustra essa condição, após a segunda falta a terra, o dano para equipamentos e componentes é bem maior, pois abrange uma maior parte do sistema com elevadas correntes de falta.

Quando o neutro de um sistema não é aterrado, as sobretensões que surgem entre uma fase e a terra atingem valores de tensão fase-fase. Esta tensão é típica de sistemas não aterrados, onde o neutro, particularmente pode sofrer o chamado "deslocamento de neutro" figura 3.2: quando a tensão de um neutro resulta diferente de zero (potencial normal da terra) diante de uma falta fase-terra.

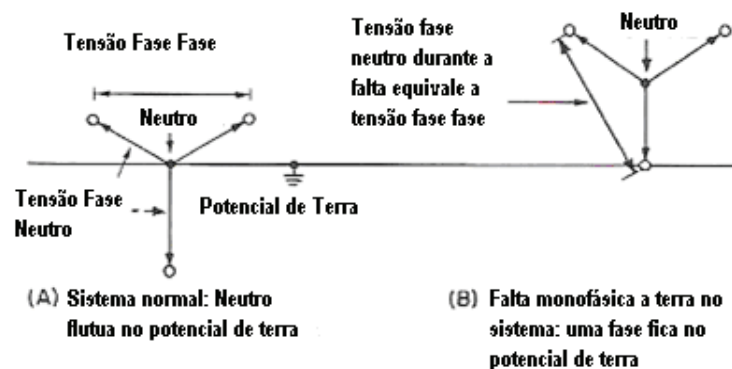


Fig.3.2 – Efeitos de tensões fase-neutro na ocorrência de uma falta FT em um sistema isolado [26]

Tais sobretensões, embora não provoquem prejuízo imediato aos equipamentos submetidos a elas, a constante exposição das isolações a tais sobretensões, por longo tempo, provoca a deterioração precoce do isolamento e gera conseqüente uma redução da vida útil e falha. Portanto, uma falta fase-terra em um circuito, pode resultar em prejuízos a equipamentos e interrupção de serviço em outros circuitos de uma forma mais catastrófica.

A justificativa a favor da aplicação de um sistema não-aterrado é que a primeira falta fase-terra pode ser deixada no sistema até que ela fosse localizada e eliminada, sem interferir na operação dos equipamentos. A experiência mostrou, no entanto, que faltas duplas eram constantes, simplesmente porque a primeira falta era deixada no sistema na expectativa de que o operador fosse localizá-la e removê-la antes da ocorrência de uma segunda falta [28].

Tendo em vista essa experiência com sistemas isolados, que são utilizados apenas em casos específicos, são enfatizados os estudos com os sistemas solidamente aterrados e aterrados por resistência, devido estes serem os tipos de ligação mais utilizados nas indústrias.

A tabela 3.1 mostra um quadro comparativo entre as principais características de aplicação entre os métodos de aterramento existentes.

Tab.3.1 – Comparativo das características de cada tipo de aterramento do neutro [26]

	Isolado	Solidamente Aterrado	Aterrado por Resistência	
			Baixa Resistência	Alta Resistência
Porcentagem do valor da corrente de falta fase-terra em relação a corrente de falta trifásica	Menor que 1%	100% ou maior	20% ou menos 100A a 1000A	Menor que 1% mas não menor que corrente de carga do sistema
Sobretensões transitórias	Muito alto	Não excessivo	Não excessivo	Não excessivo
Considerações gerais	Não recomendado devido a sobretensões e a dificuldade de localização da falta	Geralmente usado em sistemas de até 600V e acima de 15kV	Geralmente usado em sistemas de 2.4kV até 15kV particularmente onde há conexão de máquinas rotativas	Usado em sistemas de baixa tensão 600V onde é desejado a continuidade de operação do sistema

### 3.2.1 – Aterramento industrial versus Aterramento de distribuição

Instalações elétricas industriais e redes de distribuição (ou de transmissão) têm características físicas e operacionais diferentes. Suas práticas de aterramento também são diferentes, embora o princípio básico de aterramento do neutro seja seguido por ambos os sistemas.

A prática do aterramento sólido do neutro é aplicada às redes de distribuição permitindo o uso de pára-raios do tipo neutro aterrado com resultados de maior economia e melhor eficiência da proteção contra descargas atmosféricas.

No caso de sistemas industriais, o aterramento por resistência é mais indicado por garantir menores correntes de falta e conseqüente redução de possíveis danos no ponto da falta e também em outros equipamentos interligados. Isto se torna particularmente importante no caso de falta à terra em enrolamentos de motores por exemplo. Embora uma falta à terra de magnitude e duração limitadas possa causar um dano a ponto de requerer a troca de várias bobinas da máquina afetada, os resultados serão considerados bons se os danos se restringirem às bobinas e não afetarem o pacote de lâminas da máquina.

A tabela 3.2 mostra um quadro comparativo básico entre os itens característicos de sistemas industriais e distribuição, para que seja verificada a conveniência de se adotar o tipo de aterramento correto.

Tab.3.2 – Comparativo de aterramento em sistemas industriais e sistemas de distribuição [26]

	<b>Indústrias</b>	<b>Redes de Distribuição</b>
Exigência de elevada continuidade do serviço	Sim	Sim
Método predominantemente de fornecimento de potência	Cabos isolados	Linhas aéreas
Percentual do sistema exposto a descargas atmosféricas	Baixo	Alto
Investimento em pára-raios	Baixo	Alto
Predominância de sistemas acima de 15kV	Pouco	Muito
Máquinas elétricas conectadas ao sistema	Muitas	Poucas

### 3.3 – Sistemas com Neutro Solidamente Aterrado

Os sistemas elétricos com neutro solidamente aterrados, possuem uma elevada corrente de curto-circuito fase-terra. Tais correntes, quando fluem de uma malha para a terra ou vice-versa, causam diferenciais de tensão entre a malha de terra e o terra infinito, podendo implicar em elevados gradientes nas proximidades dos condutores da malha. Em tal tipo de



instalação, procede-se a construção de uma malha com reticulado para controle de gradientes de forma a se ter garantia de um sistema de aterramento seguro. Como complemento utiliza-se a colocação de brita no pátio da subestação com o objetivo de maximizar os gradientes máximos admissíveis pela elevação da resistividade superficial do solo [29]. Nesse sistema, um afundamento momentâneo de tensão causado por uma falta fase-terra não gera sobretensões nas fases sãs em relação à terra, ou seja, elas permanecem em seu valor nominal. Na figura 3.3 podemos verificar a simulação realizada para esse caso. O valor da impedância da fonte foi calculado considerando a potência de curto-circuito no barramento da subestação em estudo, no valor de 966MVA (69kV):

$$I_{cc} = 8.086 \angle 89,67^\circ \text{ A}$$

$$Z_{eq} = 7,75 \times 10^{-5} \angle -89,67^\circ$$

$$R=0.6 \Omega \text{ e } L=1.297 \text{ e-}2 \text{ H}$$

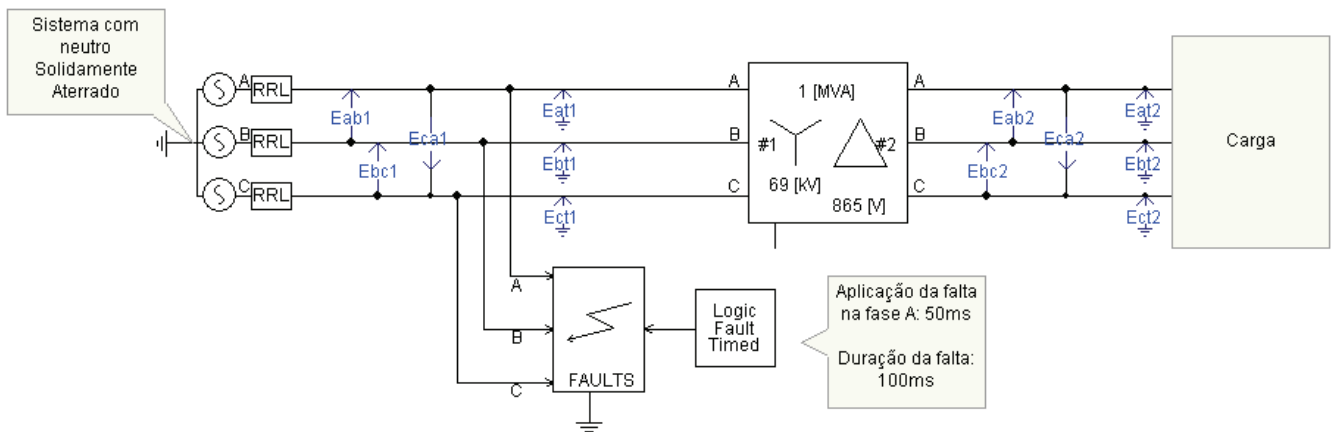


Fig.3.3 – Circuito de simulação sistema solidamente aterrado

As vantagens de se operar uma planta industrial com neutro aterrado em comparação com a operação com sistema isolado são listadas::

- i) Reduz o nível de sobretensões transitórias;
- ii) Melhora a proteção contra descargas atmosféricas;
- iii) Simplifica a localização do ponto de falta;
- iv) Melhora o sistema de proteção do sistema elétrico (coordenação e seletividade).

### 3.3.1 – Falta Fase-Terra - FT

*Caso 1:* aplicação de uma falta à terra monofásica num sistema elétrico solidamente aterrado.

A corrente de falta a terra não é limitada por uma resistência propositalmente inserida, mas apenas através da resistência da falta em que há uma pequena queda de tensão. A tensão na fase sob falta sofre um afundamento significativo e as outras fases permanecem como mesmo módulo de tensão. O gráfico na figura 3.4 mostra o comportamento das tensões fase-terra medidas no primário do transformador.

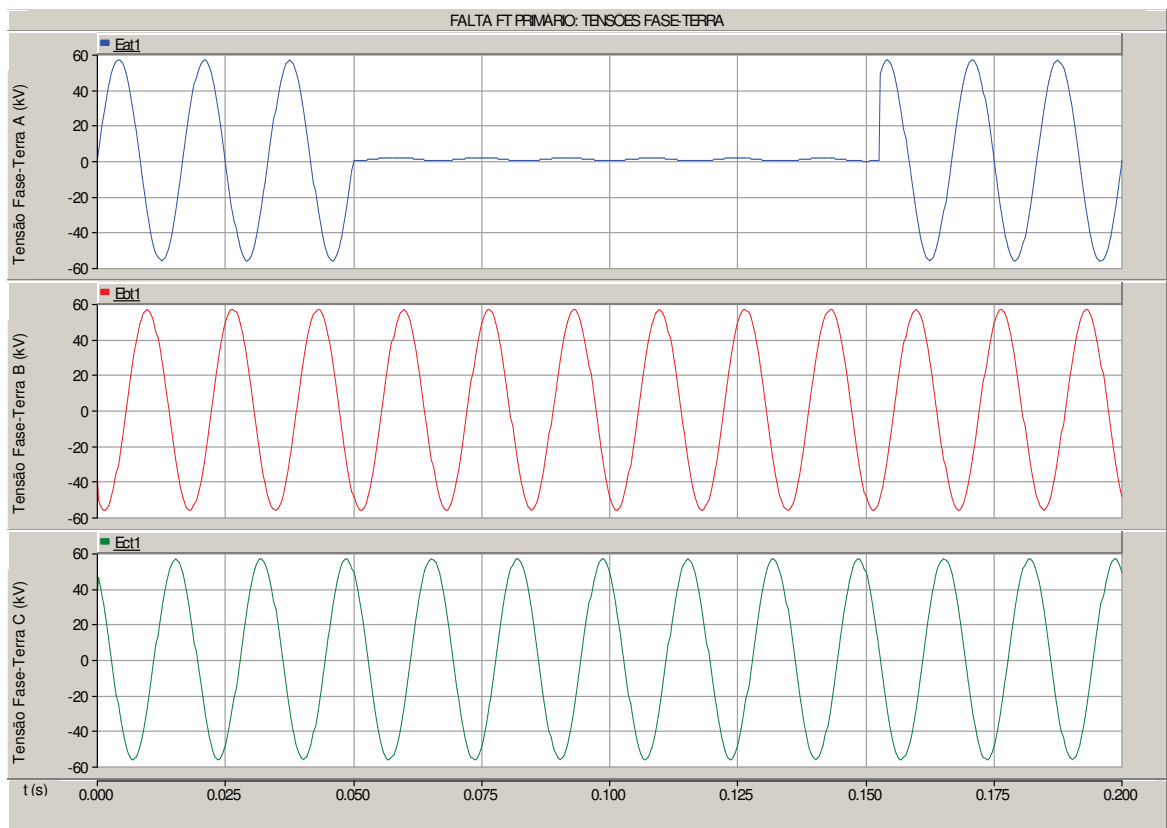


Fig.3.4 – Falta FT: Comportamentos das tensões FT num sistema com neutro solidamente aterrado

A tensão fase-terra da fase A (falta) é submetida a um afundamento de 88%, e as fases são permanecem com módulos idênticos antes e após a falta [30].

A corrente de falta a terra num sistema solidamente aterrado assume valores altos, que são prejudiciais aos equipamentos. A proteção é rapidamente sensibilizada, isolando a parte faltosa do circuito, porém gerando um desgaste devido aos efeitos térmicos e mecânicos da corrente de curto-circuito [31].

Outro dado importante que deve ser observado no comportamento do sistema elétrico durante uma falta a terra monofásica num sistema com neutro solidamente aterrado é em relação às tensões fase-fase do sistema. Na figura 3.5 vemos que as tensões entre fases relacionadas com a tensão da fase A ( $V_{ab}$  e  $V_{ca}$ ) têm um afundamento de aproximadamente 50% de seu valor nominal.

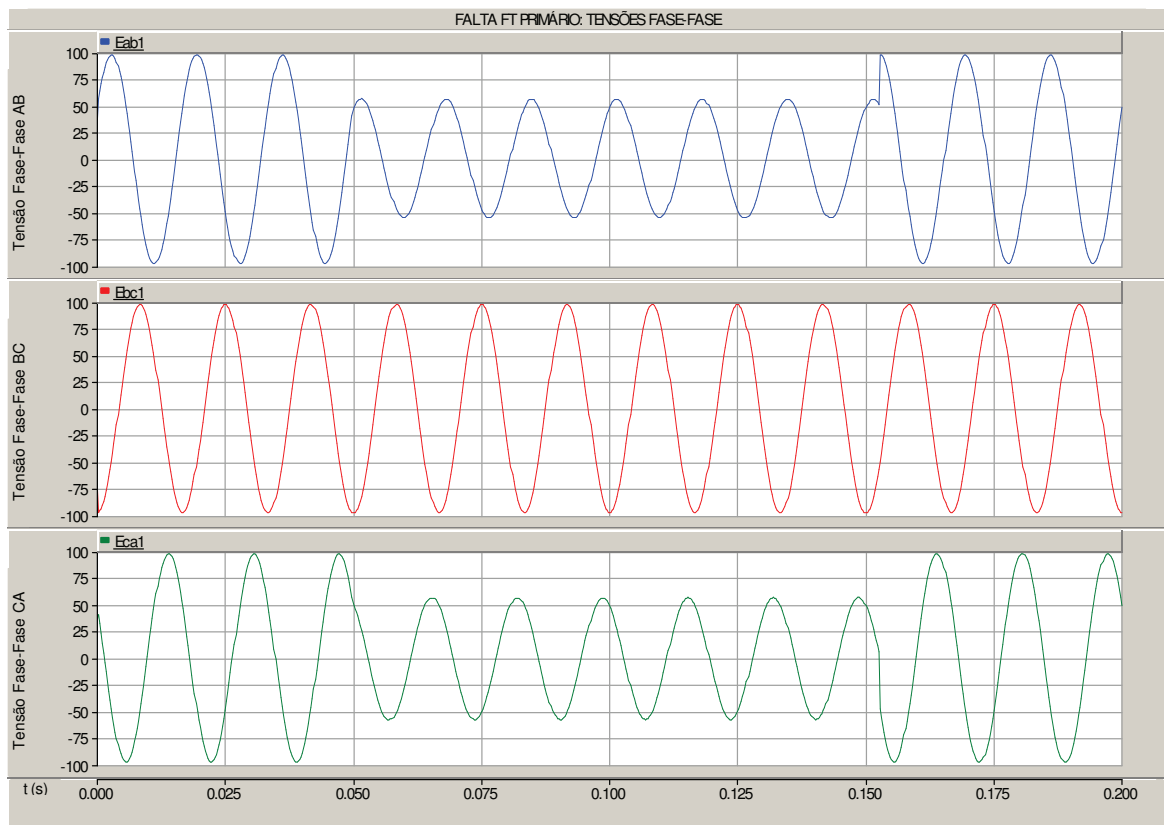


Fig.3.5 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro solidamente aterrado

Em suma, verifica-se que o valor da tensão fase-terra na fase sob falta é próxima de 0,1pu. As tensões fase-fase se alteram para os mesmos valores das tensões fase-terra (pré-falta). O módulo da fase BC não se altera.

Proporcionalmente, as tensões fase-fase no secundário do transformador também se alteram, figura 3.6. Caso há existência de cargas conectadas nesse transformador, que utilizam as tensões fase-fase para operarem, cabe a avaliação da susceptibilidade dessa carga frente aos novos valores de tensão durante a falta.

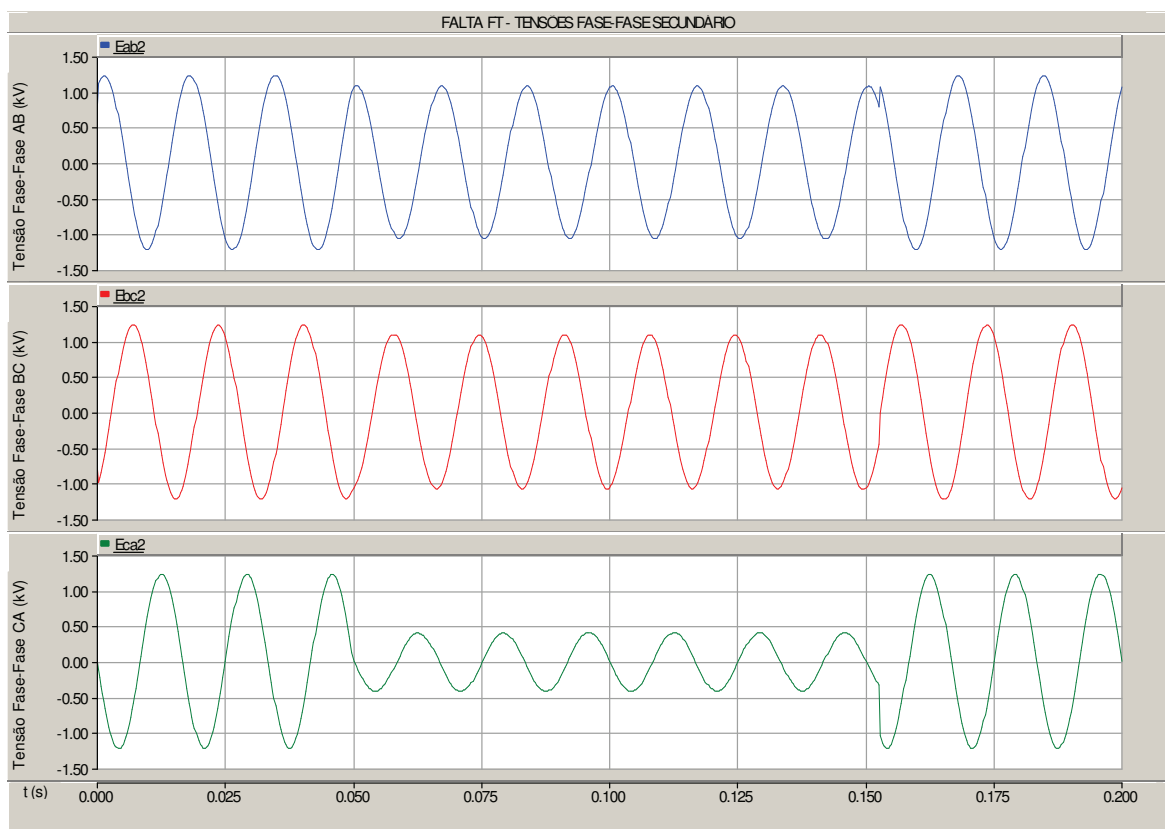


Fig.3.6 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase no secundário do transformador

Analisando os vetores relacionados faltas fase-terra em sistemas com neutro solidamente aterrado, conforme figura 3.7, observa-se o comportamento das tensões fase-terra e fase-fase.

