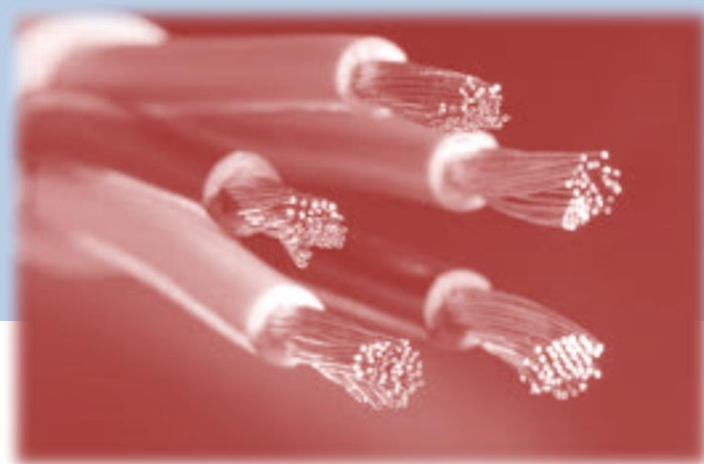


WILSON ARAGÃO FILHO

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

O essencial para estudantes de engenharia elétrica

ISBN: 978-85-9099-106-9



2014

Edição do Autor

WILSON ARAGÃO FILHO

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

***O essencial para estudantes de
engenharia elétrica***

1ª Edição

Vitória – ES

Wilson Correia Pinto de Aragão Filho

2014

©: 2014, Aragão Filho, Wilson

Formato: *digital (pdf)*

Capa: *Wilson Aragão Filho*

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

A659i Aragão Filho, Wilson Correia Pinto de, 1957-
Instalações elétricas industriais [recurso eletrônico] : o
essencial para estudantes de engenharia elétrica / Wilson Aragão
Filho. - Dados eletrônicos. - 1. ed. - Vitória : Ed. do Autor, 2014.
135 p. : il.

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-9099-106-9

Modo de acesso:

<[https://sites.google.com/site/livroseletronicosprofaragao/docume
nts-assignments](https://sites.google.com/site/livroseletronicosprofaragao/documents-assignments)>

1. Instalações elétricas. 2. Sistemas de energia elétrica -
Proteção. 3. Curtos-circuitos. I. Título.

CDU: 621.316.9

DEDICATÓRIA



Este livro é dedicado, com muito carinho e agradecimento, àqueles que cresceram comigo. A meus irmãos e irmãs:

Maria de Fátima José Carlos,

Paulo César, Luis Augusto, e

Eulina Maria.



APRESENTAÇÃO

Instalações elétricas industriais é uma unidade curricular de muitos cursos de engenharia elétrica. Visa a dar aos alunos os conhecimentos fundamentais no que tange às instalações elétricas de indústrias, que envolvem características mais complexas, de maior responsabilidade e de maiores exigências técnicas e de segurança que as instalações residenciais. Envolve, também, além da baixa tensão, as tensões média e alta.

Este autor tem oferecido esta unidade curricular nos últimos anos na Universidade Federal do Espírito Santo. É uma unidade obrigatória e complementa os estudos iniciados na unidade Instalações Elétricas, que correspondem a instalações exclusivamente de edificações de baixa tensão, residenciais e comerciais.

É uma unidade que muito desperta o interesse dos alunos, já que situações diárias os expõem a desafios de compreensão quanto às instalações elétricas de edificações. E a curiosidade permanece, com respeito às instalações da indústria, com que muitos já fazem contato em seus estágios técnicos.

Os conceitos básicos, já aprendidos no primeiro nível de estudos sobre as instalações elétricas, são aprofundados. O dimensionamento de condutores é abordado com uma ótica mais detalhista, tanto para baixa quanto para alta tensões. São estudados assuntos como: melhoria, correção e liberação de potência ativa por meio do estudo do fator de potência da instalação; curtos-circuitos e componentes simétricos; coordenação seletiva da proteção dos circuitos e equipamentos;

Este livro apresenta elementos teóricos e alguns aspectos práticos essenciais para que o aluno, uma vez os tenha dominado, possa aprofundar seus estudos sobre o assunto, que é, sem dúvida, muito complexo e exigente.

Vitória – ES, setembro de 2014

Prof. Wilson Aragão Filho

CONTEÚDO

O livro é constituído de oito (08) capítulos que cobrem os seguintes assuntos.

Primeiro capítulo: Aborda conceitos gerais e básicos sobre instalações elétricas industriais, incluindo as principais normas, definições de alguns termos técnicos importantes, e aspectos práticos sobre os condutores e as instalações elétricas.

Segundo capítulo: Faz uma revisão dos fundamentos do dimensionamento por ampacidade dos condutores elétricos e avança para os demais critérios importantes para o bom dimensionamento de condutores: queda de tensão, suportabilidade aos efeitos de curtos-circuitos, circuitos equilibrados e desequilibrados, e conteúdo harmônico das correntes.

Terceiro capítulo: Estuda alguns aspectos teórico-práticos sobre o dimensionamento e a operação de motores trifásicos de indução, os mais presentes na indústria.

Quarto capítulo: Analisa o conceito de fator de potência e suas consequências. Estuda a necessidade de promover melhorias ou correção do fator de potência das instalações elétricas tendo em vista a conformidade com os valores mínimos previstos na legislação e a possibilidade de liberação de carga ativa com a devida compensação de reativos por meio de bancos de capacitores bem dimensionados.

Quinto capítulo: Estuda a forma de onda das correntes de curto-circuito, dos pontos de vista teórico e por simulação computacional. A partir do seu circuito equivalente analisa as características de três situações possíveis e distintas de um curto-circuito, ressaltando a relação X/R e o fator de assimetria.

Sexto capítulo: Aborda o Teorema de Fortescue e os componentes simétricos, que são ferramentas essenciais para a análise e o cálculo de correntes de curto-circuito desequilibrados, tais como os bifásicos, os bifásicos para terra e os monopulares (ou monofásicos). Os circuitos e as

impedâncias de sequência são introduzidos e os circuitos de sequência zero para os transformadores de núcleo envolvente são analisados em seus fundamentos.

Sétimo capítulo: Neste capítulo o tema aterramento é revisto e aprofundado. Novos aspectos são abordados para oferecer ao aluno uma compreensão mais apurada sobre as razões e a importância dos esquemas de aterramento para instalações elétricas eficazes e seguras.

Oitavo capítulo: Neste capítulo são propostos vários problemas, para o exercício e o esclarecimento do estudante, cobrindo os sete capítulos do livro.

SOBRE O AUTOR

Wilson Aragão Filho é professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) desde 1984, tendo iniciado sua carreira de professor federal em 1981, na antiga Escola Técnica Federal do Espírito Santo, atual Instituto Federal de Ensino Tecnológico do Espírito Santo (IFES).

Obteve seu Mestrado em 1988 e seu Doutorado em 1998, tendo sido ambos os cursos realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob a orientação do Prof. Ivo Barbi. Tanto sua dissertação de mestrado quanto sua tese de doutorado trataram do mesmo tema: Eletrônica de Potência.

O Prof. Aragão interessa-se, também, pelos temas: instalações elétricas residenciais e industriais, sistema de energia elétrica, auditoria energética e conservação de energia, eficiência energética, segurança contra acidentes, carga eletrônica regenerativa, língua portuguesa, e Esperanto – língua internacional.

O currículo *Lattes* do Prof. Aragão pode ser acessado em:
<http://lattes.cnpq.br/9279730500937858>

O *Blog* do Professor pode ser acessado em:
<http://mondaespero-blog-uilso.blogspot.com.br/> .

Outros **livros publicados** pelo Prof. Aragão:

- **Curso básico bilíngue de Esperanto.**

- **Segurança na engenharia e na vida – Consciência segura.**
- **Eletrônica de potência I – Retificadores monofásicos e trifásicos.**
- **Introdução aos sistemas elétricos de potência – O essencial para estudantes de engenharia elétrica.**
- **Proteção de sistemas elétricos de potência – O essencial para estudantes de engenharia elétrica.**

Todos esses livros podem ser baixados, gratuitamente, da página:

<https://sites.google.com/site/livroseletronicosprofaragao/documents-assignments> .