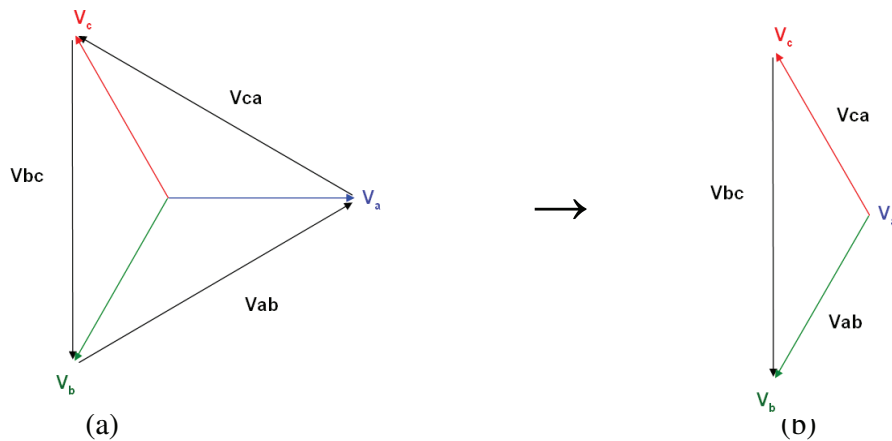


Fig.3.7 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase e fase-terra (a) antes da falta (b) após a falta

### 3.3.1 – Falta Fase-Fase-Terra – FFT

**Caso 2:** Conexão de duas fases à terra simultaneamente num sistema elétrico solidamente aterrado.

Para esse tipo de falta, observa-se um comportamento semelhante ao caso 1. Porém, ocorre afundamento de tensão fase-terra nas duas fases sob falta. Conforme a figura 3.8, pode-se observar que as duas fases em falta têm os módulos das tensões reduzidos, sendo que a fase sã permanece inalterada.

As tensões de fase também sofrem uma alteração significativa, conforme visto na figura 3.9.

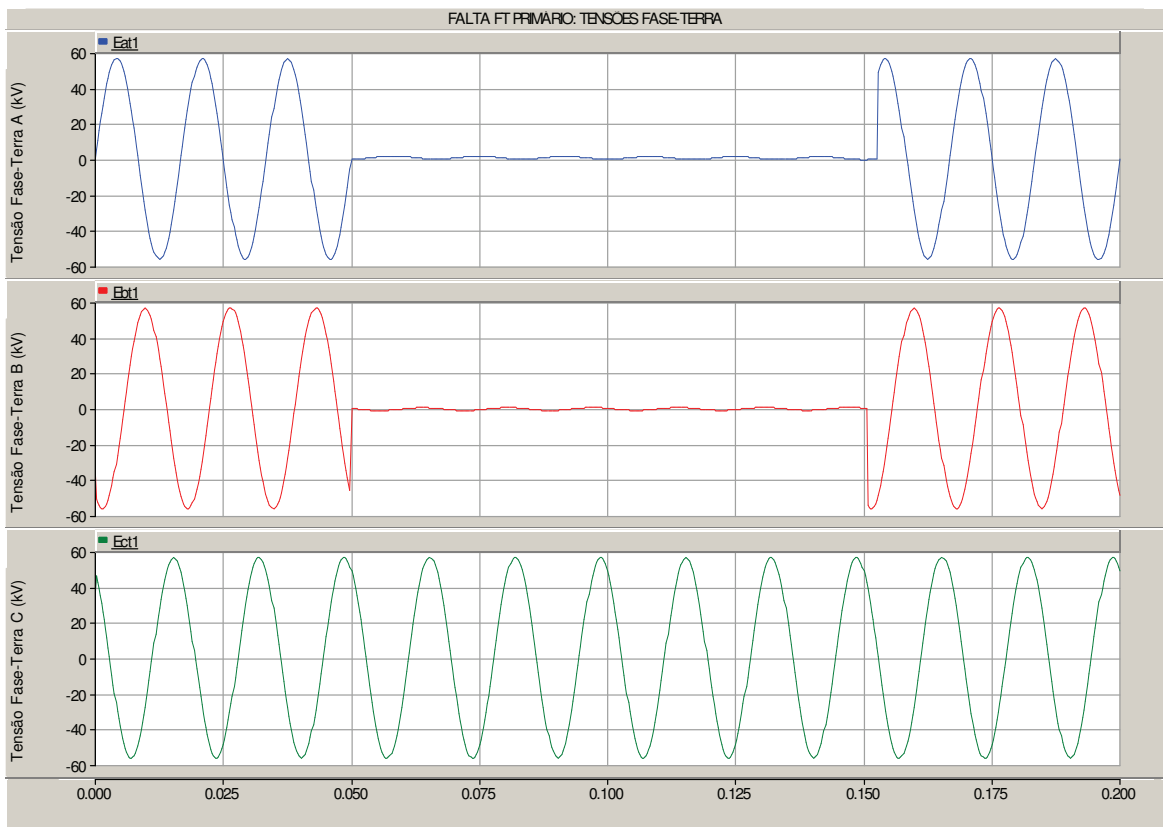


Fig.3.8 – Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-terra num sistema com neutro solidamente aterrado

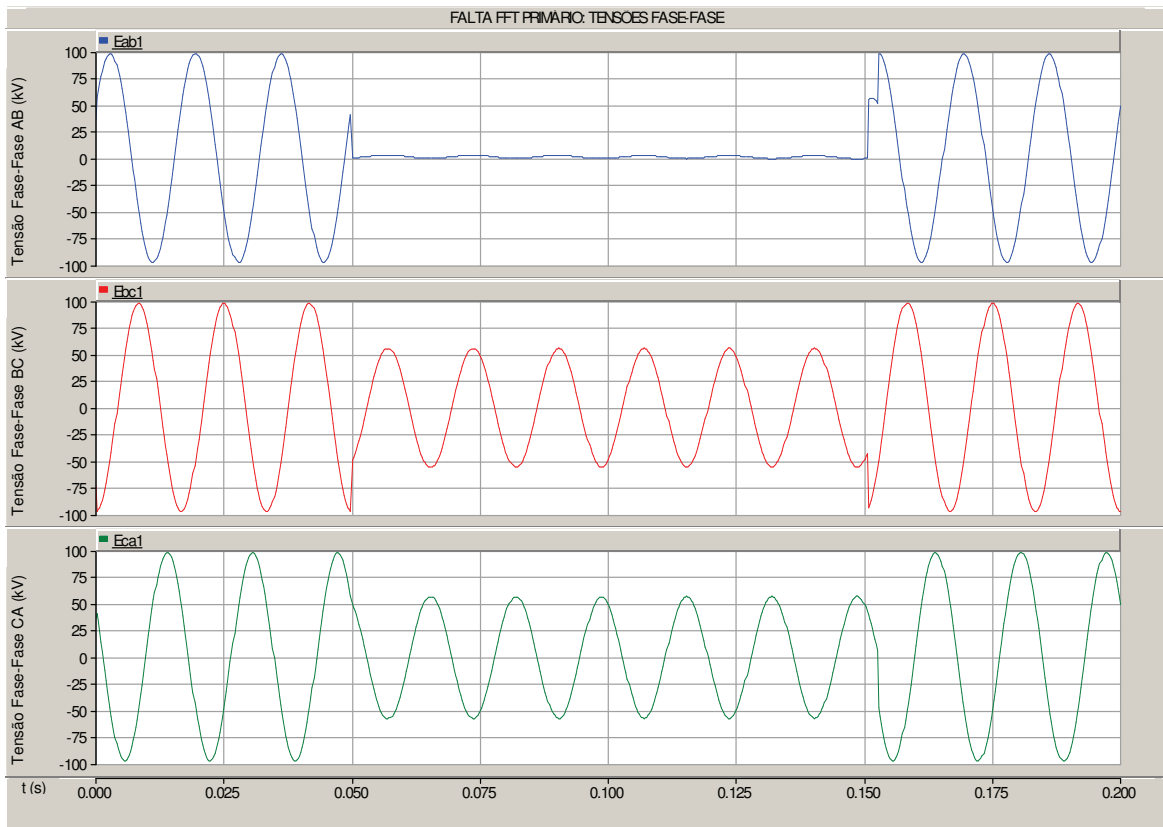


Fig.3.9 - Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro solidamente aterrado

### 3.4 – Sistemas com Neutro aterrado por resistência

O aterramento de neutro de transformadores e geradores por resistência possui os principais objetivos:

i) reduz o valor de corrente de curto-circuito para a terra, protegendo pessoas, equipamentos e instalações. A corrente é limitada pelo valor da resistência.

ii) Níveis menores de tensões residuais aparecem na malha de aterramento da subestação devido a corrente menor, o que reduz consideravelmente a probabilidade de ocorrência de tensão de toque e passo.

Esse tipo de configuração apresenta como característica, a não necessidade de se ter uma malha de aterramento com controle de gradientes. Uma malha de terra construída com cabos dispostos de forma irregular garante um sistema de aterramentos desde que se tenha diferença de potencial entre malha e terra infinito inferior a tensão de toque máxima admissível na ocorrência de falta fase-terra e, além disso, nenhuma transferência proposital de potenciais superiores a tensão de toque máxima admissível de outras áreas para a área sem controle de gradientes em consideração.

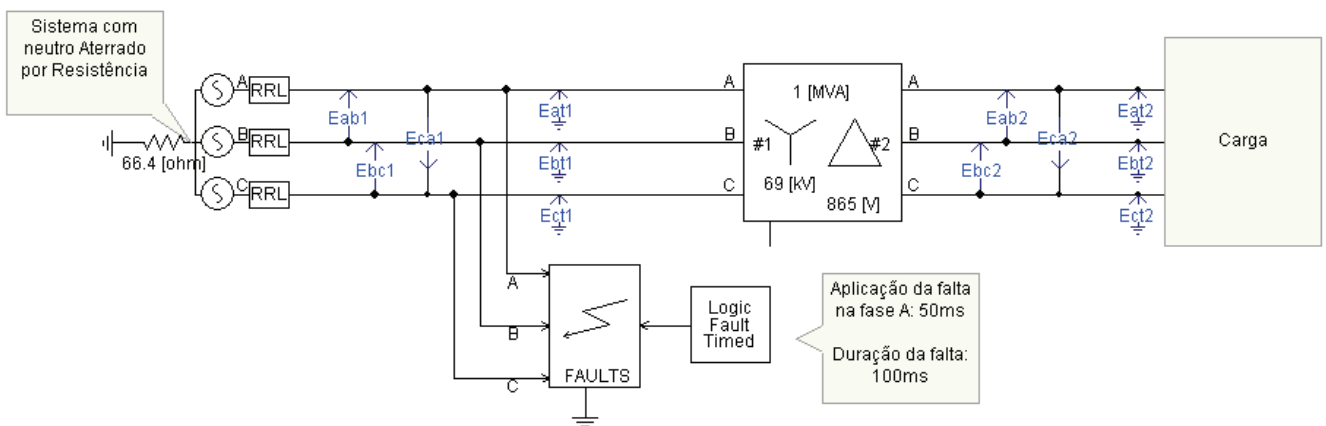


Fig. 3.10 – Sistema aterrado por resistência

O valor da resistência de aterramento do neutro existente é de 66.4 Ω, que limita a corrente de falta a terra em 600A nos níveis de tensão de 4,16kV, 13,8kV e 69kV.

### 3.4.1 – Falta Fase-Terra - FT

**Caso 2:** falta a terra na fase A num sistema elétrico aterrado por resistência.

Utilizando o circuito da figura 3.10, foram simuladas as faltas FT e FFT. As formas de onda das tensões fase-terra para esse caso são mostradas na figura 3.11.

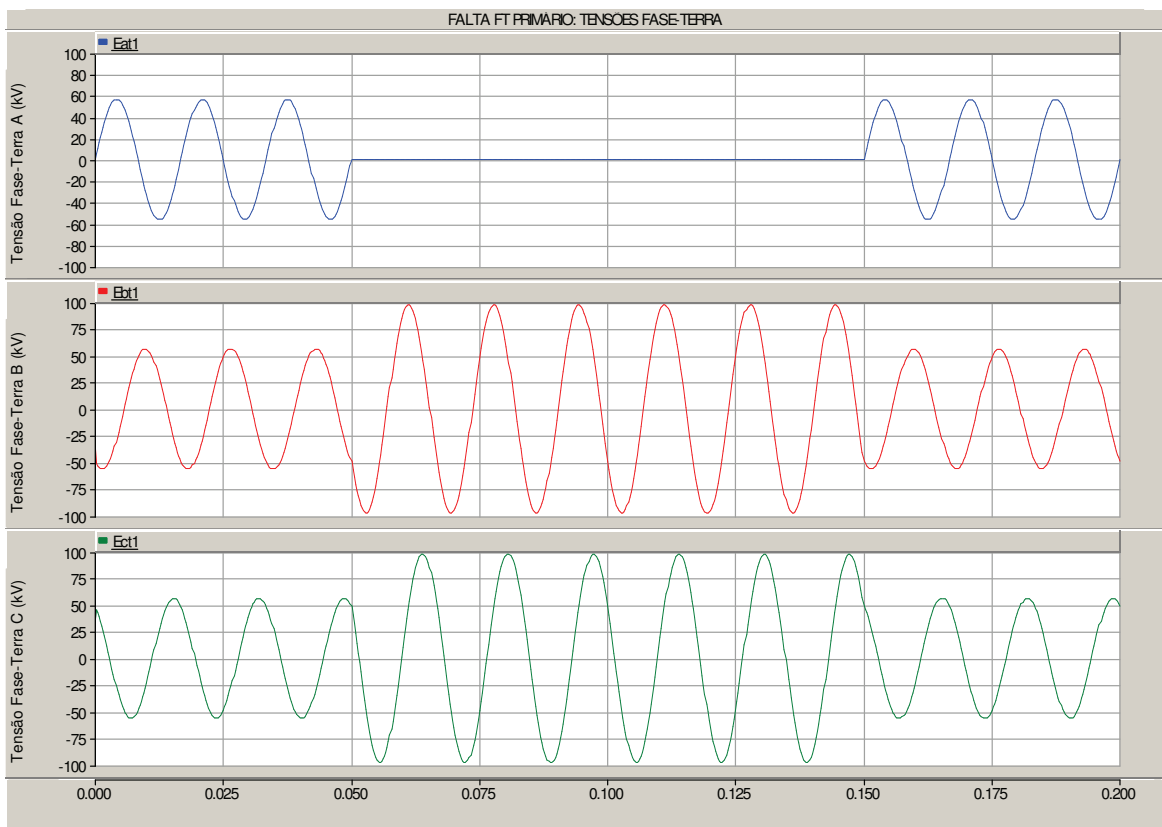


Fig.3.11 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-terra num sistema com neutro aterrado por resistência

A tensão na fase sob falta sofre um afundamento de tensão também de aproximadamente 90%. As tensões nas fases sãs se elevam de aproximadamente  $\sqrt{3}$ .

Nas formas de onda das tensões fase-fase, figura 3.12, não há alteração significativa do módulo ou fase, as tensões permanecem normais. A configuração da ligação do



transformador estrela-delta isolada faz com que não exista alteração significativa dos módulos de tensão também no secundário do transformador. Através dessa análise temos que um equipamento conectado a esse circuito e que seja isolado, pode continuar operando durante uma falta fase-terra no primário. Ou seja, em um sistema elétrico industrial onde a falta fase-terra é o tipo mais comum de distúrbio na qualidade de energia, esse tipo de aterramento de neutro resulta em tensões fase-fase não afetadas durante esse tipo de ocorrência.

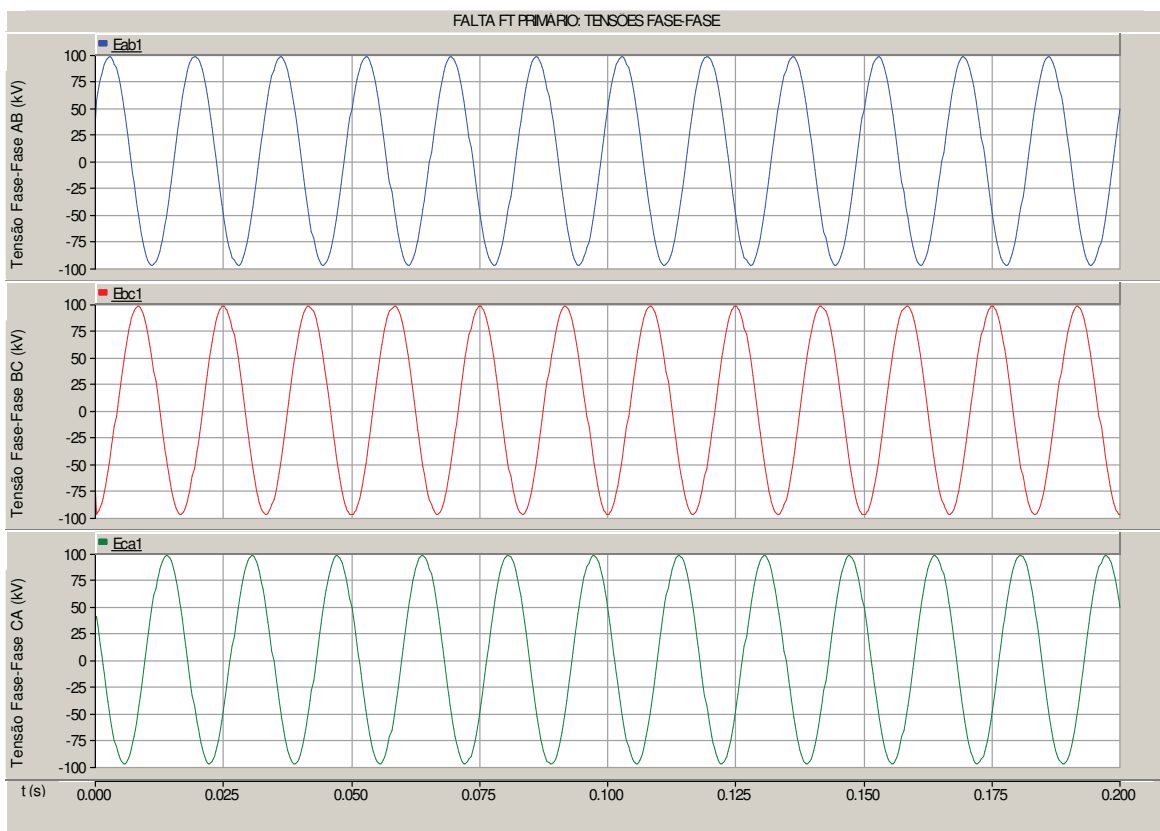


Fig.3.12 – Falta FT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro aterrado por resistência

Comprova-se na figura 3.13. o comportamento das tensões de fase no secundário do transformador.