Sumário

DEDICATÓRIA	ii
APRESENTAÇÃO	iii
CONTEÚDO	iv
SOBRE O AUTOR	vi
CAPÍTULO I	1
CONCEITOS GERAIS SOBRE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS	1
1. INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE EDIFICAÇÕES DE BT E MT	1
2. ORIGEM DA INSTALAÇÃO	2
3. NORMA REGULAMENTADORA NR 10 DO MIN. DO TRABALHO	2
3.1. Esta Norma Regulamentadora - NR estabelece	2
3.2. Esta NR se aplica às fases	2
4. CONCEITOS IMPORTANTES (Norma NBR 5410)	3
4.1. Comando:	3
4.2. Manobra: afeta o circuito.....	5
4.3. Proteção:	5
4.4. Seccionamento:	5
5. CONDUTORES	6
6. REVISÃO DE CONCEITOS IMPORTANTES	8
7. EQUIPAMENTOS	9
CAPÍTULO II	10
DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES.....	10
1. METODOLOGIA BÁSICA	10
1.1. DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES FASE.....	11
1.1.1. CIRCUITOS EQUILIBRADOS	11
1.1.2. CIRCUITOS DESEQUILIBRADOS	11
1.1.2.1. Dois condutores carregados.....	12
1.1.2.2. Três condutores carregados	12
1.2. SOMAS VETORIAL E ALGÉBRICA DAS CORRENTES	13
1.3. CIRCUITO COM 30% DE CARREGAMENTO	13
1.4. CONDUTORES SEMELHANTES	14
1.5. DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR NEUTRO	14
1.6. DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DE PROTEÇÃO.....	17
1.7. CÁLCULO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CONDUTOR DE PROTEÇÃO	17
1.8. DIMENSIONAMENTO POR QUEDA DE TENSÃO.....	20

1.8.1	Observando o critério da queda de tensão.....	20
1.8.2	Queda de tensão em circuito monofásico	21
1.8.3	Queda de tensão em circuito trifásico	24
1.9	DIMENSIONAMENTO POR CAPACIDADE DE CURTO-CIRCUITO	25
1.9.1	Seção mínima do condutor frente a determinada corrente de curto-circuito	25
1.9.2	Comprimento máximo do circuito frente a determinada corrente de curto-circuito	27
CAPÍTULO III		30
DIMENSIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS.....		30
1.	CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DE MOTORES DE INDUÇÃO	30
1.1.	Tensão nominal	30
1.2.	Potência nominal.....	30
1.3.	Corrente nominal	30
1.4.	Classes de isolamento	31
1.5.	Conjugado mecânico	31
1.5.1.	Expressões para conjugados de carga.....	33
1.5.1.1.	Bomba centrífuga	34
1.5.1.2.	Elevador de carga	34
1.5.1.3.	Compressor	35
1.5.1.4.	Ventilador.....	35
1.6.	Elevação de temperatura nos motores.....	36
1.7.	Característica de potência constante dos motores de indução trifásicos	38
2.	ALGUNS ASPECTOS SOBRE CARGAS ACIONADAS.....	39
2.1.	Momento de inércia do motor e da carga	39
2.2.	Carga conectada por meio de polia.....	39
2.3.	Tempo de aceleração de cargas	40
CAPÍTULO IV		42
MELHORIA DO FATOR DE POTÊNCIA.....		42
1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	42
2.	EQUIPAMENTO FUNCIONANDO EM VAZIO	42
3.	FATOR DE POTÊNCIA NA PARTIDA DE MOTORES	43
4.	LIBERAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA	45
CAPÍTULO V		46
CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO		46
1.	FORMAS DE ONDA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	46
1.1.	Equivalente de Thevenin	46
1.2.	Instante em que ocorre o curto	47
2.	TRÊS SITUAÇÕES POSSÍVEIS.....	48

2.1.	Curto-circuito perto e longe do gerador	49
2.1.1.	Curto-circuito perto do gerador	49
2.1.2.	Curto-circuito longe do gerador	50
2.2.	Reatância igual à resistência, ou menor ($X = R$ ou $X < R$)	51
2.3.	Reatância maior que a resistência ($X > R$)	53
2.3.1.	Para $X > R$ e $\alpha = \phi$	54
2.3.2.	Para $X > R$ e $\alpha = 0^\circ$	54
3.	ANÁLISE DO FATOR DE ASSIMETRIA E DA ASSIMETRIA	56
3.1.	Assimetria para $X < R$	56
3.2.	Assimetria para $X > R$	58
3.3.	Fator de Assimetria – gráficos em função de X/R e R/X	59
3.4.	Conclusão	61
4.	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NAS TRÊS FASES	62
5.	CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO	63
	CAPÍTULO VI	64
	COMPONENTES SIMÉTRICOS	64
1.	TEOREMA DE FORTESCUE	64
1.1.	Características dos componentes de sequência negativa	67
1.2.	Características dos componentes de sequência zero	67
2.	CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA GERADOR DESEQUILIBRADO	68
3.	CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA GERADOR EQUILIBRADO	70
4.	CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA UM SISTEMA ELÉTRICO	71
5.	CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA CURTOS-CIRCUITOS	73
5.1.	Curto-circuito trifásico (equilibrado)	73
5.2.	Curto-circuito bifásico (desequilibrado)	74
5.3.	Curto-circuito monofásico (ou monopolar, desequilibrado)	75
6.	CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA ZERO PARA TRANSFORMADORES	76
7.	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO PARA A FONTE	77
	CAPÍTULO VII	81
	ATERRAMENTO DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS	81
1.	INTRODUÇÃO	81
2.	SISTEMAS ISOLADOS E ATERRADOS	82
2.1.	Sistemas isolados	82
2.2.	Sistemas aterrados	83
3.	ESQUEMAS NORMALIZADOS DE ATERRAMENTO	84
3.1.	Esquema TN-C	84
3.1.1.	Descrição	84

3.1.2.	Aplicação	85
3.2.	Esquema TN-S.....	85
3.2.1.	Descrição	85
3.2.2.	Aplicação	86
3.3.	Esquema TT	86
3.3.1.	Descrição	86
3.3.2.	Aplicação	87
3.4.	Esquema IT	88
3.4.1.	Descrição	88
3.4.2.	Aplicação	88
4.	ATERRAMENTO E PREVENÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO	89
4.1.	Conceitos básicos	89
4.1.1.	Referencial de tensão nula.....	89
4.1.2.	Tensão de toque.....	90
4.1.3.	Tensão de passo	91
4.2.	Cuidados na proteção contra choque elétrico	92
4.2.1.	Proteção por equipotencialização.....	92
4.2.2.	Proteção por seccionamento automático	93
	CAPÍTULO VIII	94
	EXERCÍCIOS PROPOSTOS	94
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO I – CONCEITOS GERAIS	94
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO II – DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES	99
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO III – MOTORES ELÉTRICOS	109
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO IV – FATOR DE POTÊNCIA.....	111
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO V – CURTO-CIRCUITO	114
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO VI – COMPONENTES SIMÉTRICOS	117
	PROBLEMAS DO CAPÍTULO VII – ATERRAMENTO	121
	BIBLIOGRAFIA	124

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO I

CONCEITOS GERAIS SOBRE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

1. INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE EDIFICAÇÕES DE BT E MT

- 1.1. Tensões BT: Até 1 kV; Norma ABNT - NBR 5410/2004.
- 1.2. Tensões MT: 1 kV a 36 kV; Norma ABNT - NBR 14039/2005.
- 1.3. Objetivos das Normas: Segurança e Continuidade de serviço.
- 1.4. Ponto de Entrega

Definido por legislação (ANEEL, REN 456:2000): Limite de responsabilidade de fornecimento; fronteira entre a concessionária, área pública, e a propriedade, área particular.

Entrada da Instalação: Subestação (SE) com TP, TC e medidores. A Fig. 1 ilustra a localização do ponto de entrega (PE).

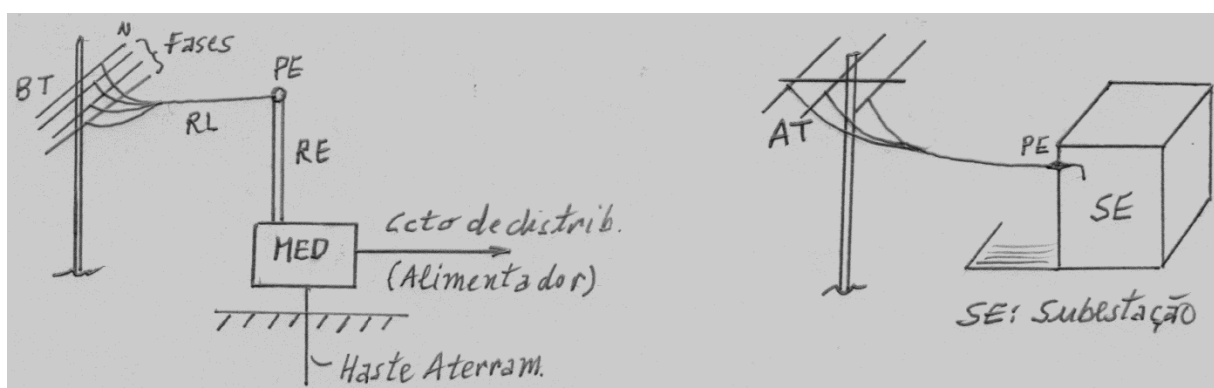


FIG. 1 – PONTO DE ENTREGA

2. ORIGEM DA INSTALAÇÃO

É o ponto inicial de aplicação da Norma.

Esquema: Rede => PE => CS => TP, TC e Medição => Disjuntor => Origem =>....

A

Fig. 2 ilustra a localização da origem (O) da instalação.

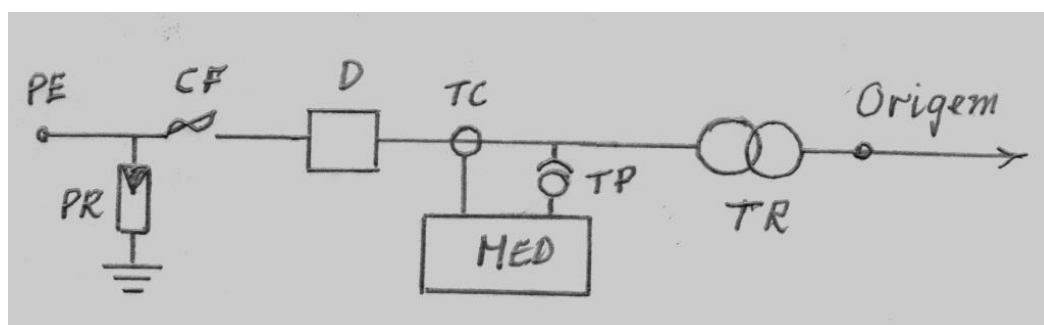


FIG. 2 – ORIGEM DA INSTALAÇÃO

Nesta figura: CF = Chave faca; D = DTM; TC = transformador de corrente; TP = transformador de potencial; MED = Equipamentos de medição e proteção geral; TR = transformador de força; PR = Dispositivo para-raios.

3. NORMA REGULAMENTADORA NR 10 DO MIN. DO TRABALHO

3.1. Esta Norma Regulamentadora - NR estabelece

Os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade.

3.2. Esta NR se aplica às fases

De geração, transmissão, distribuição e consumo, incluindo as etapas de projeto, construção, montagem, operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades, observando-se as normas técnicas oficiais estabelecidas pelos órgãos competentes e, na ausência ou omissão destas, as normas internacionais cabíveis.

4. CONCEITOS IMPORTANTES (Norma NBR 5410)

4.1. Comando:

Afeta o dispositivo. Exemplos: fecha ou abre um disjuntor ou uma seccionadora.

A título de revisão, a curva típica de disparo de um disjuntor termomagnético (DTM), incorporando os mecanismos de atuação por sobrecarga (térmico) e por curto-circuito (magnético), está apresentada na Fig. 3.

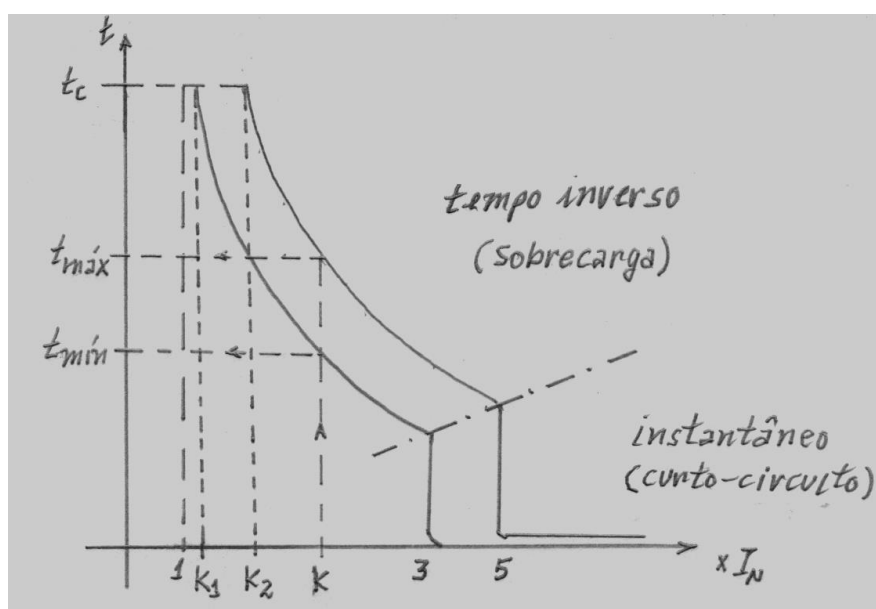


FIG. 3 – CURVA TÍPICA DE ATUAÇÃO DE UM DTM

Com relação à Fig. 3, os seguintes comentários podem ser feitos.

- K_1 e k_2 correspondem às correntes de **não atuação** e de **atuação**, respectivamente. A corrente de não atuação (k_1) está na faixa de 5 a 15% acima da nominal (I_N), enquanto a de atuação (k_2) estará com valor máximo de $1,45I_Z$, em que I_Z corresponde à corrente máxima admissível em situação normal e sob temperatura de regime contínuo para o condutor, na temperatura ambiente prevista para a sua instalação.
- K_1 é uma corrente que provocará a atuação do DTM num tempo **mínimo** t_c , em que t_c significa **tempo convencional** e corresponde a 1h, para correntes nominais até 63 A (pela Norma IEC = *International Electrotechnical Commission*).
- K_2 é uma corrente que provocará a atuação de DTM num tempo máximo t_c , e num tempo mínimo correspondente à curva inferior (curva de tempos mínimos de disparo).
- Esta curva típica é, na realidade, formada por duas curvas, estabelecendo uma faixa de atuação entre valores de tempo mínimo (curva inferior) e tempo máximo (curva superior).
- Pode-se interpretar esta curva afirmando-se que as correntes de sobrecarga vão até $3I_N$; as de curto-circuito iniciam-se a partir de $5I_N$. E a faixa de 3 a $5I_N$ é uma região de fronteira, em que os tempos de atuação podem estar em qualquer ponto da área correspondente.
- A chamada atuação **instantânea**, característica da atuação em curto-circuito é, na verdade, um tempo muito rápido e que só depende das características construtivas do dispositivo. Idealmente é uma atuação instantânea; na prática, tem um valor de tempo muito pequeno (dezenas de milissegundos).

- A IEC prevê três tipos de DTM: tipo B (correntes de curto-circuito entre 3 e 5 vezes a nominal), tipo C (entre 5 e 10 vezes) e tipo D (superior a 10 vezes). Isto permitirá a escolha de um DTM adequado às correntes muito elevadas de partida de motores ou de *inrush* de transformadores.

4.2. Manobra: afeta o circuito.

Diz-se: “Fazer uma manobra na subestação”.

A Fig. 4 ilustra duas chaves seccionadoras (CS) que, ao serem comandadas (para fechar ou abrir), alterarão a configuração do sistema: a linha passa a estar aterrada, estando previamente desenergizada; os transformadores, com o fechamento da chave, passam a atuar em paralelo, estando, anteriormente, trabalhando de forma independente, cada um alimentando sua carga.

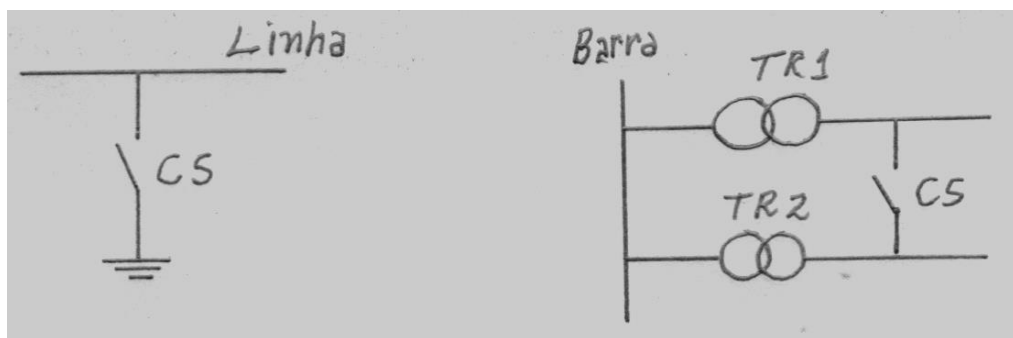


FIG. 4 – CHAVES SECCIONADORAS ATUANDO PARA MANOBRAS EM SE

4.3. Proteção:

Ação automática provocada por dispositivos sensíveis a situações anormais.