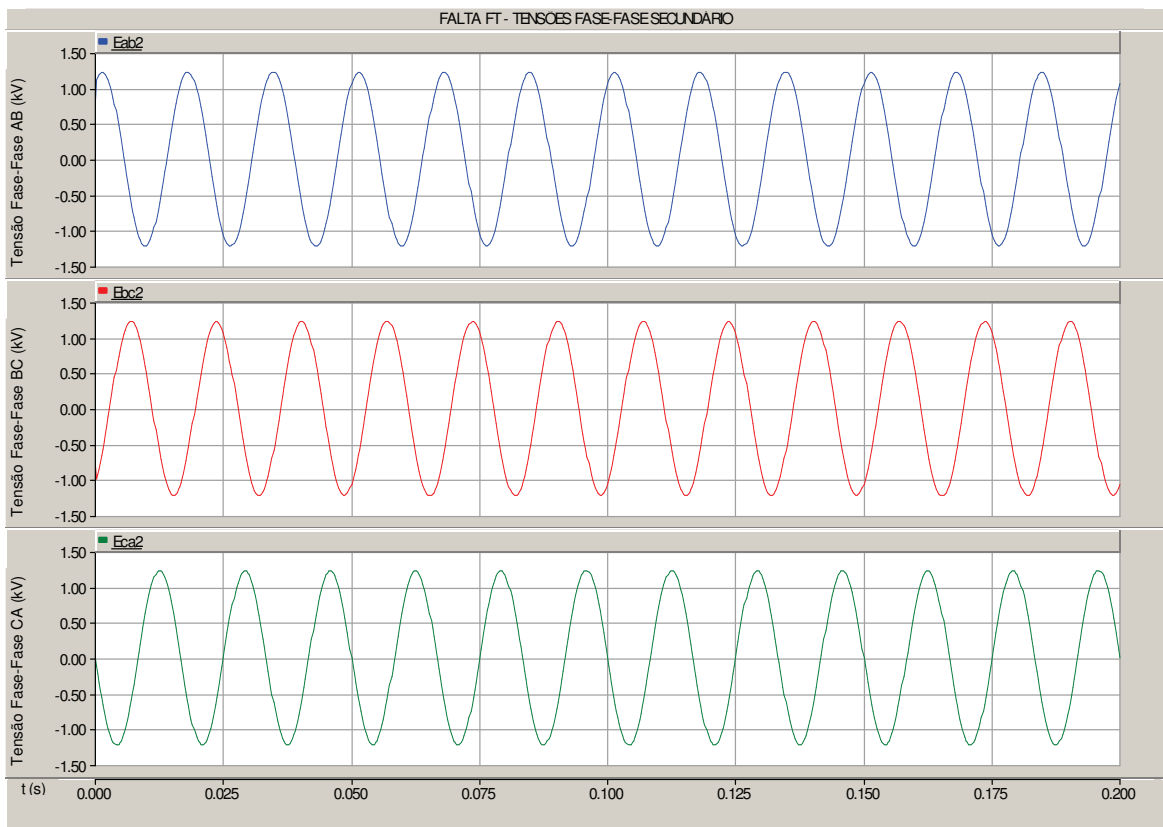


Fig.3.13 – Falta FT: Tensões fase-fase no secundário do transformador

Na figura 3.14 trata-se de uma ocorrência real de uma falta fase-terra no sistema elétrico industrial estudado. A oscilografia foi extraída de um medidor de qualidade de energia representando uma falha de perda de isolamento num pára-raios conectado a um alimentador radial do sistema em anel, o que ocasionou um “*flashover*” na fase B e consequentemente um afundamento de tensão em todo o sistema de 69kV.

O comportamento das tensões durante uma ocorrência de afundamento de tensão causado por uma falta fase-terra pode ser verificado no diagrama vetorial da figura 3.15. As tensões fase-terra se alteram em módulo e ângulo e se tornam idênticas as tensões fase-fase do sistema.

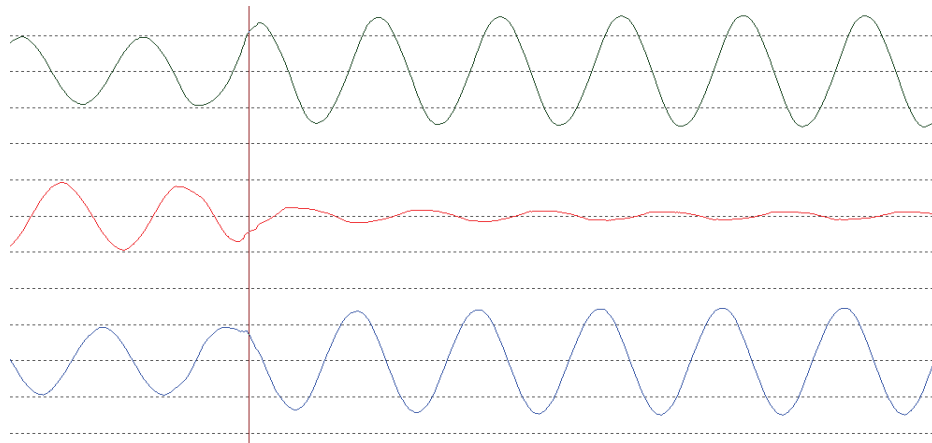


Fig.3.14 – Medição real do comportamento de uma falta fase-terra no 69kV

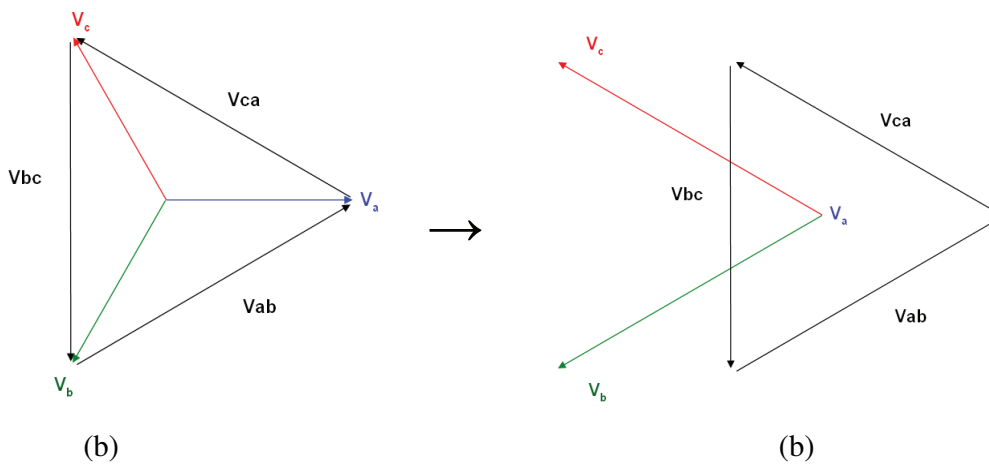


Fig.3.15 – Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-fase e fase-terra (a) antes da falta (b) após a falta

### 3.4.2 – Falta Fase-Fase-Terra - FFT

**Caso 2:** Conexão de duas fases simultaneamente para a terra, considerando o sistema aterrado por resistência.

Observa-se que as tensões fase-terra nas fases sob falta sofrem os afundamentos momentâneos de tensão e que a fase sã permanece inalterada. As tensões de fase também se alteram de forma significativa, conforme pode ser visto nas figuras a seguir.

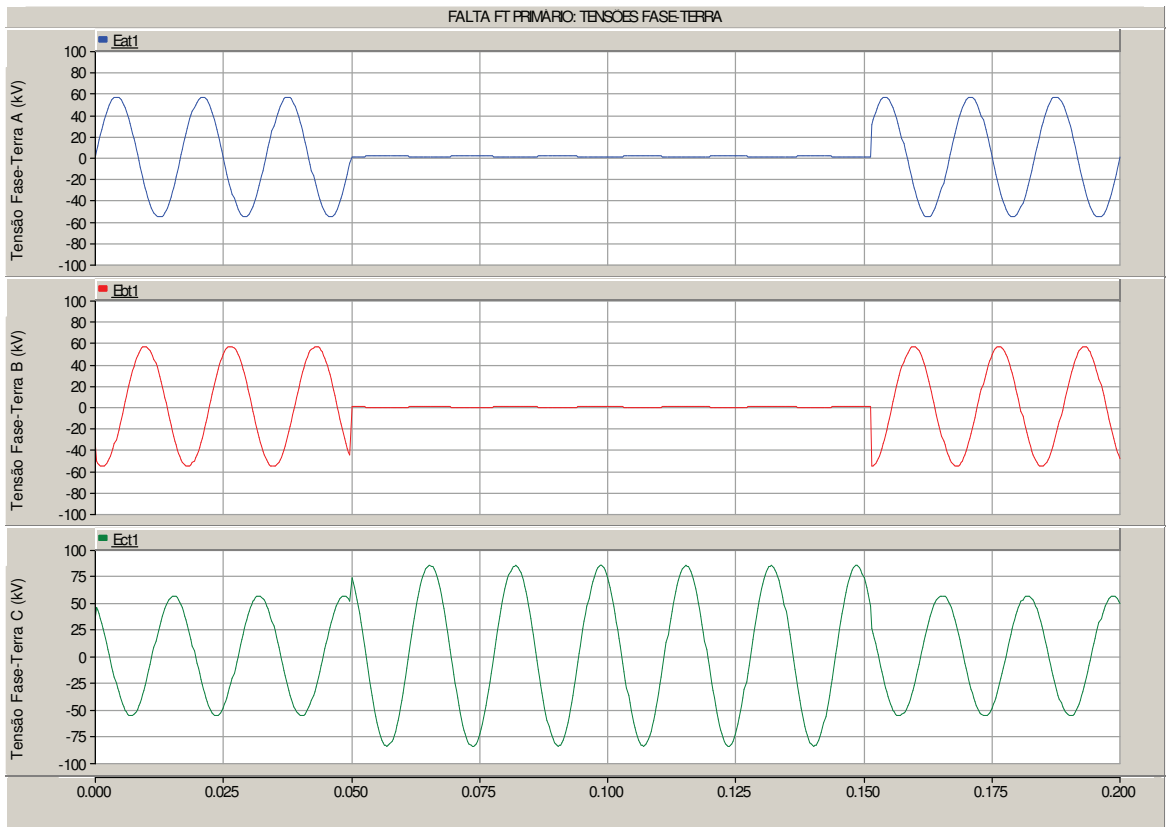


Fig.3.16 – Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-terra num sistema com neutro aterrado por resistência

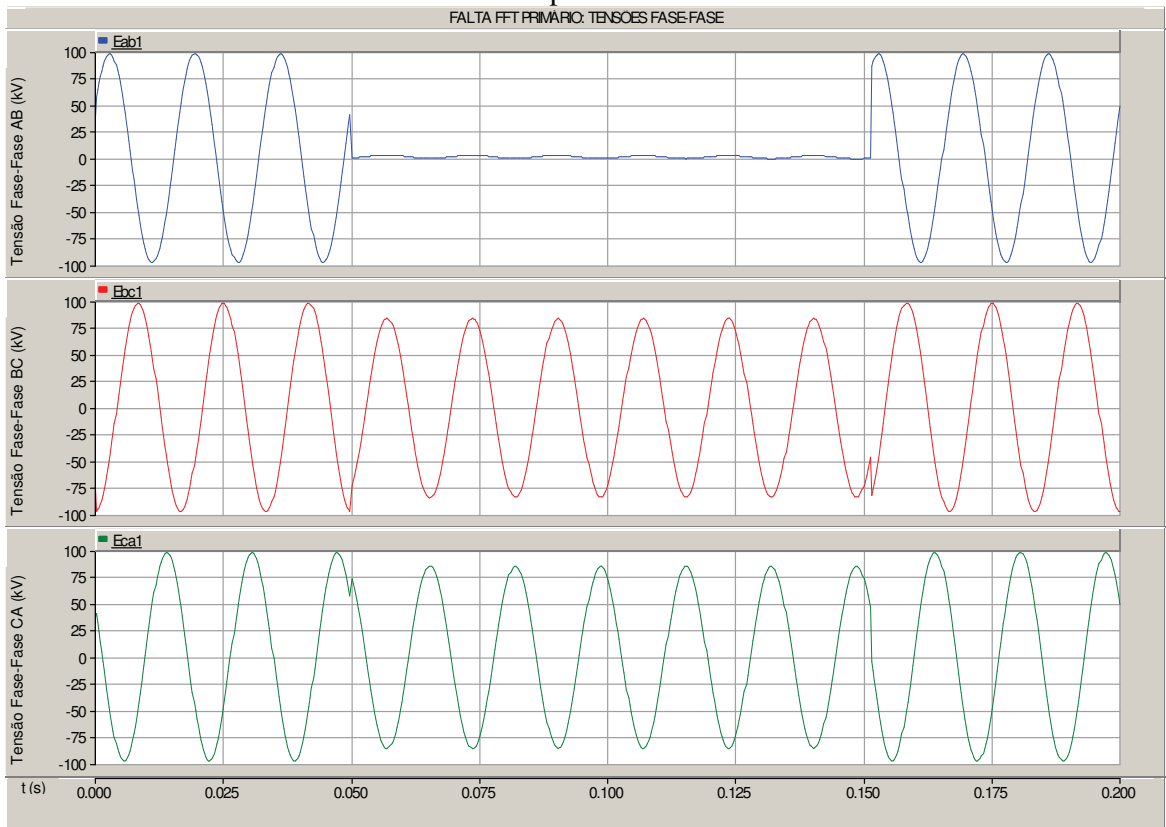


Fig.3.17– Falta FFT: Comportamentos das tensões fase-fase num sistema com neutro aterrado por resistência

### 3.5 – Conclusões

O comportamento das tensões durante o período de uma falta a terra está relacionado com o tipo de conexão do aterramento que é usado no neutro dos transformadores [33]. Por esse motivo é importante conhecer a influência do aterramento no aspecto qualidade de energia, visando à análise do comportamento das tensões sobre esses aspectos a fim de proporcionar uma otimização da filosofia dos projetos de aterramento e proporcionar um melhor funcionamento dos equipamentos conectados ao sistema industrial.

O aterramento possui influência significativa quanto à resposta das tensões do sistema dependendo das características da ocorrência. O tipo de aterramento do sistema pode ser dimensionado de forma a garantir que os equipamentos e processos a eles acoplados operem sem interrupções durante alguns tipos de faltas, e que o mesmo contribua com a qualidade de energia para o sistema [32]. Essa condição é atendida quando o equipamento em foco opera através de um transformador que não tenha conexão a terra (isolado). Foi verificado que o melhor tipo de comportamento das tensões é no caso de um sistema aterrado por resistência desde que a mesma seja dimensionada corretamente de forma a sustentar as tensões de fase durante uma falta fase-terra.

Uma revisão aprofundada nos problemas relacionados ao aterramento de neutros de sistemas elétricos industriais mostrou claramente que é, geralmente, vantajoso aterrar todos os neutros de um sistema de potência, independentemente dos níveis de tensão e dos processos de produção envolvidos. Mas nem sempre o aterramento dos pontos de referência de tensão do sistema representa a melhor opção frente a distúrbios causados por afundamentos de tensão devido às faltas fase-terra.

Conhecendo-se melhor o sistema elétrico industrial, é possível compreender as principais motivações em se usar os tipos de conexões com a terra (e além disso, qual terra usar). Com esse propósito será tratado nos próximos itens as principais características do

---

sistema elétrico de uma planta real existente, tendo como principal objetivo a modelagem do circuito de referência de tensão de sincronismo para a ponte retificadora do acionamento do motor de corrente contínua. A partir dessa modelagem, realizar simulações de alternativas para a conexão do ponto neutro do circuito de referência de tensão de sincronismo.

## Capítulo 4

# Influência da Configuração do Sistema Elétrico na Susceptibilidade dos AMT's

## 4.1 – Introdução

O tipo de aterramento do neutro exerce uma influência no desempenho dos sistemas elétricos industriais. O aterramento dos sistemas contribui de forma positiva ou negativa nas interrupções causadas pelos afundamentos momentâneos de tensão, pois determinam diversos aspectos em relação a esses tipos de distúrbios. Conforme visto no capítulo 3, o aterramento está diretamente ligado ao valor de tensão que é fornecido às cargas, durante a ocorrência de um afundamento de tensão devido a uma falta fase-terra. É possível evitar interrupções provenientes de afundamentos de tensão que ocorrem durante faltas fase-terra no sistema elétrico industrial, limitando a corrente de falta através de resistor de aterramento, desde que as cargas estejam sendo alimentadas por um transformador isolado (sem conexão à terra). Um sistema elétrico industrial que possui neutro aterrado por resistência, mantém as tensões entre

fase praticamente inalteradas em relação ao módulo durante uma falta fase-terra, desde que essa resistência esteja corretamente dimensionada. Nesse caso, a variação de tensão que ocorre entre fase e terra não afeta aos usuários, pois vários equipamentos trabalham apenas com tensões entre fases.

Nos itens descritos a seguir são discutidos os aspectos mais relevantes nas características do sistema elétrico industrial em estudo. A configuração do circuito elétrico do laminador, suas principais funções são descritas. São realizados estudos de harmônicas, e de faltas fase-terra. A partir das análises dos resultados desses estudos, é verificado o comportamento do acionamento do motor CC do laminador frente a esse distúrbio. Algumas considerações a respeito do tipo de conexão do neutro do circuito de referência de tensão de gatilho para os tiristores também é mostradas com o intuito de comparar seu funcionamento considerando dois tipos de conexões à terra.

## 4.2 – Sistemas Elétricos Industriais

Os sistemas elétricos industriais de um modo geral se caracterizam por:

- Uma ou mais subestações de recebimento de energia elétrica, onde se tem elevados níveis de curto circuito fase-terra, devido a característica de configuração com neutro solidamente aterrado das concessionárias de energia elétrica no Brasil;
- Diversas subestações abaixadoras de tensão na área industrial para alimentação de cada processo industrial, onde é recomendado, a princípio apenas por questões de segurança, limitar as correntes de curto circuito fase-terra através da aplicação de resistores de aterramento;
- Sistema de distribuição de energia elétrica aérea ou subterrânea para conexão entre as subestações de recebimento e as subestações da área industrial;



- Sistema de geração interna para aumento da confiabilidade e/ou aproveitamento dos gases do processo industrial, onde se deve por questões de segurança, também adotar a técnica de limitação dos níveis de curto circuito fase-terra.

Geralmente, sistemas elétricos industriais possuem níveis de curto circuito fase-terra elevados nas subestações de recebimento e por outro lado limitado na área industrial [26]. Essa característica demanda aterramento com controle de gradientes na subestação de recebimento, devido o alto valor de corrente de curto-circuito para terra, e malha de aterramento sem controle de gradientes nas áreas industriais, pela limitação da corrente de falta fase-terra.