4.4. Seccionamento:

Desliga completamente; isola equipamentos (para manutenção, verificação, localização de defeitos, reparos).

5. CONDUTORES

5.1. Cabo isolado.

5.2. Cabo unipolar: cabo isolado + capa isolante

5.3. Cabo multipolar (bipolar, tripolar, tetrapolar, etc.).

Veia de cabo multipolar = cabo unipolar. A Fig. 5 ilustra tais tipos de condutor elétrico.



FIG. 5 – TIPOS DE CONDUTORES (CABOS) ELÉTRICOS.

5.4. Identificação:

5.4.1. Fase: número, cores, símbolos ou disposição => indicação nos diagramas/desenhos

5.4.2. Fase para condutores nus: identificação por cores: A = Vermelha; B = Branca; C = Marrom (Ex.: Subestações de potência).

5.4.3. PE: cor VERDE-AMARELA (verde com faixa amarela helicoidal) => cobertura do cabo unipolar/veia do cabo multipolar.

5.4.4. PEN: AZUL, com identificação verde-amarela nos pontos acessíveis/visíveis => no cabo ou na veia.

5.5. Temperatura ambiente dos condutores:

Circunvizinhança do condutor sem corrente: 30°C, nos métodos de instalação de referência, em geral, e 20°C para métodos de referência de instalação no solo (subterrânea).

5.6. Níveis de isolamento:

5.6.1. BT: cabo isolado: tensão F-F. Ex.: 750 V (NBR 6148)

5.6.2. BT: cabo unipolar:

Tensões F-T/F-F: Ex.: 300/450 V; 450/750 V; 0,6/1 kV (NBR 6251)

5.6.3. MT: cabos mais complexos:

F-T/F-F: Ex.: 3,6/6 kV; 6/10 kV; 8,7/15 kV; 12/20 kV (NBR 6251)

5.6.4. MT: possuem blindagem (fitas de cobre):

Para proteção contra campos eletromagnéticos e circulação de correntes de curto-circuito (pois são blindagens aterradas!).

5.7. Segurança contra incêndios:

5.7.1. Cabos não propagadores de chama, livres de halogênio, baixa emissão de fumaça e gases tóxicos.

5.7.2. Halogênio: gás à base de cloro, índio, etc.; cloro: substância verde, odor forte, sufocante, à temperatura ambiente.

5.7.3. Alguns cabos especiais: resistentes ao fogo ou incombustíveis.

5.8. Isolação:

5.8.1. PVC = Cloreto de Polivinila => na isolação e nas capas (Pois não propagadores de chama!)

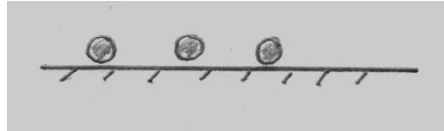
5.8.2. EPR = Etileno-Propileno => na isolação.

5.8.3. PE = Polietileno => na isolação.

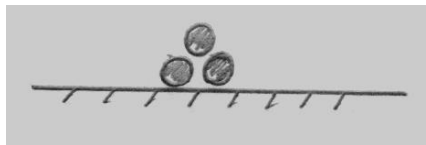
5.8.4. XLPE = Polietileno reticulado => na isolação.

5.9. Disposição dos cabos em bandejas:

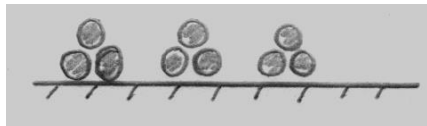
5.9.1. Ternas:



5.9.2. Trifólios:



5.9.3. Ternas de trifólios:



5.10. Exemplo de especificação:

“Cabo isolado para 8,7/15 kV, em cloreto de polivinila (PVC), condutor de cobre, seção transversal de 15 mm²”.

6. REVISÃO DE CONCEITOS IMPORTANTES

6.1. ISOLAÇÃO:

Substantivo para designar o corpo que isola o condutor: a isolação de cor vermelha.

6.2. ISOLANTE:

Adjetivo para qualificar um material não condutor: fita isolante; capa isolante.

6.3. ISOLAMENTO:

Adjetivo quantitativo para designar a capacidade ou poder de isolar do material isolante: nível de isolamento.

7. EQUIPAMENTOS

- 7.1. Não misturar tensões CA/CC (ou AC/DC) => agrupar as tensões diferentes.
 - 7.2. Dispositivo de proteção: => localização/identificação para fácil reconhecimento.
 - 7.3. Equipamentos de manobra não visíveis (em painéis): fechado => I – Vermelho; aberto => O – Verde.
 - 7.4. Disjuntor: Fonte => bornes superiores; carga => bornes inferiores.
-

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO II

DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES

1. METODOLOGIA BÁSICA

Para o dimensionamento por capacidade de corrente (ampacidade) de condutores de circuitos de instalações elétricas industriais, em baixa tensão (BT) ou média tensão (MT), segue-se o mesmo procedimento já utilizado em instalações elétricas de BT, residenciais e comerciais.

A metodologia estabelecida pela NBR 5410/2004 propõe a consulta a várias tabelas de capacidades de corrente que podem ser entendidas como valores de laboratório, para situações bem definidas: temperatura ambiente do condutor de 30°C (20°C para o solo), dois ou três condutores carregados (vivos) por circuito, métodos de instalação referenciais em número de nove (A1, A2, B1, B2, C, D, E, F e G, para BT; A, B, C, D, E, F, G, H e I, para MT).

Para o dimensionamento de condutores em situações de instalação real, diferentes das situações dos métodos referenciais é proposta a utilização dos chamados *fatores de correção*: fator de temperatura e fator de agrupamento.

O fator de temperatura será diferente de um (1,0) sempre que a temperatura ambiente real for diferente da temperatura ambiente tabelada, seja para condutores não enterrados ou enterrados.

O fator de agrupamento será diferente de um (1,0) sempre que houver mais de um circuito de dois condutores carregados (= 2 cabos isolados ou 1 cabo bipolar) ou de três condutores carregados (= 3 cabos isolados ou 1 cabo tripolar). Isto leva em conta o aquecimento prévio de um circuito desenergizado ao lado de outro com corrente circulante. Este circuito ativo aquecerá o inativo. Quando este último entrar em atividade, com corrente circulante, sua temperatura aumentará não a partir da temperatura ambiente, mas a partir da temperatura inicial, superior à do ambiente.

1.1.DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES FASE

1.1.1. CIRCUITOS EQUILIBRADOS

Se o circuito considerado for equilibrado, duas possibilidades estarão disponíveis nas tabelas da Norma: dois condutores carregados ou três condutores carregados.

Para dois condutores carregados, deve-se entender que sejam os casos reais de uma fase e um neutro, ou duas fases (do sistema trifásico), de circuitos monofásicos (dois condutores).

Para três condutores carregados, deve-se entender que sejam os casos reais de três condutores isolados, ou três cabos isolados ou, ainda, um cabo tripolar, correspondentes a circuitos trifásicos.

Observação: circuitos equilibrados, pela Norma NBR 5410, são entendidos, para circuitos de quatro (4) condutores (F-F-F-N), *virtualmente* ou *aproximadamente* equilibrados, isto é: até 10% de desequilíbrio entre as correntes nas fases, ou para correntes de retorno pelo neutro de até 10% da corrente média das fases.

1.1.2. CIRCUITOS DESEQUILIBRADOS

Para circuitos desequilibrados, as tabelas ainda apresentam, apenas, os casos de dois e três condutores carregados.

Para circuitos monofásicos reais a três condutores (F-F-N), desequilibrados, o neutro, que é considerado um condutor vivo, aparece como um condutor carregado, pois estará conduzindo corrente. Neste caso, será utilizada a coluna das tabelas da Norma correspondente a três condutores carregados.

Para circuitos trifásicos reais a quatro condutores (F-F-F-N), desequilibrados, os quatro condutores são considerados carregados. Como não há nas tabelas teóricas da Norma uma coluna para quatro (4) condutores carregados, a Norma prevê duas possibilidades para o dimensionamento correto dos condutores fase.

1.1.2.1. *Dois condutores carregados*

Para ser utilizada a coluna de dois condutores carregados, os quatro condutores da instalação real, trifásica, podem ser considerados dois circuitos monofásicos agrupados a outro igual: dois circuitos monofásicos de dois condutores carregados. O dimensionamento é, então, feito para um circuito monofásico agrupado a outro circuito igual. Aplica-se o fator de agrupamento apropriado e faz-se o correto dimensionamento do circuito monofásico, que, na verdade, representa o único circuito trifásico desequilibrado.

Isto está previsto na Norma sob a Nota 5, da sua Tabela 42: N condutores de um circuito desequilibrado podem ser considerados iguais a $N/2$ circuitos de dois condutores carregados ou $N/3$ circuitos de três condutores carregados.

1.1.2.2. *Três condutores carregados*

Para ser utilizada a coluna de três condutores carregados, os quatro condutores do circuito trifásico desequilibrado podem ser tratados como correspondentes, na tabela da Norma, a três condutores carregados, mas com a consideração de um fator de correção inicial igual a 0,86, sem prejuízo da possibilidade de utilizar outro fator de agrupamento para o caso de dois ou mais circuitos trifásicos no mesmo eletroduto ou canaleta ou método de instalação. Este fator é denominado, na Norma, de “fator de correção devido ao carregamento do neutro”. (Ver NBR 5410, item 6.2.5.6.1.)

Esta consideração de dimensionamento para cargas trifásicas desequilibradas é igualmente aplicável para o caso de carga equilibrada, mas com *correntes de fase com conteúdo harmônico* significativo. De fato, se o conteúdo harmônico relativo às correntes de 3ª ordem e seus múltiplos – que, como se sabe, circulam pela fase, retornando pelo neutro – for maior que 15%, o fator de carregamento de neutro também se aplica. Devem-se entender esses 15% de conteúdo harmônico em relação ao valor da corrente eficaz da fase mais carregada (incluindo os efeitos de todo o conteúdo harmônico).

1.2.SOMAS VETORIAL E ALGÉBRICA DAS CORRENTES

Se as correntes nas fases corresponderem a fatores de potência de valores próximos, os ângulos de fase das correntes na fase não serão muito diferentes, e a soma algébrica será aproximadamente igual à exata soma vetorial. E o pequeno erro será a favor da segurança, já que, certamente, dará uma corrente total um pouco maior.

O dimensionamento, no caso de cargas bifásicas ou trifásicas desequilibradas, deverá ser feito pela fase mais carregada, isto é, com a maior corrente. Uma simples soma algébrica já dará a informação sobre a fase mais carregada.

No caso do condutor neutro, a soma algébrica não deverá ser aplicada, pois dará, em geral, valores muito maiores do que a exata soma vetorial. Isto se explica pelo fato de que os ângulos das diversas correntes de fase que se somam no neutro estão com ângulos de fase muito diferentes. Uma aparente corrente de neutro maior que a maior corrente de fase, obtida por soma algébrica, tornar-se-á muito menor ao ser recalculada, de forma exata, pela adequada soma vetorial.

1.3.CIRCUITO COM 30% DE CARREGAMENTO

A Norma prevê uma particularidade. Se um circuito, após seu dimensionamento correto, resultar percorrido por menos de 30% de sua capacidade real (I_L), isto é, já aplicados os fatores de correção sobre a capacidade do condutor dada pela tabela da Norma, poderá ser desconsiderado no dimensionamento dos circuitos adjacentes. (NBR 5410: 6.2.5.5.2)

Isto significa que o fator de agrupamento será maior, em relação àquele que seria aplicado se o circuito subcarregado fosse considerado no dimensionamento. Este fator de correção maior significa a consideração de uma corrente menor na tabela e, portanto, uma bitola possivelmente menor.

EXEMPLO 2.1: Dimensionar o cabo bipolar do circuito 1 que alimenta uma única tomada monofásica de 1188 W, em condutor de cobre, de PVC/750 V, com fator de potência 0,9 indutivo. Dimensionar, também, o circuito 2,

constituído por cabo bipolar, em condutor de cobre, de PVC/750 V, e que alimenta um motor de indução monofásico, 380 V, de 10 cv, com fator de potência 0,87, rendimento de 0,83 e fator de sobrecarga de 1,15. Estes circuitos acompanham outros dois circuitos: um cabo bipolar e um cabo tripolar. A instalação dos cabos é em bandeja perfurada, cujo método de referência é o de letra E. Temperatura ambiente dos cabos é de 40°C. (Respostas: Circuito 1: # 2,5 mm², I_z = 20,3A; Circuito 2: # 6 mm², I_z = 36,38 A.)

1.4.CONDUTORES SEMELHANTES

Os denominados fatores de correção, aplicáveis às tabelas da Norma, devem respeitar as seguintes condições:

- a) Grupos de cabos semelhantes;
- b) Cabos igualmente carregados.

Cabos “semelhantes” são aqueles:

- Cujas capacidades de condução de corrente baseiam-se na mesma temperatura máxima para serviço contínuo;
- E cujas seções nominais estejam contidas no intervalo de três seções normalizadas sucessivas.

Portanto: não é admitida, em um mesmo grupo de condutores, a convivência de bitolas tais como: 1,5 / 2,5 / 6,0 mm². Estas bitolas não estão dentro de três seções normalizadas sucessivas, já que, depois de 2,5 mm² vem a bitola de 4 mm².

1.5.DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR NEUTRO

Pela NBR 5410/2004, alguns critérios básicos para o dimensionamento da seção mínima do condutor neutro estão contemplados no quadro abaixo.

	Circuito equilibrado Harm. < 15% (*)	Circuito equilibrado Harm. > 15% e <33%	Circuito equilibrado Harm. > 33% (**)
--	--	--	--

Seção do Neutro	< #F Tab. 1	= #F	>#F
-----------------	-----------------------	------	-----

Tabela 1

Seção dos condutores Fase (mm ²)	Seção mínima do condutor Neutro (mm ²)
$S \leq 25$	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
500	185

Harm. = taxa de 3ª harmônica e seus múltiplos

OBS.: Esta taxa de 33% vem do fato de que as correntes harmônicas múltiplas de 3 somam-se, por estarem em fase, e retornam pelo neutro, quando este existe. A corrente de neutro terá esse valor (33% = 1/3) multiplicado por 3, já que são três fases com correntes equilibradas. Isto dará 100% do valor da corrente da fase circulando pelo neutro.

(*) O condutor neutro deve ser protegido contra sobrecorrente; não necessariamente deve ser interrompido, mas sua corrente deve ser monitorada para que as fases sejam abertas em caso de sobrecorrente.

(**) Se a corrente no condutor neutro for maior que a no condutor fase (isto acontece para Harm. > 33%) => usar o “fator de correção de corrente de neutro” conforme **Tab. 2**.

Tabela 2

Taxa de 3ª Harmônica	Fator de correção (F_{cn})	
	Circuito trifásico com Neutro	Circuito com 2 Fases e Neutro
>33% a 35%	1,15	1,15
>35% a 40%	1.19	1,19

$$I_n = F_{cn} \times I_B$$

($I_B = I$ de projeto)

>40% a 45%	1,24	1,23
>45% a 50%	1,35	1,27
>50% a 55%	1,45	1,30
>55% a 60%	1,55	1,34
>60% a 65%	1,64	1,38
> 65%	1,63	1,41

Para um circuito trifásico, desequilibrado, mas sem harmônicas, a corrente do condutor neutro pode ser calculada por:

$$I_n = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - I_a \times I_b - I_c \times (I_a + I_b)}.$$

E o fator de agrupamento para o dimensionamento dos condutores fase pode ser considerado 0,86, independentemente do tipo de instalação.

Obs.: Um agrupamento com N condutores isolados, ou N cabos unipolares, pode ser considerado composto tanto de N/2 circuitos com dois condutores carregados quanto de N/3 circuitos com três condutores carregados.

EXEMPLO: Considere-se um circuito trifásico equilibrado, com neutro, com corrente nominal de 100 A, mas com conteúdo harmônico de terceira ordem e seus múltiplos igual a 42%. Pede-se calcular o valor da corrente retornando pelo neutro.

Solução: Seja $I_{h3x} = 0,42 \times I_L$. $\rightarrow I_N = 3 \times I_{h3x} = 3 \times 0,42 \times 100 = 126$ A.

De acordo com a terceira linha da Tab. 2, tem-se: $I_N = 1,24 \times 100$ A = 124 A. Isto corresponde a um valor médio para a faixa referida.

1.6.DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DE PROTEÇÃO

O condutor de proteção destina-se a escoar para a terra correntes de descargas estáticas, de descargas atmosféricas e de faltas diretas ou indiretas, além das correntes de fuga. Para que isto seja realizado, todas as partes metálicas da instalação devem ser interconectadas pelo condutor de proteção e aterradas. Isto se chama de equipotencialização de segurança.