Conhecendo o sistema elétrico industrial, é válido explorar detalhes de um equipamento/processo, para que ações possam ser tomadas em relação ao seu comportamento frente a afundamentos de tensão causados por falhas fase-terra. De uma forma geral, existem vários estudos que mostram como alguns equipamentos na indústria se comportam frente a afundamentos de tensão e sugerem soluções alternativas como a instalação de no-breaks para estabilização da tensão, inversores, circuitos retificadores CC [34], [35]. [36], [37].

### **4.3 – Circuito Elétrico do Laminador**

Em um processo siderúrgico, a laminação é responsável por deformar mecanicamente o lingote, bloco ou chapa de metal, a fim de criar produtos utilizados pela indústria de transformação, como chapas grossas e finas, bobinas, vergalhões, arames, perfilados, barras etc. Basicamente, todo laminador possui uma cadeira de laminação, constituída por cilindros, mancais e um sistema de regulação para aumentar ou diminuir as distâncias entre os cilindros (dependente do tipo de material a ser laminado). A movimentação dos cilindros que pode ser

vista na figura 4.1, é feita por um sistema de motor e redutor. Na planta de laminação existente, o acionamento dos cilindros é feito por um motor de corrente contínua com excitação independente. O processo de laminação necessita de constante controle de velocidade e conjugado, inclusive inversão de rotação, com freqüentes partidas e paradas [38]. Esse controle é feito por um retificador tiristorizado de doze pulsos alimentado por um transformador de três enrolamentos.

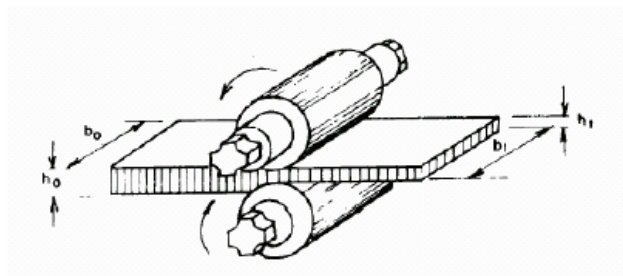


Fig. 4.1 – Esquema básico de laminação[39]

O circuito elétrico do laminador é constituído basicamente de uma fonte de potência em 69kV, um transformador de três enrolamentos (Y-Y-D), duas pontes retificadoras de 6 pulsos e um motor de corrente contínua. Além desses componentes, existe também o circuito de referência de tensão para a geração dos pulsos para o gatilho dos tiristores das pontes retificadoras, que consiste em três transformadores de potencial com seus respectivos primários conectados ao sistema de potência em 69kV e os secundários em 115V, ambos conectados em estrela aterrada (na malha industrial). A tensão de referência é a queda de tensão em um dos resistores do divisor de tensão, cujo detalhamento será visto a frente.

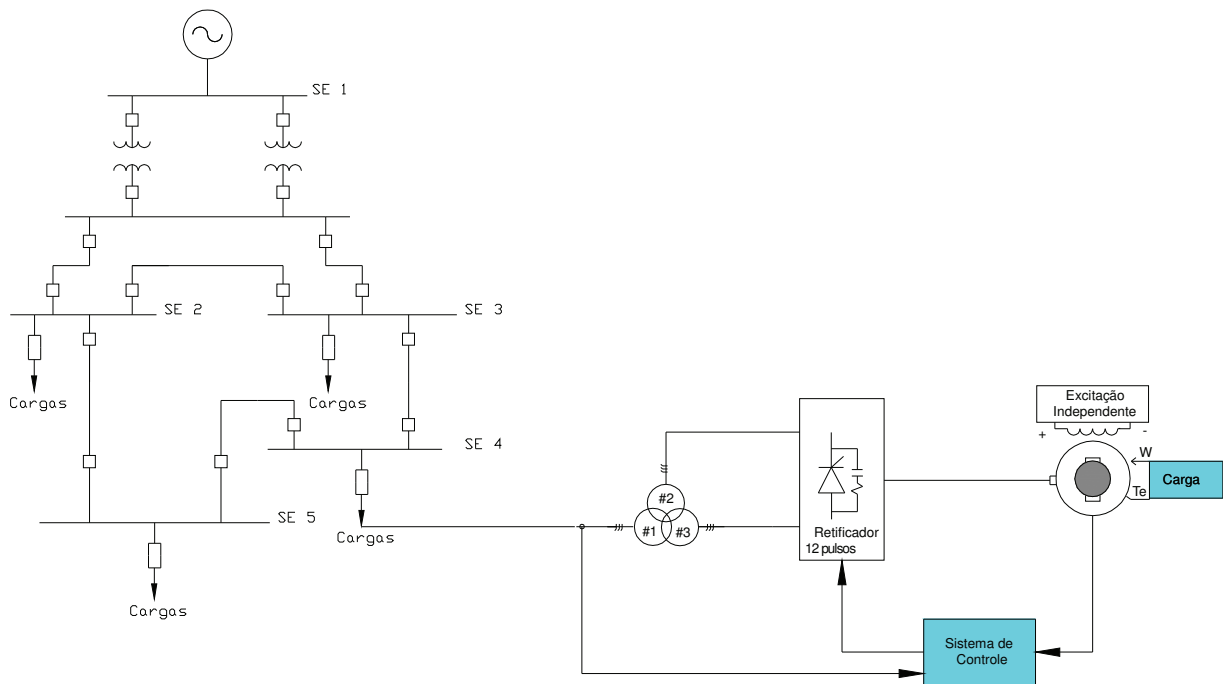


Fig. 4.2 – Diagrama elétrico do laminador conectado ao sistema

Conforme a figura 4.2 nota-se que o circuito do laminador é uma carga na barra de uma subestação, operando com o primário do transformador em 69kV interligado com várias subestações na planta industrial.

Devido a característica do sistema elétrico, quando há uma ocorrência de falta fase-terra em qualquer outro ponto do sistema elétrico em 69kV, todas as subestações estarão sujeitas ao mesmo tipo de afundamento de tensão.

#### 4.2.1 – Modelagem

Os dados para todos os equipamentos do circuito de simulação foram obtidos em campo, no sistema elétrico de uma usina siderúrgica. O equivalente da fonte considerado é de um sistema elétrico do tipo complexo [39]. Os elementos de rede são conhecidos no ponto em

estudo ( $R_{eq}$  e  $X_{eq}$ ) e a corrente de curto-circuito equivalente pode ser obtida através da inversão do módulo da impedância em pu.

A potencia de curto-circuito trifásica no barramento da subestação em estudo é de 966MVA (69kV):  $I_{cc} = 12.900 \angle 89,67^\circ \text{ A}$

$$Z_{eq+} = 7,75 \times 10^{-5} \angle -89,67^\circ$$

$$R_+ = 1.3 \times 10^{-5} \Omega \text{ e } L_+ = 1.06 \times 10^{-4} \text{ H}$$

O software PSCAD é utilizado nas simulações, onde, baseado nos modelos existentes no software, foram inseridos todos os dados do sistema elétrico.

A metodologia de aplicação das faltas foi através da utilização de um temporizador lógico chamado *Logic Fault Timed* no qual foi setado que a fase A deve ser conectada a terra em certo instante de tempo (para cada tipo de simulação foi considerado um valor diferente de tempo).

O circuito elétrico do laminador consiste basicamente em uma fonte de energia, um circuito de referência de tensão de sincronismo para os conversores CA-CC (também chamado referência de *gate*), um transformador trifásico de três enrolamentos e um retificador de 12 pulsos conectado a um motor de corrente contínua.

A tensão de referência de sincronismo, ou a tensão de referência para o controle de *gate*, possibilita a criação dos pulsos para os tiristores da ponte retificadora. Através de realimentações de medições de velocidade e sentido de rotação, o sistema de controle atua nos ângulos de disparo dos tiristores, a fim de regular a tensão de armadura na máquina e manter o motor na velocidade de referência. Na figura 4.3 pode ser visto o circuito de referência de tensão utilizado atualmente.

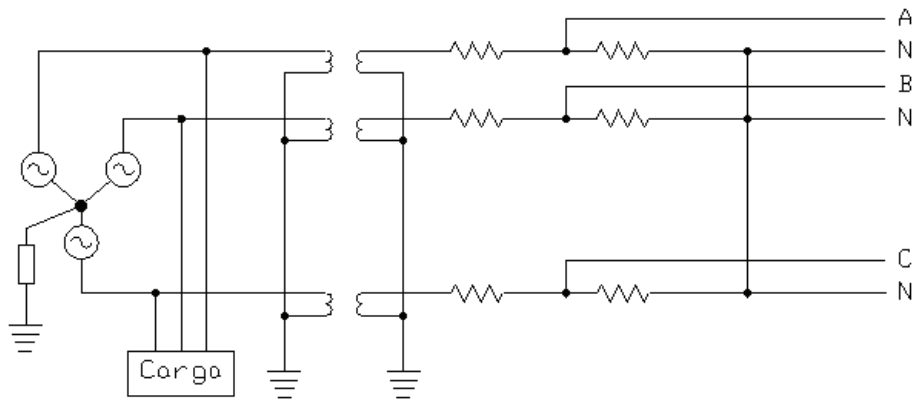


Fig. 4.3 – Circuito de referência da tensão de *gate*

Através de um divisor de tensão resistivo, as tensões de referência na entrada das placas de controle possuem uma fase e um neutro. Um circuito simplificado pode ser visto na figura 4.4.

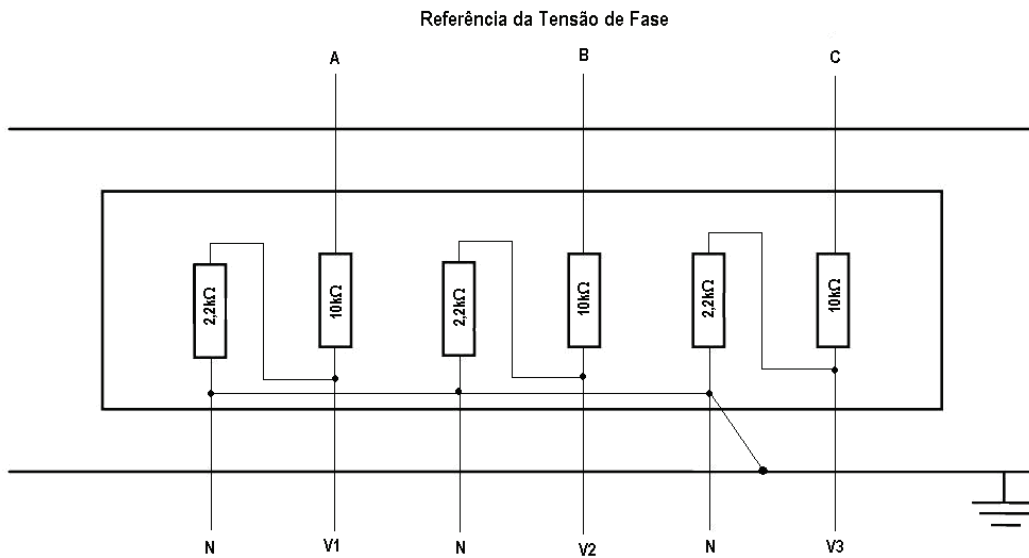


Fig. 4.4 – Placa do divisor de tensão

Esse fechamento de ponto neutro do circuito de referência é conectado ao mesmo ponto da malha de terra industrial. Esse circuito será analisado com maiores detalhes adiante.

Os dados utilizados do transformador podem ser vistos na tabela 4.1. Trata-se de um transformador trifásico de três enrolamentos conectados em estrela-delta-estrela. Nenhum neutro (nem primário ou secundário) das estrelas é aterrado.

Tab.4.1 – Dados do Transformador de Potência Trifásico Três Enrolamentos

	<b>Primário</b>	<b>Secundário</b>	<b>Terciário</b>
<b>Potência (MVA)</b>	9,25	4,625	4,625
<b>Tensão (kV)</b>	69	0,467	0,472
<b>Ligação</b>	Y	Y	$\Delta$
<b>Impedância (%)</b>	$Z_{12} = 8,17$	$Z_{123} = 6,83$	$Z_{13} = 7,67$

O defasamento angular das conexões é da ligação Yyd1, ou seja  $30^\circ$ . Os dados usados nas simulações do motor de corrente contínua estão descritos na tabela 4.2.

Tab.4.2 – Dados do Motor do Laminador

<b>Motor CC</b>	
Potência Nominal (kW)	5.800
Rotação nominal (rpm)	150
Tensão de Armadura (V)	900
Corrente nominal (A)	6.970
Resistência de Armadura (m $\Omega$ )	4,91
Indutância de Armadura (mH)	0,39
Momento de Inércia (kg.m <sup>2</sup> )	49.500
Ip / In	2,25
Tempo de Partida (segundos)	10

Com todos esses dados foi simulado o circuito do laminador conforme pode ser visto na figura 4.5.

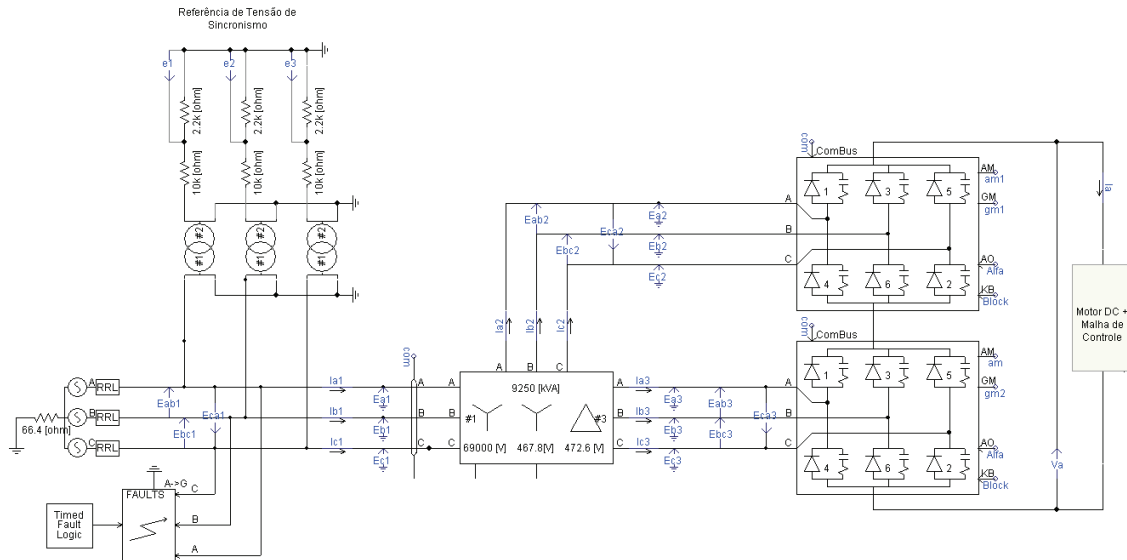


Fig. 4.5 – Diagrama esquemático utilizado na simulação

Para simular a dinâmica do motor CC foram consideradas suas equações dinâmicas com os parâmetros nominais da máquina. O sistema de controle está representado com os parâmetros levantados em campo.

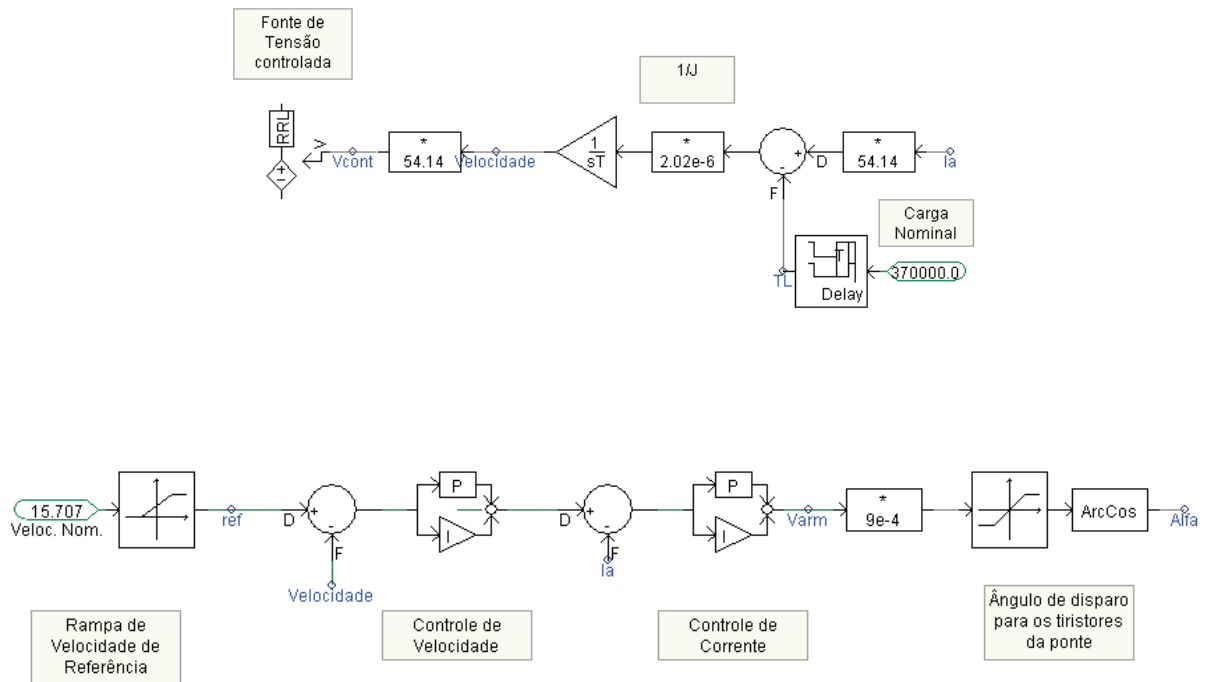


Fig. 4.6 – Diagramas da dinâmica do motor CC e malhas de controle

O ângulo de disparo dos tiristores das pontes foi calculado em função da tensão média de saída da ponte de 12 pulsos.

#### 4.2.2 – Estudos de Correntes Harmônicas

A corrente solicitada por cargas não lineares, são constituídas principalmente de harmônicos de ordem ímpar em relação à frequência fundamental [44].

Apenas a presença de harmônicas numa instalação não representa o problema, mas sim sua interação com o sistema de distribuição. Quando a distorção na tensão alcança um nível elevado, podem ocorrer vários tipos de problemas com equipamentos eletrônicos. Se os picos de tensão são suprimidos, as fontes de tensão podem não acumular a energia suficiente para suprir *sags* momentâneos. Se os picos de tensão são amplificados, detectores de sobretensão podem atuar desligando a carga. As correntes harmônicas geradas pelos conversores CA-CC



fluem do mesmo para o sistema de potência [45]. Em equipamentos elétricos esses problemas estão resumidos em: aquecimento e vibração excessivos em motores, aquecimento e ruídos excessivos em transformadores, nível de tensão elevado entre neutro e terra e campos magnéticos significativos na vizinhança de transformadores, disjuntores, relés de proteção, chaves seccionadoras, medidores, etc.

Em sistemas conversores CA-CC que alimentam motores de corrente contínua, as correntes harmônicas injetadas no sistema são minimizadas através de aplicação de diferentes conexões em transformadores.

A DHT (Distorção Harmônica Total) é a medida em percentual que uma forma de onda pode se afastar em relação à forma puramente senoidal.