O aterramento (a ser estudado mais à frente) é o sistema que garante uma efetiva ligação à terra, através do condutor de proteção e da equipotencialização. Uma efetiva ligação à terra significa que a resistência de aterramento seja de valores relativamente baixos, isto é, abaixo de 10 ohms.

1.7.CÁLCULO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO CONDUTOR DE PROTEÇÃO

Com base na teoria da energia específica (ou integral de Joule) máxima que pode circular por um condutor, e que deve ser limitada pelo dispositivo de proteção (DTM, por exemplo), para um tempo de atuação máximo de cinco (5) segundos, a seção transversal do condutor de proteção é dada por:

$$S_p = \frac{\sqrt{I_{ft}^2 \cdot T_e}}{K}$$

Onde: I_{ft}^2 é a corrente de falta direta à terra (curto-circuito monopolar); T_e é o tempo máximo de eliminação da falta; K é um fator característico do material do condutor, da isolação e da sua temperatura limite.

Os valores de K podem ser obtidos do quadro abaixo.

QUADRO 4.1

	PVC (t. final = 160°C)	EPR OU XLPE (t. final = 250°C)	Temp. inicial = 30°C para todas as situações.
--	----------------------------------	--	---

Condutor de proteção provido de isolamento e não incorporado em cabo multipolar e não enfeixado com outros cabos	$K = 143$ (até 300 mm ²) $K = 133$ (> 300 mm ²)	$K = 176$	----- -----
Condutor de proteção constituído por veia de cabo multipolar ou enfeixado com outros cabos ou condutores isolados	$K = 115$ (até 300 mm ²) $K = 143$ (> 300 mm ²)	$K = 143$	----- -----
Condutor de proteção nu onde não haja risco de danificação de qualquer material por sobre temperatura	Visível e em áreas restritas (t. máx. de 500°C) $K = 228$	Condições normais (t. máx. 200°C) $K = 159$	Risco de incêndio (t. máx. 150°C) $K = 138$
Seção mínima do condutor de proteção	# Fase ≤ 16 mm ² # Prot = # Fase	$16 < \# \text{ Fase} \leq 35$ mm ² # Prot = 16 mm ²	# Fase > 35 mm ² # Prot = 0,5 . # Fase

OBSERVAÇÕES:

1.1.1. Condutores de proteção nunca devem ser seccionados, inclusive o condutor PEN (= proteção + neutro) do sistema de aterramento TN-C.

1.1.2. Podem ser utilizados como condutor de proteção os seguintes elementos:

- Veias de cabos multipolares;

- Condutores isolados ou cabos unipolares num invólucro comum aos condutores vivos;
- Armações, coberturas metálicas ou blindagens de cabos;
- Eletrodutos metálicos e outros condutos metálicos desde que sua continuidade esteja garantida conforme normalização;
- PEN: somente fios ou cabos condutores devem ser utilizados nesta função;
- PEN: sempre de cobre e com bitola $\geq 10 \text{ mm}^2$;
- PEN: sempre separado (PE + N) a partir do ponto de entrada da instalação;
- PEN: separado após um DR (dispositivo diferencial-residual) não podem mais ser religados, pois o neutro estará isolado da terra e o de proteção continuará aterrado;
- Se o condutor de proteção não fizer parte do mesmo cabo ou do mesmo invólucro dos condutores fase, a sua seção não deverá ser inferior a:
 - $2,5 \text{ mm}^2$ se for protegido mecanicamente;
 - $4,0 \text{ mm}^2$ caso contrário.

EXEMPLO: Dimensionar a bitola de um condutor de proteção de um circuito de distribuição que liga um QGF a um CCM, sabendo-se que os condutores fase são de 70 mm^2 , isolados em PVC/70°C.

Solução: Conforme Quadro 4.1, tem-se: $S_p = 0,5.S_f = 0,5 \times 70 = 35 \text{ mm}^2$

Considerando-se a corrente de curto-circuito fase-terra da instalação como 9 kA, e o tempo de eliminação da falta como 70 milissegundos e que o condutor de proteção esteja no mesmo eletroduto dos condutores fase, tem-se: $K = 115$; $T_e = 0,07 \text{ s}$

$$S_p = \frac{\sqrt{I_{ft}^2 \cdot T_e}}{K} = \frac{\sqrt{9000^2 \times 0,07}}{115} = 20,7 \text{ mm}^2 \rightarrow \# \text{ PROTEÇÃO} = \# 25 \text{ mm}^2$$

1.8 DIMENSIONAMENTO POR QUEDA DE TENSÃO

Inicialmente é interessante estabelecerem-se os conceitos relativos a “queda de tensão” e “variação de tensão”.

- Queda de tensão: Redução de tensão, em relação à tensão nominal (V_{nom}) da origem da instalação, em um ponto determinado do circuito. Por exemplo: nos terminais de uma carga. É Normalizada. É para dimensionamento. Em caso de não conformidade → deterioração da instalação! **Exemplo**: desde os terminais secundários do transformador da Subestação → máximo de 7% de redução (NBR 5410/2004).
- Variação de tensão: Aumento/Redução de tensão, em relação à tensão nominal (V_{nom}), na origem da instalação. É Normalizada. É para fins operacionais. Em caso de não conformidade → Multa! **Exemplo**: Variação permitida pela Resolução ANEEL: tensão no ponto de entrega da instalação: rede de BT: mínima de 116 V (-8,67%); máxima: 132 V (+3,9%).

1.8.1 Observando o critério da queda de tensão

A verificação do correto dimensionamento de condutores deve incluir o critério da queda de tensão, que, como visto acima, é um critério de dimensionamento que busca garantir que a tensão nominal não caia demasiadamente no ponto final do circuito, a partir do ponto de entrega (caso de instalações alimentadas pela rede de BT: queda total de 5%) ou da origem da instalação para os demais casos (queda total de 7%).

Portanto: entre o início da instalação e o ponto de utilização (circuito terminal) a Norma NBR 5410 prevê os valores máximos de queda de tensão acima citados.

Algumas importantes observações podem ser feitas, a partir do que prescreve a Norma.

- 1.8.1.1 Utilize-se a corrente de projeto para o cálculo da queda de tensão, além de usar-se a tensão nominal no início da instalação;
- 1.8.1.2 Se houver conteúdo harmônico, este deve ser levado em conta no cálculo da corrente de projeto. Isto é: utilize-se a corrente eficaz total: componente fundamental e o conteúdo harmônico.
- 1.8.1.3 Na partida de motores, devido à elevada corrente de partida, a Norma aceita o limite de 10%, já que é um tempo muito curto de duração da queda de tensão. E sugere a consideração de fator de potência igual a 0,3.
- 1.8.1.4 Valores até maiores do que os 10% acima podem ser tolerados se as informações a respeito das características da instalação forem no sentido de que não há cargas sensíveis a tais valores de queda de tensão momentânea.

1.8.2 Queda de tensão em circuito monofásico

Para um circuito monofásico, a seção transversal (bitola) do condutor sob dimensionamento pode ser obtida pela expressão aproximada:

$$S_c = \frac{200 \cdot \rho \cdot \sum (L_c \cdot I_c)}{\Delta V \cdot V_{FN}} \text{ (mm}^2\text{)}$$

Onde:

ρ = resistividade do material do condutor; 1/56 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ para o cobre;

L_c = comprimento do circuito, desde a origem (V_{nom}) até o fim do circuito terminal (em metro);

I_c = corrente de projeto do circuito, em A;

ΔV_c = queda de tensão máxima, em %;

V_{FN} = tensão fase neutro, em V.

A expressão se justifica pelas seguintes observações:

- O valor 200 refere-se ao produto de 100 (para compensar a entrada do valor de queda de tensão em %) pelo valor 2 (referindo-se ao

comprimento total do circuito, já que o condutor fase e o neutro – retorno – têm o mesmo comprimento, L_c , e terão igual bitola).

- O somatório, que é uma aproximação, deve ser aplicado por acumulação do comprimento. Isto é: a corrente de cada ramal (I_c) é multiplicada pela soma dos comprimentos dos trechos anteriores.

A Fig. 6 esclarece a observação sobre a acumulação do comprimento.