Os acionamentos em corrente contínua usam conversores tiristorizados para controlar a tensão nos terminais do motor ou o conjugado para manter a velocidade desejada. A desvantagem dessa configuração é a injeção de corrente harmônica no sistema CA. A redução do espectro de harmônicas em ordem e amplitude pode ser significativa através da utilização da configuração do sistema elétrico, tanto em relação ao conversor (número de pulsos), como nas conexões dos transformadores de potência.

As figuras a seguir mostram duas situações em que a configuração dos retificadores interfere no valor dos espectros de correntes harmônicas e na distorção harmônica total tanto no primário quanto no secundário do transformador. Inicialmente é mostrado um retificador 6 pulsos e em seguida, 12 pulsos e a diferença entre eles.

A seguir serão apresentadas as influências dos circuitos de 6 e 12 pulsos na qualidade de energia.

Caso 1: Retificador de 6 pulsos

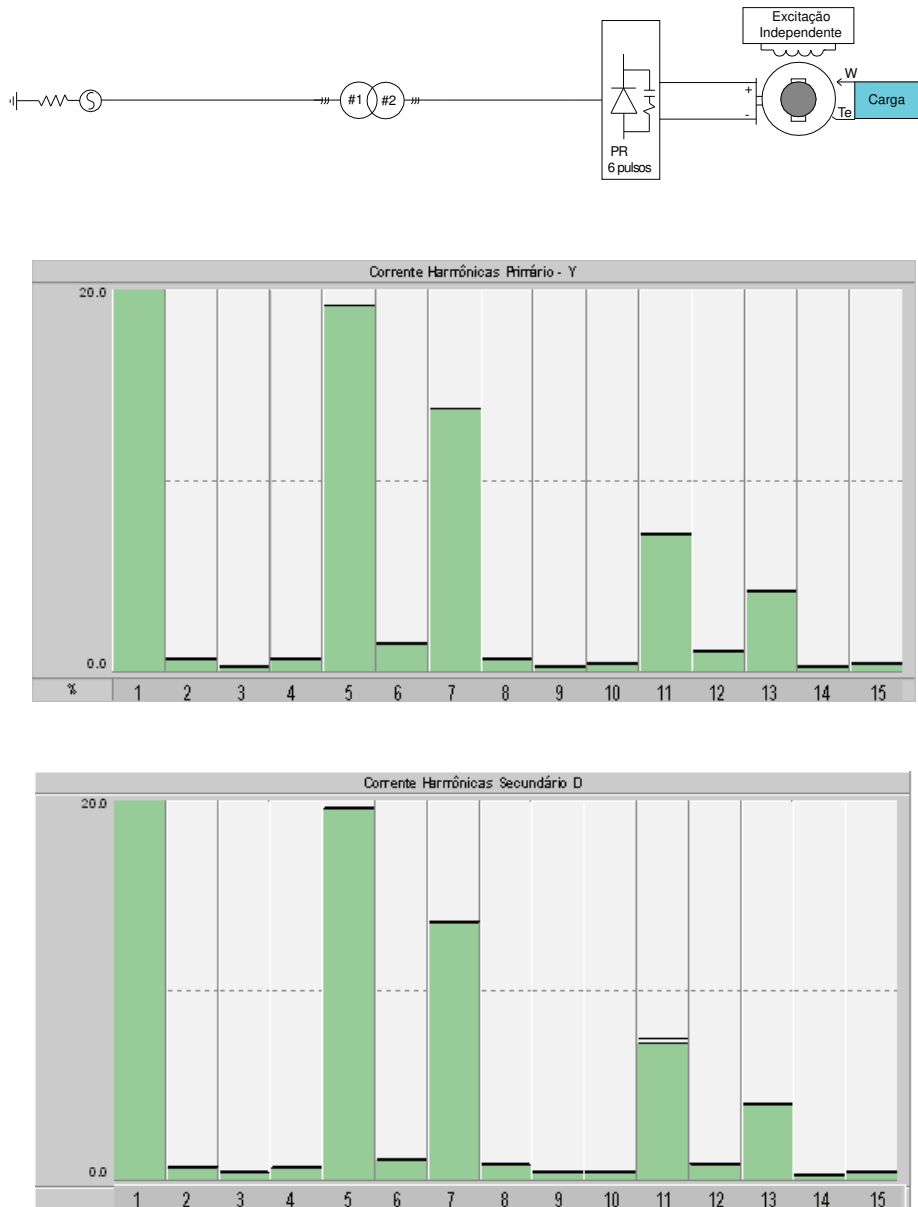


Fig. 4.7 - Caso 1: Percentual de correntes harmônicas injetadas por um retificador 6 pulsos

Realizando um comparativo entre o percentual de harmônicas presente nas formas de onda de corrente tanto no primário quanto no secundário do transformador, considerando um

retificador de 6 pulsos, observa-se que o nível de distorção nesses dois enrolamentos é praticamente o mesmo. Os resultados dessas simulações podem ser vistos na figura 4.8.

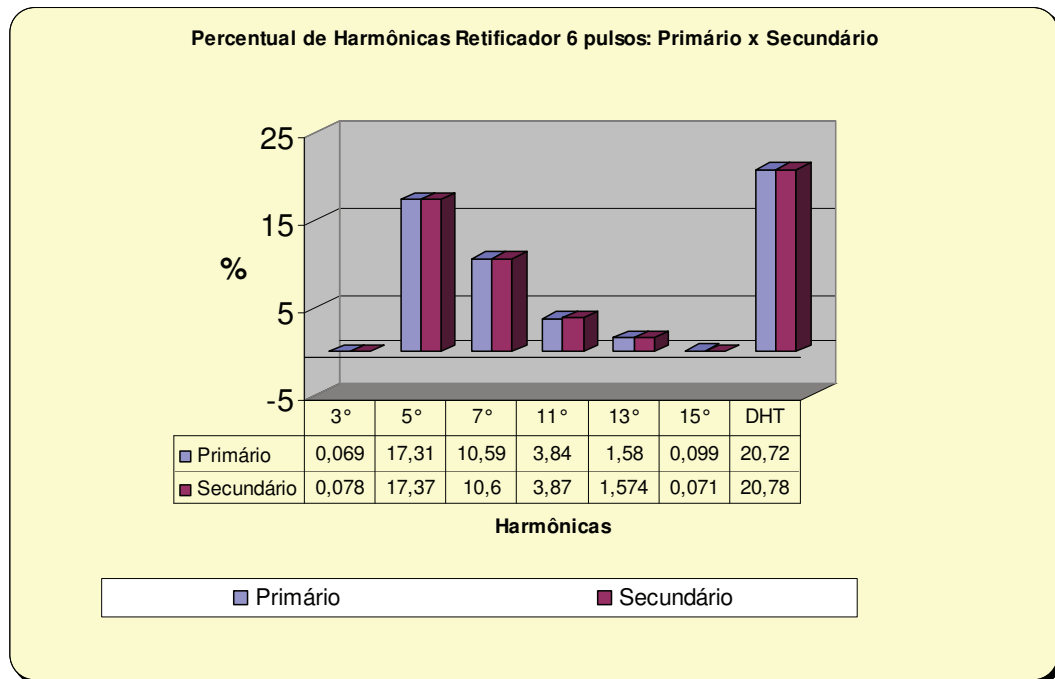


Fig. 4.8– Comparação espectro de correntes harmônicas e DHT das correntes no primário x secundário PR 6 pulsos

Através dos valores da simulação das correntes harmônicas é possível verificar que a ponte retificadora injeta no secundário do transformador um percentual elevado em comparação ao primário.

Dessa forma, o circuito de referência de tensão deve ser conectado através de transformadores de potencial no primário do transformador de potência para evitar interferências das distorções harmônicas.

Caso 2: Retificador de 12 pulsos

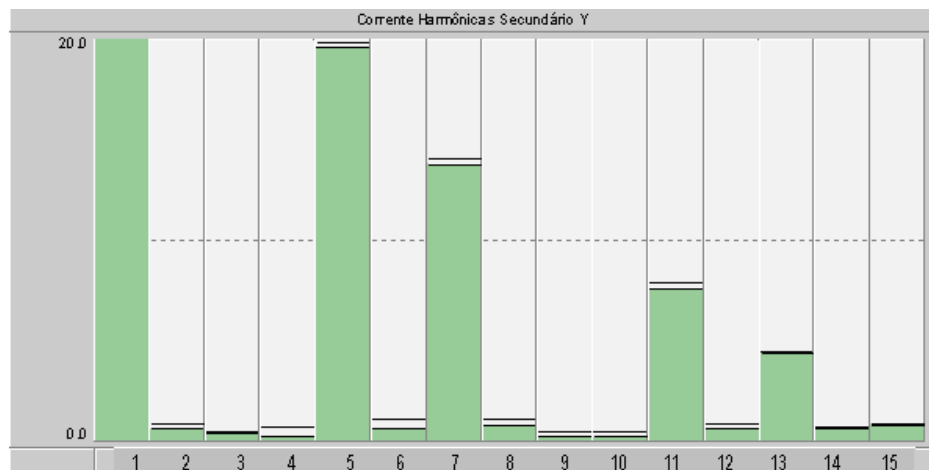
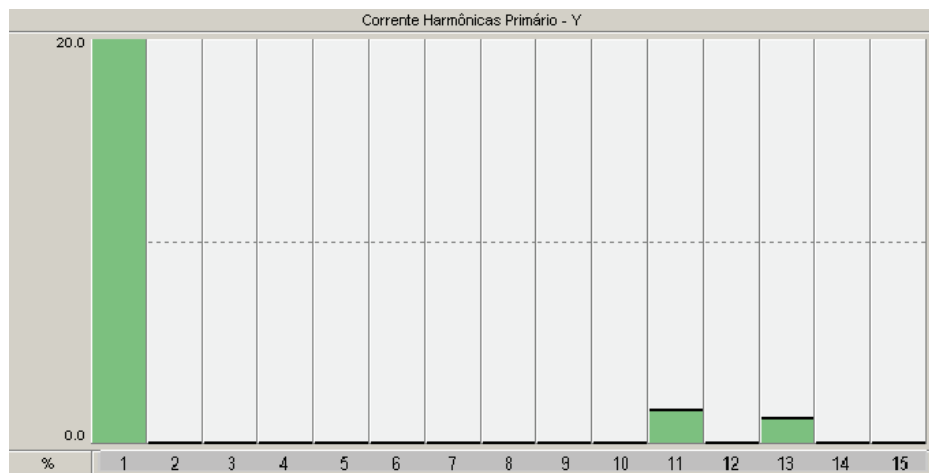
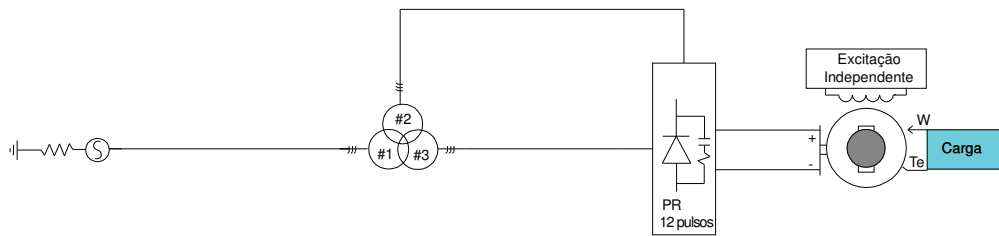


Fig. 4.9 – Caso 2: Percentual de correntes harmônicas injetadas por um retificador de 12 pulsos

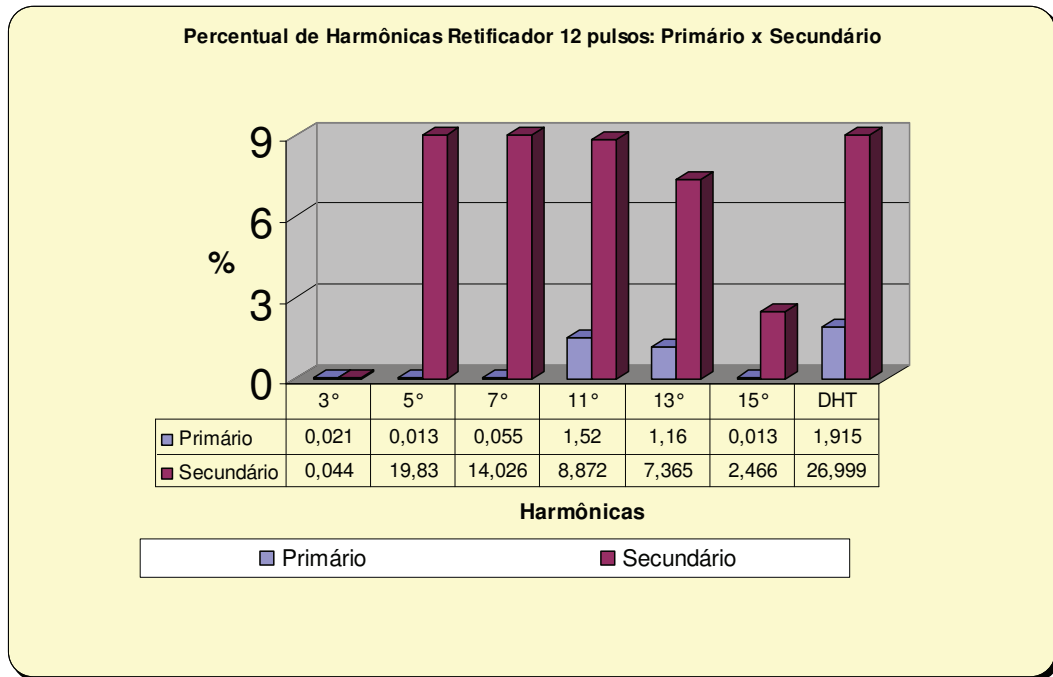


Fig. 4.10– Comparação DHT da correntes no primário x secundário PR 12 pulsos

Na figura 4.11 podemos verificar o comportamento comparativo do retificador 6 pulsos versus 12 pulsos (transformador de três enrolamentos) em relação a correntes harmônicas medidas no primário do transformador de potência.

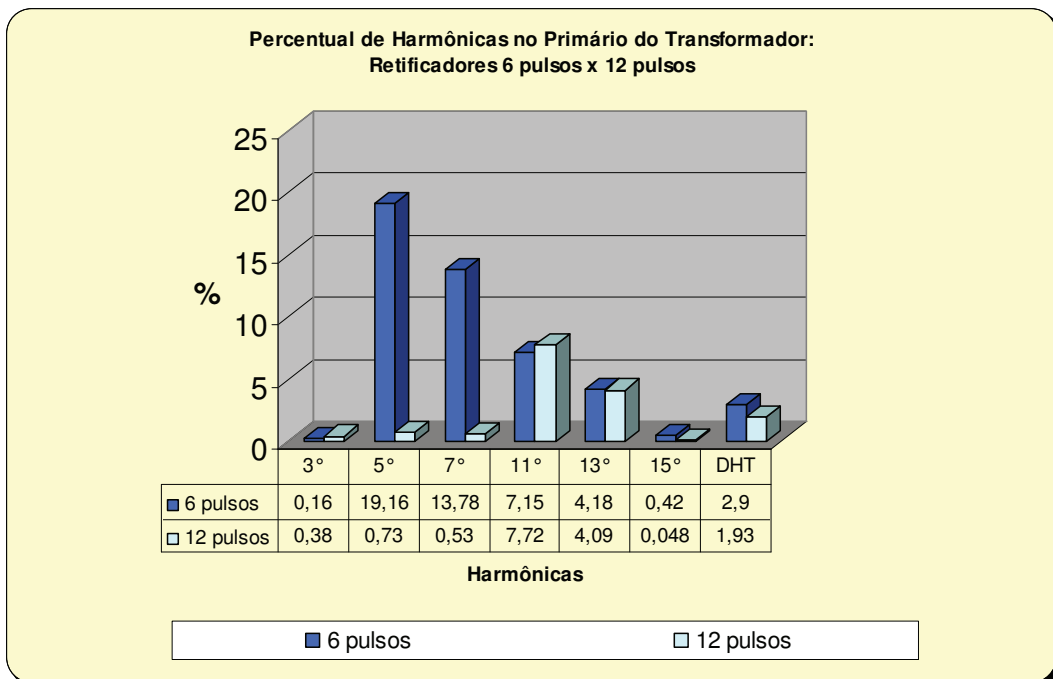


Fig. 4.11 – Comparativo de harmônicas injetadas na rede entre retificadores de 6 e 12 pulsos

Frente às análises descritas, verifica-se a justificativa de utilização da referência de tensão de sincronismo para os conversores CA-CC ser obtida da tensão primária do transformador, e não da secundária. Nota-se que considerando um retificador de 12 pulsos, as correntes harmônicas no primário do transformador são bem menores quando comparadas ao secundário. Na figura 4.12 têm-se as tensões de fase no primário e secundário. A DHT de tensão simulada para esse caso apresentou um total de 8.97% no primário.

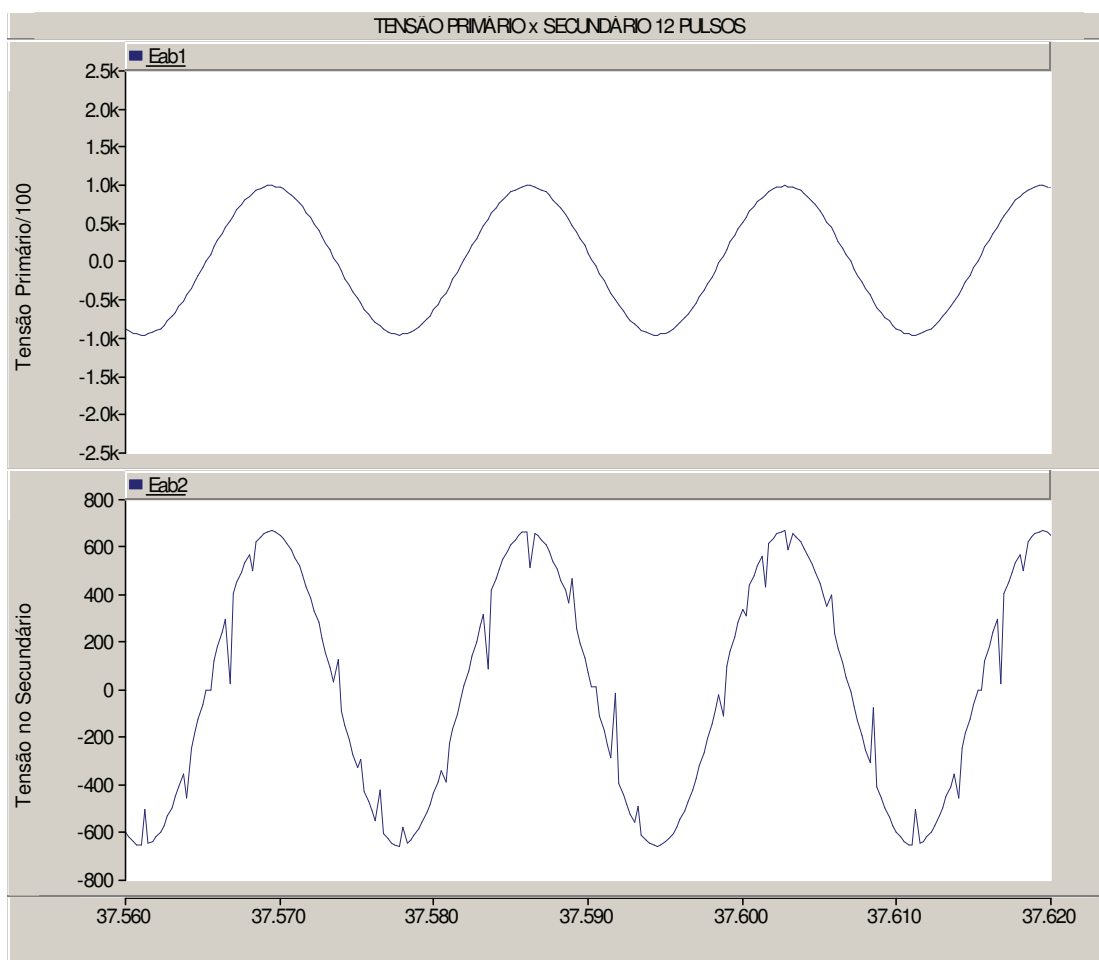


Fig. 4.12– Forma de onda das tensões de fase entre primário e secundário considerando um retificador 12 pulsos

Pode-se então concluir que o transformador de três enrolamentos é utilizado para minimizar os efeitos das correntes harmônicas no primário, preservando assim a forma de onda da tensão nesse ponto. Comparando as tensões no primário e secundário desse

transformador, percebe-se que há pouca distorção na tensão do primário. Sendo assim, o circuito de referência de tensão de *gate* ou gatilho para os tiristores deve ser conectado através de transformadores de potencial, ao primário do transformador, devido à característica da preservação da forma de onda de tensão. A deformação da tensão no secundário é bem maior que no primário do transformador de potência.