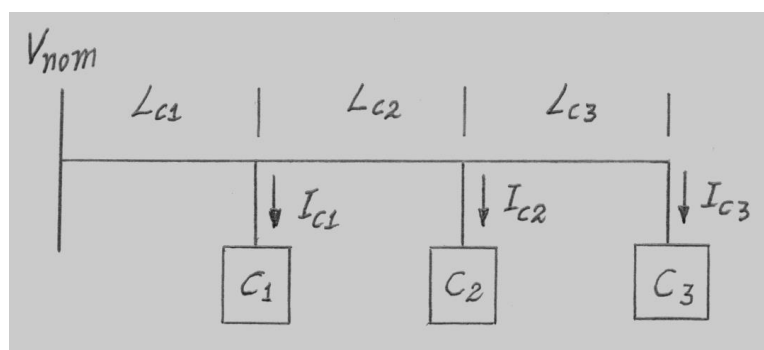


FIG. 6 – ACUMULAÇÃO DO COMPRIMENTO NA EXPRESSÃO DA QUEDA DE TENSÃO MONOFÁSICA.

Conhecendo-se, antecipadamente, a bitola do condutor, a queda de tensão correspondente (em %), para um circuito monofásico, pode ser calculada, de forma aproximada, a partir da expressão:

$$\Delta V_c = \frac{2 \cdot L_c \cdot I_c \cdot (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi)}{10 \cdot V_{FN}} (\%)$$

Onde:

L_c = comprimento do circuito, desde a origem (V_{nom}) até o fim do circuito terminal (em metro);

I_c = corrente de projeto do circuito, em A;

ΔV_c = queda de tensão calculada, em %;

V_{FN} = tensão fase neutro, em V;

R = resistência do condutor em $m\Omega/m$;

X = reatância do condutor em $m\Omega/m$;

ϕ = ângulo do fator de potência da carga (ou da impedância equivalente da carga).

Esta expressão é, de fato, aproximada. A expressão exata pode ser deduzida a partir da análise da Fig. 7.

A queda de tensão é considerada como sendo o valor em módulo da diferença entre as tensões V_1 (valor nominal no início da instalação) e V_2 (no ponto terminal). Portanto, não se trata de calcular a diferença vetorial ΔV (Vide Fig. 7).

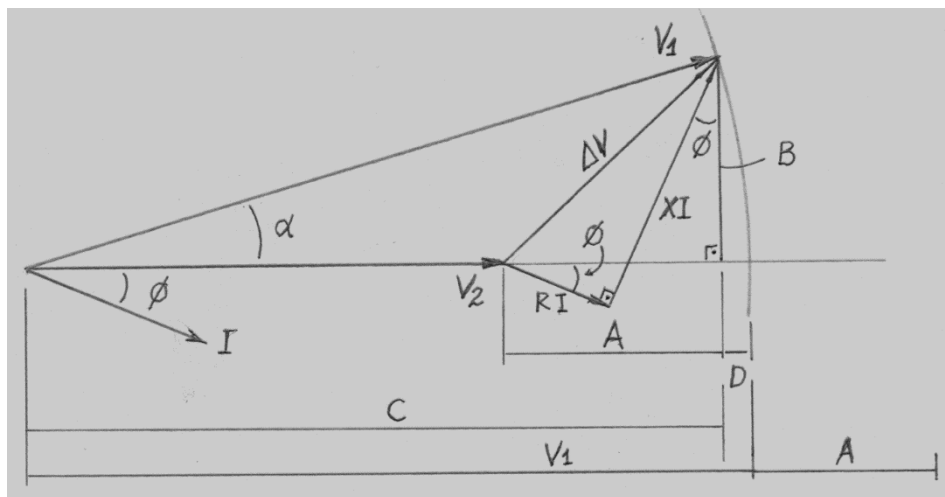


FIG. 7 – DIGRAMA FASORIAL PARA DEDUÇÃO DA QUEDA DE TENSÃO DE UM CIRCUITO.

Com base, portanto, na Fig. 7, têm-se as seguintes expressões para o valor exato da queda de tensão (em V) no circuito monofásico:

$$\Delta V_c = A + D$$

$$A = 2 \cdot L_c \cdot I_c \cdot (R \cdot \cos \phi + X \cdot \sin \phi)$$

$$D = V_1 - C$$

$$C = \sqrt{V_1^2 - B^2}$$

$$B = 2 \cdot L_c \cdot I_c \cdot (X \cdot \cos\phi + R \cdot \sin\phi)$$

Verifica-se que, o valor aproximado acima desconsidera o valor do termo D, fazendo-o igual a zero. A queda de tensão resulta, então, igual ao valor A.

1.8.3 Queda de tensão em circuito trifásico

Para um circuito trifásico, a seção transversal (bitola) do condutor sob dimensionamento pode ser obtida pela expressão aproximada:

$$S_c = \frac{100 \cdot \rho \cdot \Sigma(L_c \cdot I_c)}{\Delta V \cdot V_{FN}} \text{ (mm}^2\text{)}$$

Onde as variáveis são as mesmas acima. Observe-se, no entanto, que, neste caso trifásico, o somatório das três correntes de fase iguala-se a zero, para o caso supostamente equilibrado, e não há corrente de retorno, pelo neutro, não havendo, portanto, a multiplicação pelo fator 2, como no caso monofásico.

A Fig. 6 (acima) esclarece a observação sobre a acumulação do comprimento, igualmente para o caso trifásico.

Conhecendo-se, antecipadamente, a bitola do condutor, a queda de tensão correspondente (em %) pode ser calculada, de forma aproximada, a partir da expressão:

$$\Delta V_c = \frac{L_c \cdot I_c \cdot (R \cdot \cos\phi + X \cdot \sin\phi)}{10 \cdot V_{FN}} \text{ (\%)}$$

Esta expressão é semelhante àquela para o caso monofásico, com a diferença de que não há o fator 2 no numerador, já que não há corrente retornando pelo neutro, como no caso monofásico.

1.9 DIMENSIONAMENTO POR CAPACIDADE DE CURTO-CIRCUITO

Para o dimensionamento final dos condutores de um circuito a verificação da capacidade de condução de correntes de curto-circuito é imprescindível. Dois critérios devem ser utilizados para tal verificação: a) seção mínima do condutor frente a determinada corrente de curto-circuito; b) comprimento máximo do circuito frente a essa mesma corrente.

1.9.1 Seção mínima do condutor frente a determinada corrente de curto-circuito

Com base em ábacos disponibilizados pelos fabricantes de cabos elétricos a mínima seção do condutor fase de um circuito pode ser determinada. Nesses ábacos são relacionadas a intensidade de corrente de curto-circuito e a seção mínima correspondente, tendo como parâmetro o tempo máximo que o dispositivo de proteção necessitará para eliminar a falta (em ciclos da frequência da rede elétrica).

As figuras da página seguinte (Fig. 8 e Fig. 9) ilustram ábacos, respectivamente, para isolamento PVC (70°C) e EPR/XLPE (90°C).

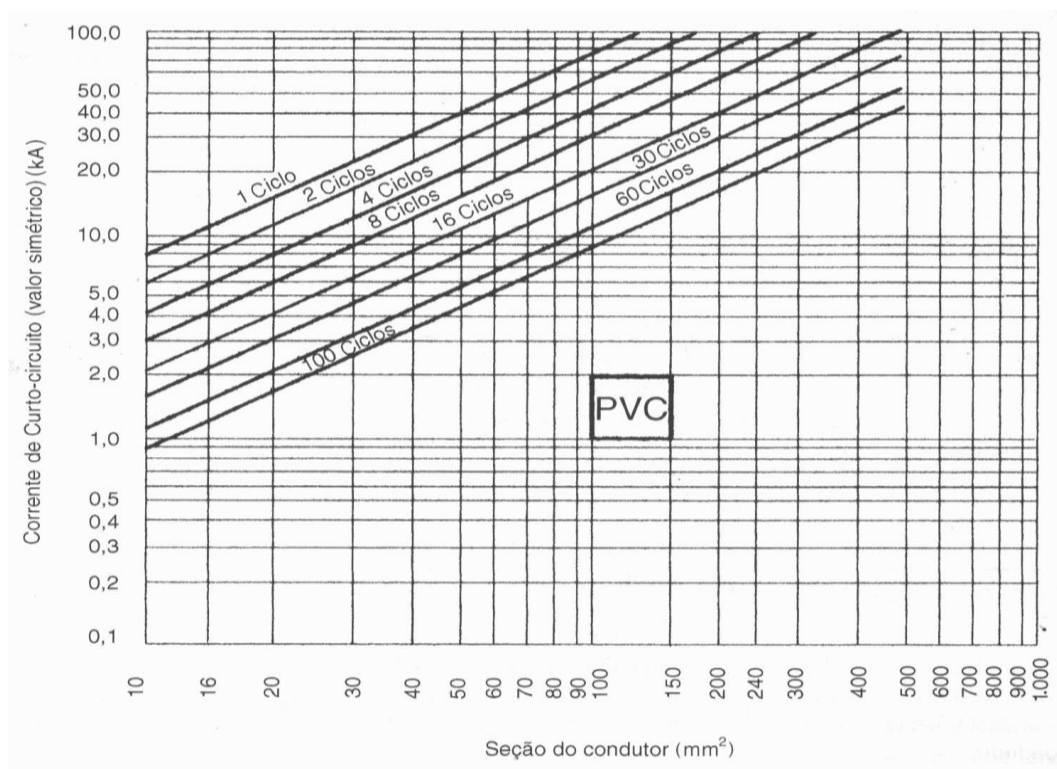


FIG. 8 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO VERSUS SEÇÃO MÍNIMA DO CONDUTOR: PVC.