A configuração com retificador de 12 pulsos representa uma distorção harmônica total menor do que com a configuração com 6 pulsos.

Em suma, é coerente que a referência de tensão de sincronismo esteja no primário do transformador, pelo nível de distorção harmônica ser menor do que no secundário.

### **4.2.3 – Estudos de Afundamentos Momentâneos de Tensão**

Afundamentos de tensão no circuito elétrico do motor CC do laminador ocasionam a atuação da proteção e a parada do processo industrial. Sendo esse afundamento causado por uma falta fase-terra e considerando o tipo de conexão do neutro do circuito de referência de tensão, o circuito elétrico do laminador pode manter sua operação normalmente (mesmo sob essa condição de falta). Essa consideração é válida quando o aterramento do neutro dos transformadores possui uma resistência dimensionada de forma a sustentar as tensões de fase.

Para as simulações feitas nesse tópico, cabe ressaltar os seguintes fatos:

1 – O transformador de três enrolamentos não possui neutro aterrado, o que significa que não há caminho de retorno para a terra no caso de uma falta fase-terra em seus terminais primários;

2 – O sistema de alimentação do transformador de potência é do tipo neutro aterrado por resistência, dimensionada no valor de  $66,4\Omega$ , limitando a corrente de falta fase-terra em 600A;

3 – A placa de controle microprocessado emite um comando para desenergização do motor do laminador quando a tensão de referência para controle de gatilho dos tiristores da ponte retificadora for inferior a 80% durante um tempo máximo de 30ms;

Para verificar o comportamento dos parâmetros de tensão, velocidade e corrente do motor CC foram considerados três casos específicos, considerando três tipos distintos de conexões dos neutros dos transformadores a terra: solidamente e com resistores de 66.4  $\Omega$  (projeto) e 22.3 $\Omega$ . Em cada caso foi considerado a máquina com sua carga nominal, após sua partida e estabilização de velocidade. A falta fase-terra foi aplicada no instante t=20 segundos.

**Caso 1:** Fonte de alimentação com neutro solidamente aterrado;

Devido ao afundamento nas tensões entre fases, a tensão de armadura e corrente se comportam conforme visto na figura 4.13. Nesse caso configuração de proteção existente no computador de processo pelo circuito de referência de tensão, envia um comando de abertura para o disjuntor em 69kV, protegendo o motor de maiores defeitos.

Percebe-se que apesar do comportamento transitório da tensão e corrente de armadura, a velocidade permanece nominal.



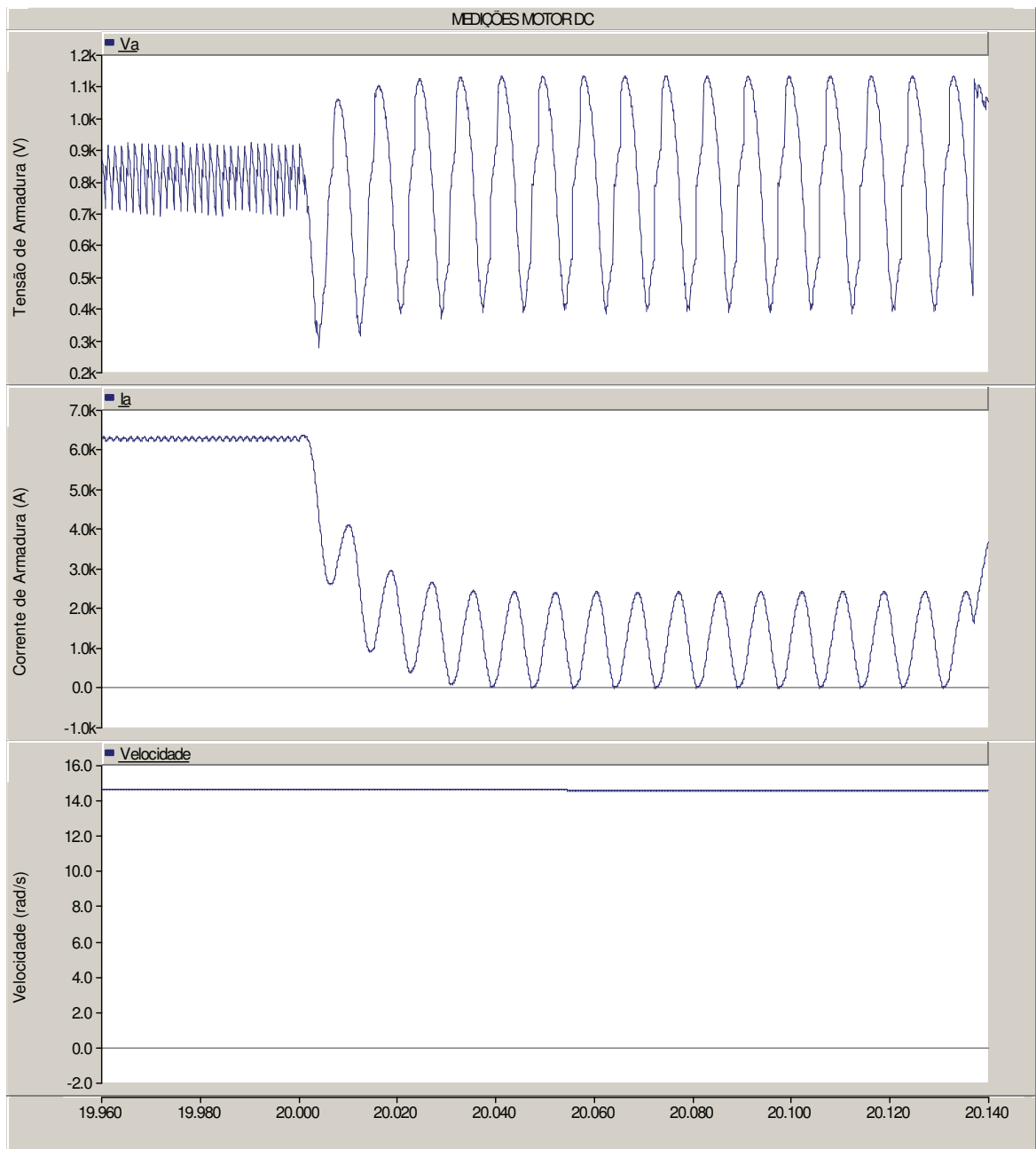


Fig. 4.13 – Simulações motor CC - Caso 1: Neutro solidamente aterrado

**Caso 2:** Fonte de alimentação com aterrado por resistência  $R=33.2\Omega$ ;

Ocorrem pequenas variações em relação a tensão de armadura, a corrente se instabiliza, porém ainda dentro de valores aceitáveis.

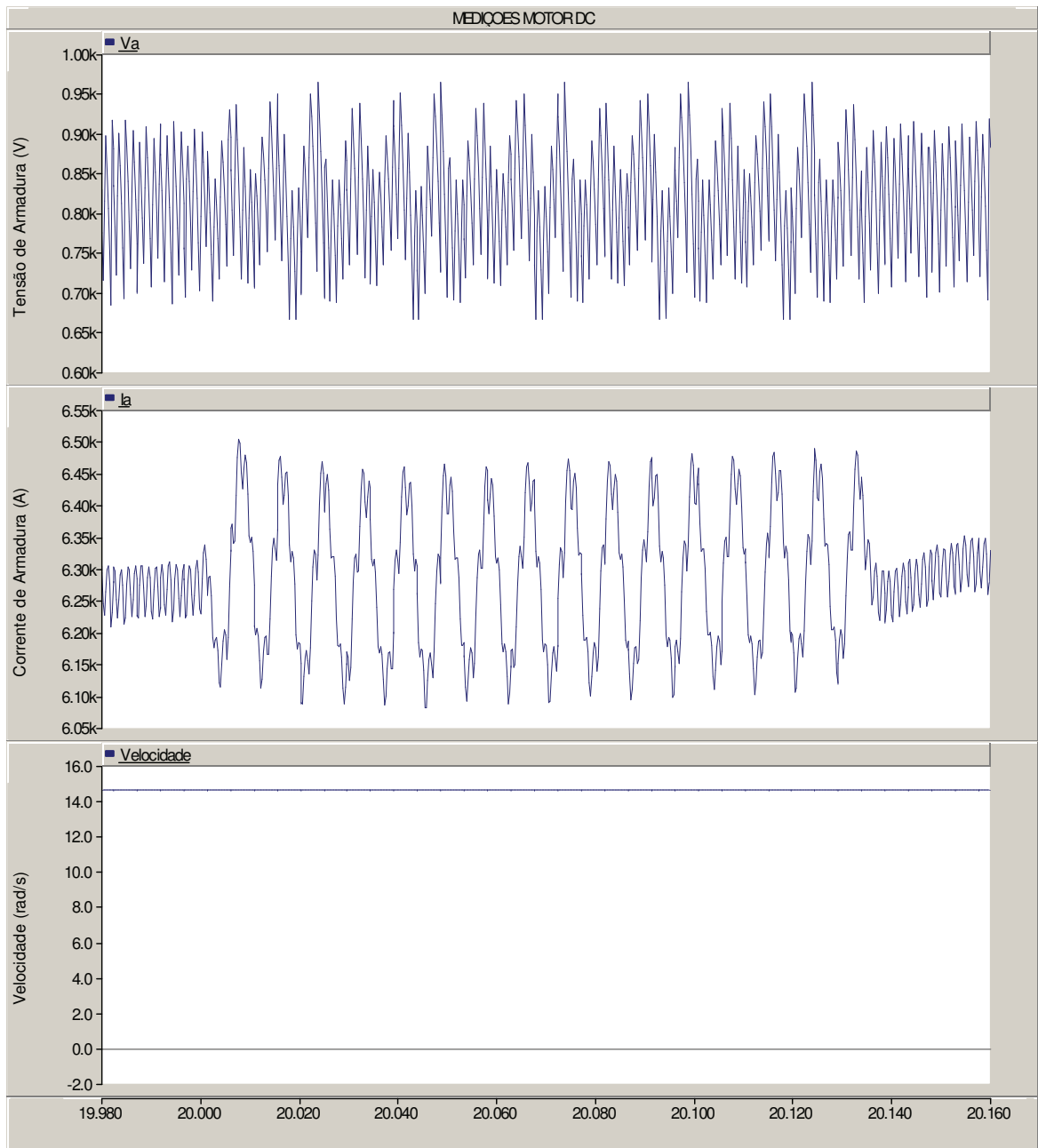


Fig. 4.14 – Simulações motor CC - Caso 2: Resistência de aterramento  $R=33.2\Omega$

A velocidade para esse caso também permanece em seu valor nominal devido a inércia do motor.

**Caso 3:** Fonte de alimentação com aterrado por resistência  $R=66.4\Omega$ ;

A tensão de armadura é praticamente a mesma antes e pós falta. As tensões entre fases praticamente não se alteram nem no primário, nem no secundário do transformador. Apesar da pequena variação de corrente, a velocidade permanece estável em seu valor nominal de  $\sim 15\text{rad/seg}$ .

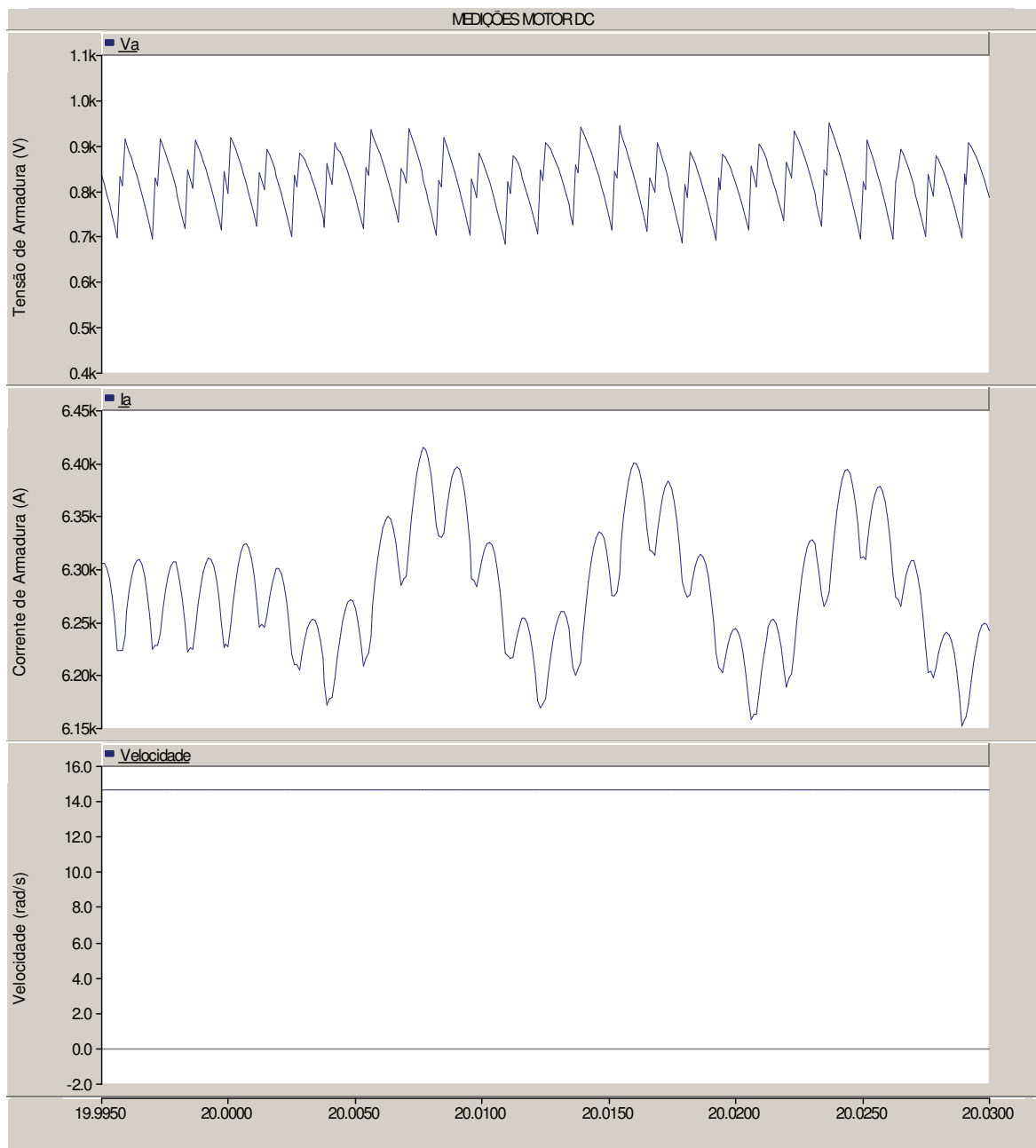


Fig. 4.15 – Simulações motor CC - Caso 3: Resistência de aterramento  $R=66.4\Omega$

Frente aos resultados percebe-se que o aterramento do neutro do transformador tem influência no comportamento das tensões do sistema elétrico.

A título de exemplificação, quando há alteração de velocidade no processo de laminação podem ocorrer problemas com o produto final conforme podemos verificar na figura 4.16.

Laminadores em cadeia, ou seja, dois conjuntos de laminadores que englobam e deformam o mesmo material simultaneamente, os efeitos das variações de velocidade podem ser observados.

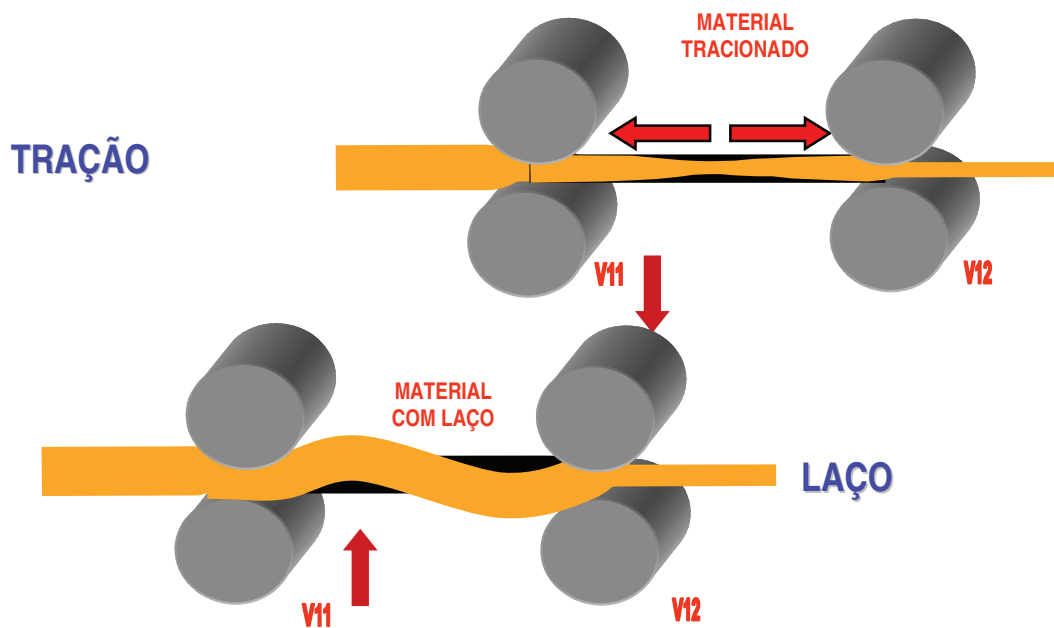


Fig. 4.16 – Influência da alteração de velocidade na laminação [67]

No movimento de tração, a velocidade do primeiro laminador  $V_{11}$  é menor que a do laminador 1  $V_{12}$ . O material é tracionado, ou seja, o laminador 2 tende a esticar o material que está em menor rotação no laminador 1.

No movimento de laço, a velocidade do primeiro laminador V11 é maior que o laminador 2 V12. É então formado um laço no material que é acelerado pelo laminador 1 e desacelerado pelo laminador 2.

### **4.3 – Circuito de Referência de Tensão de Sincronismo**

Esse circuito tem como principal função a construção das formas de onda de sincronismo para que o sistema de controle envie os pulsos para disparo dos tiristores [47]. Basicamente, ele é composto por comparadores e temporizadores que formam a função triangular de referência de ângulo de disparo para que o controlador emita os pulsos para os gatilhos dos tiristores de modo que a tensão de armadura do motor é controlada para manter o mesmo na velocidade de referência.

A placa do controlador realiza um *check* contínuo nas fases de referência para poder realizar suas operações [48]. Caso as tensões estejam fora dos limites pré-estabelecidos, a própria lógica do conversor envia um sinal para abertura do disjuntor de potência instantaneamente.

Nos próximos itens é mostrado o comportamento dessa referência de tensão de sincronismo para os conversores submetido à falta FT, com seu ponto de neutro conectado a terra e isolado.

#### **4.3.1 – Estudos de Falta Fase Terra**

Nos tópicos seguintes serão demonstradas duas simulações que mostram o comportamento do sistema de referência de sincronismo quando conectado ao aterramento da

malha industrial e quando não conectado a malha, ou seja, seu neutro isolado. Observando o comportamento nas duas situações, podemos obter uma conclusão que leva a adoção de uma nova configuração para o circuito existente, sem a necessidade de alteração de nenhum outro parâmetro no sistema elétrico.

#### 4.3.1.1 – Ponto de conexão aterrado na malha industrial

As tensões de referência para a geração dos pulsos de gatilho dos tiristores são obtidas pelos secundários de três transformadores de potencial, com configuração estrela-estrela, ambas com os neutros conectados diretamente a malha de aterramento da área industrial. A tensão de fase é abaixada para um nível primário de controle, através de um divisor de tensão. A tensão nas placas de controle possui um terminal fase e neutro sendo esse conectado diretamente a malha industrial, conforme a Fig.4.17.

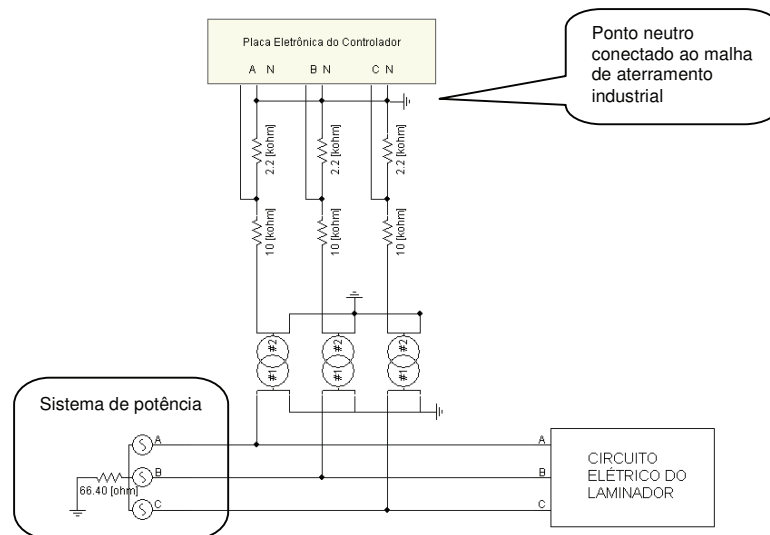


Fig. 4.17 – Circuito elétrico de referência de tensão para geração de pulsos dos tiristores da ponte retificadora

O ponto de tensão de referência é obtido após o resistor de 10k ohm e o ponto de neutro está sendo conectado após o resistor de 2.2k ohm, sendo este conectado a malha de terra industrial (malha de aterramento do sistema de potência).

Um curto fase-terra na fase C no primário do transformador de potência 69kV foi simulado e visto que durante a falta, a tensão da fase C em relação a terra tem um afundamento relevante, e as tensões em relação a terra nas fases sãs se elevam em aproximadamente 1,73 vezes. A duração da falta considerada foi de 0,08 segundos, conforme pode ser visto na figura 4.18.

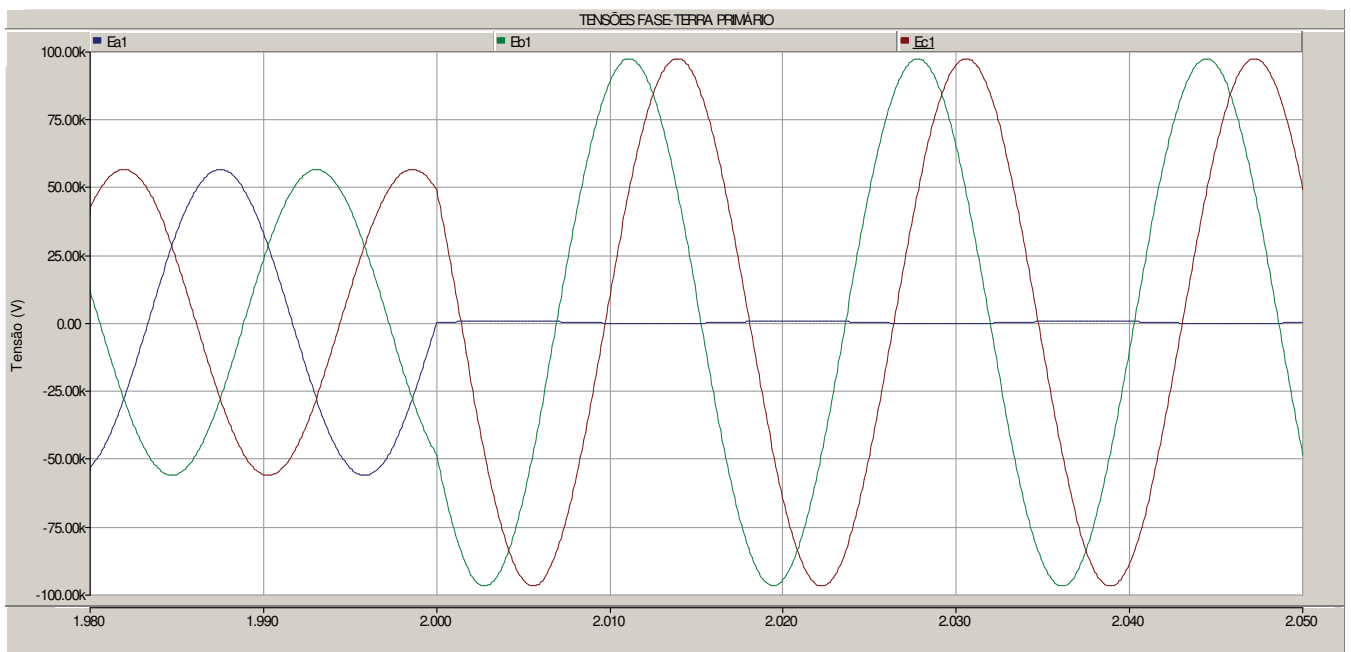


Fig. 4.18 – Comportamento das tensões em relação a terra no primário dos transformadores, considerando a fase C com curto-circuito fase-terra.

Esse fato se deve a característica do neutro do sistema de alimentação ser aterrado por resistência para limitação da corrente de curto-circuito fase-terra.

Pode ser notado na Figura 4.19 que as tensões fase-fase no primário do transformador se mantêm em seus valores nominais.

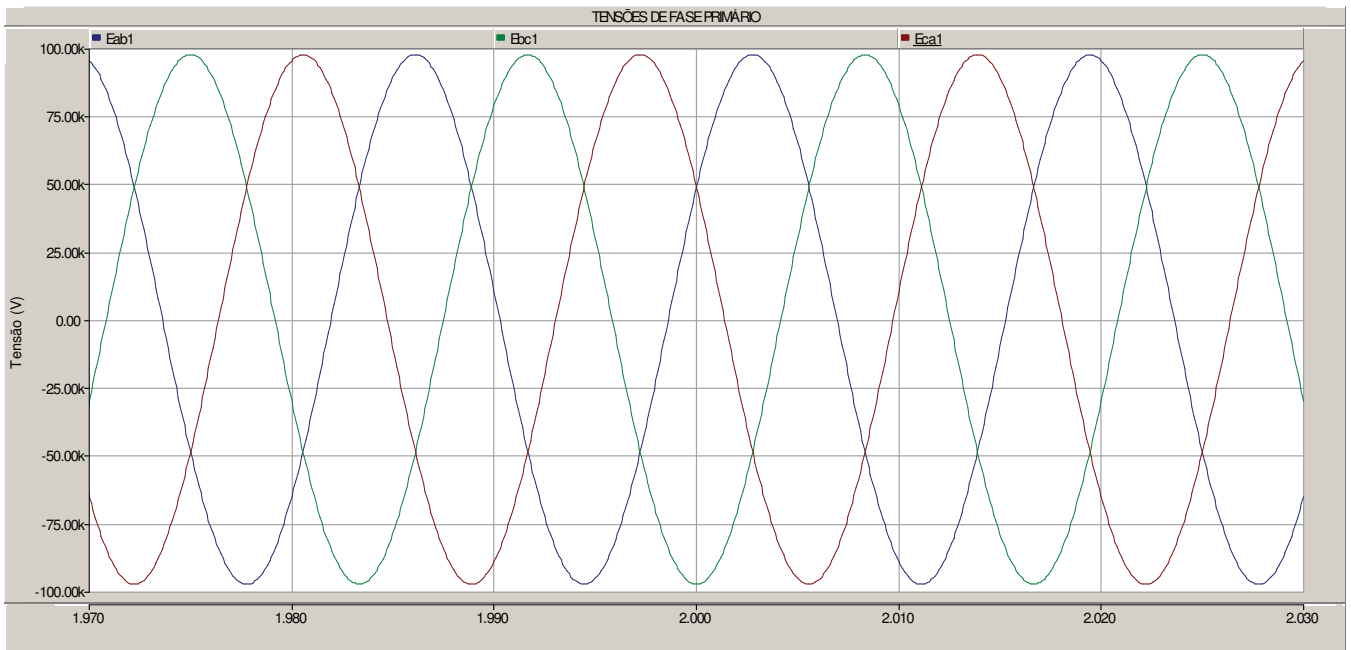


Fig. 4.19 – Comportamento das tensões fase-fase no primário dos transformadores, considerando a fase C em falta a terra.

Pode-se observar que na ocorrência de uma falta fase-terra no em um ponto do sistema elétrico, haverá um afundamento momentâneo de tensão na fase sob falta e que as tensões fase-fase no primário e secundário do transformador de potência permanecem inalteradas. Os parâmetros do motor permanecem inalterados para a operação com falta fase-terra no sistema de potência em 69kV, devido aos comportamentos observados das tensões fase-fase.

Durante o tempo de duração da falta FT, o módulo da tensão da fase C do circuito de referência de sincronismo para geração de pulsos para o gatilho dos tiristores do retificador, se comporta de forma análoga a tensão fase-terra na fase C do sistema de potência, sensibilizando a proteção configurada na placa de controle, e enviando comando de abertura para o disjuntor do transformador que alimenta o circuito elétrico do laminador. Na figura 4.20 podemos ver o valor dessa tensão. O sistema de proteção do próprio circuito de referência detecta a falta de fase e o circuito de potência é desligado, parando o laminador. Nesse momento há perda de produção, por parada repentina do processo e quebra na seqüência de produção. Se o material quente estiver situado entre os cilindros de laminação no



momento da falta de energia, ocorrerá a quebra do mesmo devido ao superaquecimento de sua superfície, trincando sua estrutura. Esse cilindro não mais poderá ser usado antes de sua recuperação. Essa ocorrência gera grandes perdas tanto financeiras quanto de tempo de reparo e manutenção.

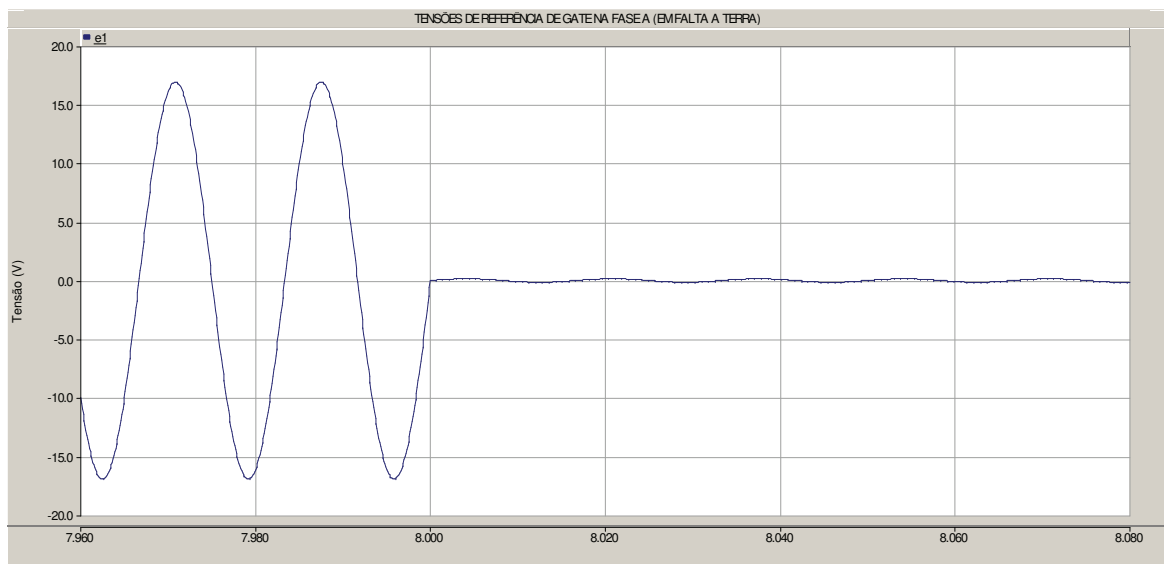


Fig. 4.20 – Comportamento da tensão C de referência de sincronismo para os conversores CA-CC durante a falta FT na fase C do sistema de potência (considerando neutro conectado a malha industrial)

#### 4.3.1.2 – Ponto de Conexão Isolado da Malha Industrial

Considerando o mesmo circuito de referência de tensão de sincronismo, alterando porém o ponto de neutro para que o mesmo não seja conectado no mesmo ponto dos neutros dos enrolamentos dos transformadores de potencial, nota-se que a forma de onda de tensão permanece normal, sem alteração.

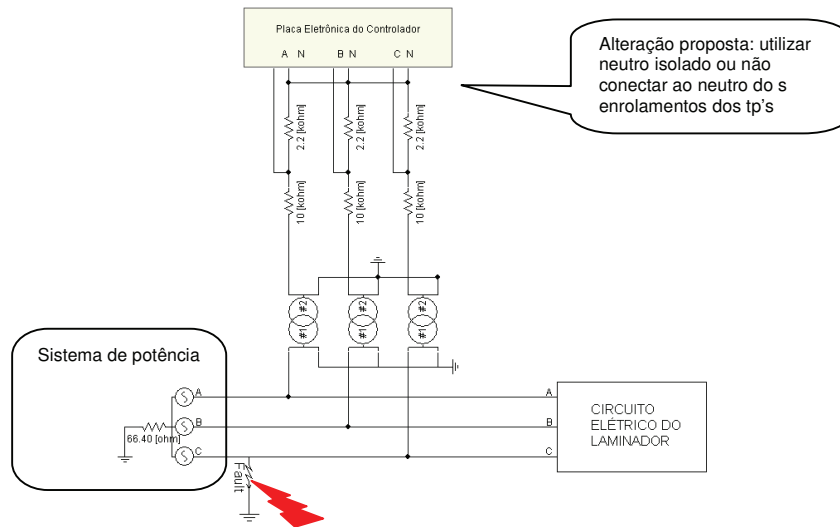


Fig. 4.21 – Simulação de falta pra terra na fase C considerando o ponto de neutro não conectado na malha industrial.

A tensão entre os pontos central do divisor de tensão e o neutro permanece inalterada, com se o sistema mantivesse sua operação normalmente.

Na figura 4.22 é mostrado o comportamento da tensão na fase C (fase em falta fase-terra), a qual permanece inalterada durante a falta.

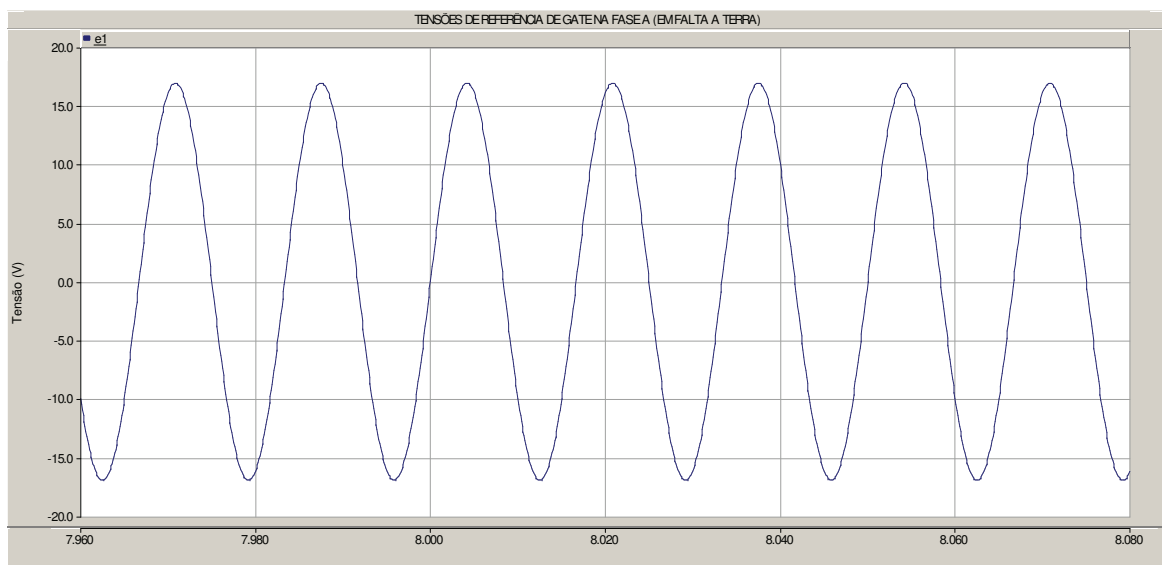


Fig. 4.22 – Comportamento da tensão C de referência de sincronismo para os conversores CA-CC durante a falta FT na fase C do sistema de potência (considerando neutro não conectado a malha industrial)

Podemos verificar que se o ponto de referência estiver isolado ou aterrado em outra malha que não seja o aterramento industrial, não há necessidade que o circuito elétrico do laminador seja desligado na ocorrência de uma falta fase-terra no 69kV, pois a tensão da fase em falta, vista do circuito de referência de sincronismo para os conversores que não se altera.

#### **4.4 – Conclusões**

As perdas de produção em laminadores de usinas siderúrgicas devido a desligamentos de equipamentos por variações momentâneas de tensão causadas por faltas fase-terra podem ser evitadas através de uma alteração na conexão do ponto de neutro do circuito de referência de tensão de sincronismo (responsável pela geração dos pulsos para os tiristores da ponte retificadora). A alteração desse ponto de conexão atualmente aterrado na malha industrial, para que seja conectado em outro ponto isolado da malha, mantém o sistema em operação mesmo quando há uma falta fase-terra em outro ponto desse sistema interligado.

Esse tipo de intervenção envolve custos insignificantes frente a não interrupção do processo e perdas de equipamentos devido à parada súbita por falha na qualidade de energia.

O ponto de conexão dos neutros dos transformadores de potência e o ponto de conexão do ponto neutro da referência de tensão de sincronismo influem no comportamento das tensões fase-terra e fase-fase durante o curto-circuito fase-terra, onde acontece o afundamento de tensão. Além disso, percebe-se que existem configurações que diminuem o percentual de correntes harmônicas injetado na rede, apenas alterando o modo de conexão do transformador, onde se conclui a justificativa da referência de tensão ser obtida do lado primário do transformador.

Na operação de sistemas interligados, podem ocorrer afundamentos de tensão em todo o sistema devido a faltas nas linhas ou alimentadores. Enquanto as faltas permanecem nos sistemas, também permanece o afundamento de tensão. Nesse ponto é destacada a relevância

de garantir que o sistema de proteção esteja correto e que a falta seja removida o mais rápido possível [51]. No caso de um sistema elétrico industrial, cargas distantes ao ponto de falta poderão ser desligadas pelas proteções de subtensão, ou simplesmente, desconectadas do sistema pela falta de suportabilidade do processo frente ao afundamento. Em alguns casos as conseqüências são graves, o que cabe ao engenheiro investigar o tipo de afundamento e criar soluções que minimizem seus efeitos [52].

Uma escolha correta da configuração do sistema sem afetar a operacionalidade do equipamento durante a fase de projeto e especificações, já elimina grandes partes desses problemas como pudemos verificar. O referencial de tensão para os conversores CA-CC do laminador não necessita de aterramento, pois sua estrutura funciona corretamente se o neutro estiver isolado.

Os conversores do motor CC trabalham com valores de tensão entre fases, ou seja, seu transformador é “isolado”, sem referências para a terra. Variações na tensão fase-terra podem ser desprezadas se o resistor de aterramento faz com que, mesmo o sistema sob falta a terra, as tensões entre fases permanecem inalteradas. Pode-se perceber que para o caso estudado, o motor do laminador pode continuar em operação mesmo com uma falta a terra em 69kV.

Quando o sistema é solidamente aterrado, ou o valor de resistência não é calculado para atender a condição citada acima, os parâmetros do motor CC não operam corretamente sofrendo grandes variações e decréscimos. Para proteger o motor CC e os conversores, o circuito de referência de tensão faz a proteção desligando o primário do transformador, já que as tensões fase-terra são alteradas assim como as tensões de fase.

Essa filosofia de operação se aplica a geralmente todos os acionamentos em corrente contínua que emprega controle através de conversores CA-CC.

## Capítulo 5

# Conclusões e Propostas de Continuidade

## 5.1 – Conclusões

Neste trabalho procurou-se avaliar os impactos produzidos por variações momentâneas de tensão, conseqüentes de faltas fase-terra em pontos distantes do sistema elétrico do laminador. Conforme conhecido o problema do desligamento do laminador quando na ocorrência de uma falta fase-terra em outro ponto do sistema, buscou-se uma solução viável para que essa condição não aconteça, e que a mesma não cause as perdas por paradas bruscas nesse equipamento.

Como as faltas fase-terra são as mais comuns em sistemas elétricos industriais, e as conseqüências dessa ocorrência refletidas principalmente em perdas de produção, são bastante significativas, a solução garantiu que a produtividade desse equipamento seja otimizada.

Inicialmente, foi desenvolvida uma comparação entre tipos de aterramento do sistema de potência, principalmente com neutro solidamente aterrado e aterrado por resistência. As análises mostraram a influência do tipo de aterramento do sistema de potência nas formas de onda de tensão sob condições de faltas fase-terra. Especificamente para a configuração com o neutro aterrado por resistência, foi mostrado que cargas conectadas entre as tensões de fase podem continuar em operação, mesmo sob condição de falta fase-terra, já as mesmas não se alteram com esse tipo de ocorrência. As condições pré e pós falta são similares, o que permitiu concluir que mesmo que ocorra uma falta fase-terra em outro ponto do sistema, o laminador pode continuar operando normalmente (considerando o sistema aterrado por resistência com valor de  $66.4\Omega$ ).

A princípio, o aterramento era concebido apenas para a proteção das pessoas, controlando as tensões de passo e toque nas subestações, porém, adicionalmente, o aterramento garante também que os equipamentos mantenham sua operação mesmo na ocorrência de falta fase-terra em outro ponto do sistema.

Considerando esse fato, partiu-se para outra análise: o ponto de conexão do neutro do circuito de referência de tensão de sincronismo. Essa tensão é utilizada para a geração dos pulsos para os gatilhos dos tiristores das pontes retificadoras a fim de ajustar o valor de tensão na armadura do motor CC e manter sua velocidade conforme referência. Dois tipos de conexão foram comparados: inicialmente com o ponto conectado à malha industrial (condição atual) e com o mesmo ponto conectado a outro ponto isolado dessa malha. Considerando uma falta fase-terra em outro ponto do sistema de potência, verificou-se que na condição atual, a tensão na fase sob falta varia momentaneamente de 1 pu para 0,1 pu, e a proteção do circuito de referência envia um comando de desligamento para o circuito do laminador. Porém, para o mesmo tipo de falta, considerando o ponto de conexão do neutro do circuito de referência conectado a outro ponto isolado da malha industrial, nota-se que as tensões não se alteram, ou

seja, os valores são os mesmos antes e após a falta. Nesse caso, o sistema do laminador permanece em operação normalmente.

Muitas vezes, erroneamente, se fala em falha de seletividade. Esse conceito não se aplica nesse caso. Na maioria das vezes, a falta é isolada instantaneamente no ponto de falta, porém o afundamento de tensão durante o tempo de abertura do disjuntor é inevitável, já que a falta se propaga pelo sistema. Se equipamentos não são dimensionados para suportar o afundamento de tensão durante esse tempo, então seus circuitos serão desligados.

Diante dessas análises, verificou-se que a alteração da conexão do ponto de neutro do circuito de referência de tensão, de modo que se torne isolado da malha industrial, faz com que mesmo na ocorrência de uma falta fase-terra em outro ponto do sistema de potência, o laminador pode continuar operando normalmente, sem interrupção em seu processo.

Baseado no objetivo inicial de reduzir os desligamentos do laminador por ocorrência de faltas fase-terra em outros pontos do sistema de potência, conclui-se que as análises dos resultados desse trabalho seguem as ações recomendadas para a diminuição dos impactos das variações momentâneas de tensão:

1° - Diminuir a incidência de afundamentos de tensão seja através da diminuição da magnitude, duração ou frequência de ocorrência: mostrou-se a influência da configuração do aterramento do neutro do sistema de potência, e o comportamento das tensões considerando o sistema sob falta fase-terra;

2° - Diminuir a sensibilidade dos equipamentos susceptíveis, aumentando sua robustez e tolerância aos distúrbios: propondo a alteração do ponto de conexão do circuito de referência de tensão, de conectado à malha industrial para conectado em outro ponto isolado dessa malha.

## **5.2 – Propostas de Continuidade**

Dentre as possibilidades de continuação dos estudos referentes a essa pesquisa pode-se destacar as seguintes:

- Estudar os efeitos dos harmônicos nos transformadores de potência de alimentação dos conversores CA-CC;
- Estudar a influência da distorção harmônica e afundamentos de tensão na referência de tensão tomada a partir dos enrolamentos secundários do transformador de potência;
- Avaliar impactos da expansão do sistema.



## Referências Bibliográficas

- [1] McGranaghan, M. F.; Mueller, D.R.;Samotyj, M. J. “Voltage sags and industrial systems”.  
IEEE– Transactions on Industry Applications, Vol 29, Abril. 1993.
- [2] Delaiba, A.C; Santos, C.G; Saraiva, E.; Resende, J. W.; Ribeiro, M.L.; “A Influência do  
Aterramento na Atenuação de Descargas Atmosféricas” Universidade Federal de  
Uberlândia 2008.
- [3] Van Wagner; Grebe T; Kretchmann, R; “Electric Power System Compatibility with  
Industrial Process equipment Part 1: Voltage Sags,” IEEE P1346 Working Group in  
Conf. Rec. 1994 ISrCPS.
- [4] IEEE Standard 1159-1995, “Recommended practice for monitoring electric power  
quality,” IEEE Standards, Piscataway, NJL Novembro 1995.
- [5] Voltage Sags Indices – Draft 2. Working Document for IEEE-1564, Novembro 2001
- [6] Dugan, R. C.; Mcgranaghan, M. F.; Beaty, H. W. “Electrical power system quality”, Mc  
Graw-Hill,1996. p. 265 - capítulo 3.
- [7] K.W. Carrick, “Minimizing the Effects of Voltage Disturbances on Continuous Industrial  
Processes”, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 32, No.6, pp. 1424- 1430,  
Dezembro 1996.
- [8] A. Sannko, M. Miller, M. Bollen, “Overview of voltage sag mitigation,” IEEE Power  
Engineering Society Winter Meeting, vol. 4, Janeiro 2000, pp. 2872 - 2878.
- [9] Reis e Silva, J.L.; Moura, L. C. “Alternativas Tecnológicas para Mitigação de  
Afundamento e Interrupção Momentâneas de Tensão em Cargas Sensíveis do Sistema  
Elétrico de Potência” Votorantim/CEMIG.

- [10] Oliveira, C. T; “ Afundamentos De Tensão: Avaliação Estatística De Resultados De Medição Com Base Em Simulações” Tese de Doutorado Universidade Federal de Itajubá, Dezembro 2008.
- [11] Oliveira, C. T; Carvalho, J. M; Watanabe, G. T.; Abreu, J. P. “Avaliação do Impacto do Afundamento de Tensão Baseado nas Características da Falta” Universidade Federal de Itajubá, Grupo de Estudos em Qualidade da Energia Elétrica 2008.
- [12] N.S.S. Ribeiro; W.R. Mendes “Influência Das Conexões Dos Transformadores De Potência Na Propagação Dos Afundamentos De Tensão Pelo Sistema Elétrico” XIII Eriac Décimo Terceiro Encontro Regional Iberoamericano De Cigré Maio 2009.
- [13] P. Heine & M. Lehtonen, “Voltage Sag Distributions Caused by Power System Faults”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, Nº 4, Novembro 2003.
- [14] Silva, Selênio R. “Variações de Tensão de Curta Duração” Departamento de Energia Elétrica, Agosto 2009.
- [15] C. Grigg. L. Conrad, K. Little “Predicting And Preventing Problems Associated With Remote Fault Clearing Voltage Dips” Southern Electric Industry Applications Symposium, New Orleans, LA, Novembro 1988.
- [16] Motoki M. E; Kagan, N. “Metodologia e Procedimentos Aplicados a Processos Industriais para a Redução do Impacto da Qualidade de Energia Elétrica “ Members IEEE.
- [17] Kagan, N.; Ferrari, E. L. “Projeto de Mapeamento de Fenômenos relativos à Qualidade do Produto no Sistema Elétrico” Março 2000.
- [18] Aziz Abdel, M. M.; Salam Sameh, G. A. A., Kosman, M. “Cost and Mitigation of Voltage Sag for Industrial Plants” Cairo 2000.

- [19] Filho, Anésio L. F.; Oliveira, Marco A.; Costa, A. G. V. “Metodologia De Análise De Variações Momentâneas De Tensão Em Sistemas Elétricos De Potência” UNB VI SBQEE, Belém, Agosto 2005.
- [20] Lourenço, T.L.; Pereira, G.M.V.; Samesima, M. I.; “Afundamentos De Tensão (Voltage Sags) E Seus Efeitos Nos Componentes Do Sistema Elétrico”.
- [21] Boollen, M.H.J; Yalçinkaya, J. P.; Qader, M. R. “A voltage sag study in a large industrial distribution system” Manchester Centre of Electrical Energy, UMIST, UK.
- [22] Cardoso, J. M. M.; Silva, J. S.; Cardoso, G.; Garcez, J. N. Garcez, Nunes, M. V. A.; Carvalho, A. J. B.; Junior, Charone ”Avaliação dos Impactos dos Afundamentos de Tensão no Sistema de Transmissão da Eletronorte” NESC-UFPA 2002.
- [23] Lamoree, J; Mueller, D.; Vinett, P.; Jones, W.; Samotyj, M. “Voltage Sag Analysis Case Studies” IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 30, No. 4, Julho/Agosto 1994 1083.
- [24] McGranaghan, M.; Mueller, D. “Effects Of Voltage Sags In Process Industry Applications” Electrotek Concepts, Inc.Knoxville, Tennessee.
- [25] Visacro Filho, Silvério.; “Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento” 2ª. Edição: Belo Horizonte, 1998
- [26] Beeman, Donald. Industrial Power System Handbook. McGraw-Hill, Nova York, 1955.
- [27] IEEE Std 142 “Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems” 2007.
- [28] L. Conrad, K. Little, and C. Grigg, “Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips,” IEEE Trans. Industry Applicat., vol. 27, pp. 167-172, Janeiro 1991.
- [29] J. Lamoree et al. “Voltage sag analysis case studies”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, Julho/Agosto 1994.

- [30] IEEE Standard 80-2000, "Guide for Safety in AC Substation Ground," IEEE Standards, Piscataway, Agosto 2000.
- [31] Leão, R. P. S.; Schmidlin, C. R.; Ferreira, L. C. J.; "Laboratório Virtual Para Estudo De Afundamentos De Tensão", UFC, VI SBQEE, Belém, Agosto 2005.
- [32] Mendes, W. R.; Moura, F. M. Samesima, M. I.; "Análise da Propagação dos Afundamentos de Tensão no Sistema Elétrico de Potência" Universidade Federal de Uberlândia Induscon, Agosto 2008.
- [33] N. Nimpitiwan, "Attenuation of disturbances in power distribution systems," MSEE Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, Dezembro, 2002.
- [34] Wagner, E. V.; Andreshak, A; Staniak, J. P.; "Power Quality and Factory Automation".
- [35] Pereira, E. T.; Cabral, S. H. L.; Januário, M.; Ignatowicz, E.; Bachman, J. "Monitoramento da tensão em indústrias e avaliação de vulnerabilidade" Eletricidade Moderna Março 2005.
- [36] Didden, M. D. "Voltage Sags in Continuous Processes - Case Study" Power Quality Apolication Guide, Katholieke Universiteit Leuven, Junho 2003.
- [37] Yun, S.; Jung-Hwan, O.; Kim, J. C.; Rim, S. J. "An Enhanced Method for Assessing the Effect of Voltage Sag in Power Distribution System" Department of Electrical Engineering in Soongsil University Seoul 156-743, Korea.
- [38] Lima, V.T; "Processos Mecânicos e Metalúrgicos de Fabricação", Apostila do curso de Engenharia Mecânica, FESURV, Universidade do Rio Verde, 2006.
- [39] D'ajuz, A.; Fonseca, C. S.; Carvalho, F. M. S.; Filho, J. A.; "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento" Editora Universitária, Universidade Federal Fluminense, capítulo 6, 120p, 1987.
- [40] "Applications of PSCAD® / EMTDC" Manitoba HVDC Research Centre Inc. 244 Cree Crescent, Winnipeg, Manitoba R3J 3W1 Canada.

- [41] L. Tang, J. Lamoree, M. McGranaghan, H. Mehta, "Distribution system voltage sags: interaction with motor and drive loads," Proceedings of the IEEE Power Engineering Society, Transmission and Distribution Conference, Abril 1994, pp. 1-6.
- [42] Manual do fabricante, Alstom, 1981.
- [43] Radmehr, M.; Farhangi, S.; Nasiri, A. "Effects of Power Quality Distortions on Electrical Drives and Transformer Life in Paper Industries: Simulations and Real Time Measurements", Conference Record of the IEEE IAS Pulp and Paper Conference 2006.
- [44] Honda, F. "Motores de Corrente Contínua", Guia Prático Siemens, 2006.
- [45] Jesus, N.C.; Cogo, J.R.; Tavares, K.A. "Monitoramento e Simulação da Qualidade da Energia: Procedimentos de Avaliação do Impacto de Harmônicos" GSI Engenharia e Consultoria Ltda.
- [46] Boonseng, C.; Kinnares, V.; Koykul, W.; Payakkaruang, S.; Chikinee, M.; Kaewrut, S. "Harmonics, Power Factor Correction and Transient Overvoltage Analysis in a Stainless Steel Cold Rolling Mill Plant System Caused by Voltage Sags", IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Julho 1999, Hong Kong.
- [47] Tunaboylu, N. S.; Collins, J.; S. W., Middlekauff "Ride-Through Issues For Dc Motor Drives During Voltage Sags" Department of Electrical and Computer Engineering, Clemson University, SC 29634-0915.
- [48] M. H. Bollen and R. A. de Graaff, "Behavior of ac and dc drives during voltage sags with phase-angle jump and three-phase unbalance," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, New York, 1999.
- [49] Fitzgerald, A.E.; Kusk, A. "Máquinas Elétricas" 2ª. Edição, 1976
- [50] Carlsson, F.; Engström, F.; Sadarangani, C. "Simulations of a synchronous machine affected by voltage sags" Electrical Machines and Power Electronics, Department of Electrical Engineering KTH, Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm.

- [51] G. Alonso Orcajo, J. M. Cano R., C. H. Rojas G., M. G. Melero, M. F. Cabanas, F. Pedrayes, “Voltage Sags in Power Industrial Systems”, Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de C. y S., University of Oviedo . Gijón ASTURIAS
- [52] Roberts, J.; Altuve, H. J.; Hou, D. “Análise Dos Métodos De Proteção Contra Falhas À Terra Nos Sistemas Da Distribuição Aterrados, Não Aterrados E Compensados” Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., Pullman, WA USA.
- [53] Yal, G.; Bollen, Math H. J.; Crossley, P. A. “Characterization of Voltage Sags in Industrial Distribution Systems”, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 34, No. 4, Julho/Agosto 1998.
- [54] Ignatowicz, E.; Braz, R. “Utilização da curva SEMI na Monitoração Temporária de Afundamentos Momentâneos de Tensão em Unidades Industriais” XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte, Agosto 2006.
- [55] P. Heine & M. Lehtonen, “Voltage Sag Distributions Caused by Power System Faults”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, Nº 4, Novembro 2003.
- [56] Anderson, P.M., Analysis of Faulted Power Systems, 4th Edition, Ames: Iowa State University Press, p. 245, 1981.
- [57] F. P. Ayello, J. M. Carvalho Filho, et al. “Influência do sistema de Proteção na Qualidade da Energia”, III Concladis – Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica, USP - São Paulo, 1999.
- [58] Steven J. Marrano, Craig DiLouie, The electrical systems design & specification handbook for industrial facilities, p 199.
- [59] IEEE Std 1346-1998. IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems.
- [60] Bollen, M. H. J. “Voltage sags in Three-Phase Systems” IEEE Power Engineering Review, Setembro 2001, pp.8-11

- 
- [61] Greenwood, A., "Electrical Transients in Power Systems", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1991. Canadá.
- [62] Filho, José Maria de Carvalho. Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis - Proposta de Novos Indicadores. Tese de Doutorado. Itajubá, 2000. p112. Escola Federal de Itajubá.
- [63] JOHN, A. N. Survey of recent Voltage Sags Papers from "Around the World" IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference. Proceedings 1993, pp52-54.
- [64] M. H. J. Bollen, "The Influence of Motor Reacceleration on Voltage sags", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.30, No.3, Maio/Junho 1994, pp.805-821.
- [65] Kindermann, Geraldo, "Curto-circuitos" 1a. Edição, 1995.