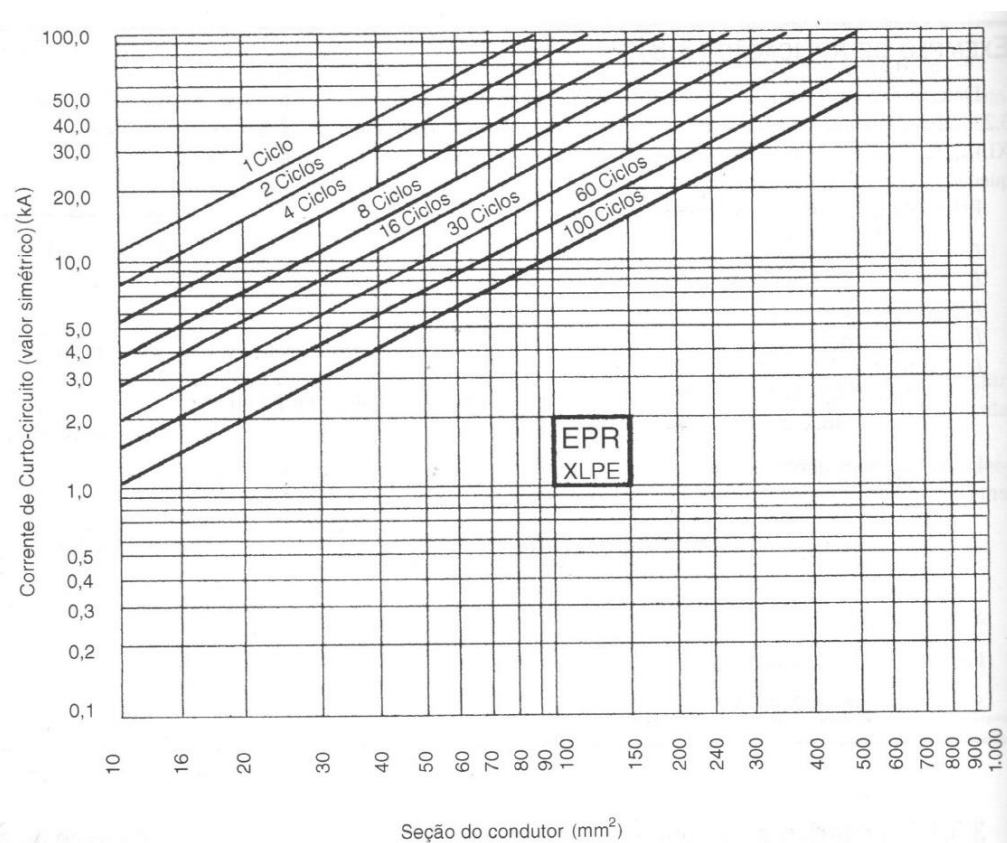


FIG. 9 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO VERSUS SEÇÃO MÍNIMA DO CONDUTOR: EPR/XLPE.

Conhecidos dois dos três parâmetros (corrente, seção e tempo), o terceiro fica determinado. A expressão a seguir é a base para a confecção dos ábacos acima.

$$S_c = \frac{\sqrt{T_e} \cdot I_{cs}}{0,34 \times \sqrt{\log \left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i} \right)}}$$

Onde:

I_{cs} = corrente de curto-circuito simétrica (kA);

T_e = tempo de eliminação da falta direta (s);

T_f = Temperatura máxima de curto-circuito suportada pela isolamento (°C);

T_i = Temperatura máxima em regime contínuo (°C);

A temperatura máxima em regime contínuo corresponde à temperatura atingida pelo condutor quando percorrido por sua máxima corrente (I_z) nas condições da instalação: PVC = 70°C; EPR/XLPE = 90°C. As temperaturas máximas de curto-circuito para essas isolações são: PVC = 160°C; EPR/XLPE = 250°C.

1.9.2 Comprimento máximo do circuito frente a determinada corrente de curto-circuito

Conhecida a corrente de curto circuito mínima no fim de um circuito terminal – os terminais de um motor, por exemplo –, além da bitola do condutor, calculada pelo critério da ampacidade, pode-se calcular o comprimento máximo dos condutores do circuito tal que essa corrente mínima seja garantida para a devida atuação do disjuntor no tempo previsto.

A expressão para o cálculo desse comprimento máximo é:

$$L_c = \frac{\frac{0,95 \times V_L}{\sqrt{3} \times I_{ft}} |Z_{mp}|}{\frac{2 \times Z_{jp}}{1.000}} \quad (\text{m})$$

Tem-se:

V_L = Tensão de linha da origem do circuito (V);

I_{ft} = Corrente de curto-circuito fase-terra, mínima (A);

$|Z_{mp}|$ = Módulo da impedância (em Ω) entre a origem da instalação e o CCM (ponto onde se localiza o dispositivo de proteção), isto é: a montante da proteção (índice mp);

z_{jp} = impedância específica (em $\text{m}\Omega/\text{m}$) entre o CCM e o final do circuito, cujo comprimento deve ser limitado; isto é: a jusante da proteção (índice jp).

Para melhor compreensão da equação acima, pode-se recorrer à Fig. 10.

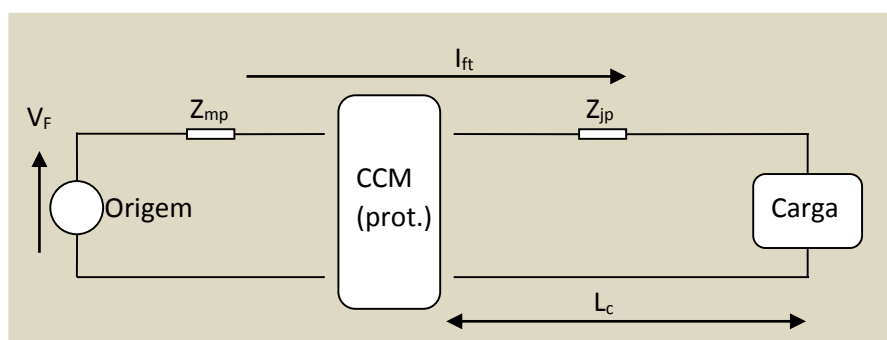


FIG. 10 – DIAGRAMA MONOFÁSICO EQUIVALENTE PARA O CÁLCULO DO COMPRIMENTO MÁXIMO EM SITUAÇÃO DE CURTO-CIRCUITO.

Comentando sobre os elementos da expressão de L_c :

O valor 0,95 aplica-se para levar em conta a mínima tensão do circuito, em relação ao valor nominal; esta tensão corresponderá à menor corrente de curto-circuito para determinada impedância do circuito.

A expressão está baseada no cálculo da corrente de curto-circuito fase-terra, dada por:

$$I_{ft} = \frac{0,95 \cdot V_F}{Z_T}$$

Onde: Z_T = impedância total de curto-circuito desde a fonte (QGF) até o ponto extremo do circuito (terminais do motor, ou da carga). E esta é constituída por:

$$Z_T = Z_{mp} + Z_{jp}$$

E Z_{jp} é dada por:

$$Z_{jp} = 2 \cdot L_c \cdot z_{jp}$$

Em que: z_{jp} é a impedância específica a jusante da proteção. A partir dessas relações, obtém-se a expressão para o comprimento máximo, dado acima. Utilizando-se um comprimento maior que o máximo, a impedância total será maior que a mínima que assegure a mínima corrente de curto-circuito. E esta corrente de curto-circuito sendo menor que a mínima presumida, não sensibilizará o disjuntor (ou o relé) para atuar diante de uma corrente de curto, passando a atuar como uma corrente de sobrecarga, que terá um tempo maior que aquele correspondente a correntes de curto-circuito. E isto pode ser perigoso para a integridade dos condutores.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO III

DIMENSIONAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

1. CARACTERÍSTICAS NOMINAIS DE MOTORES DE INDUÇÃO

As principais características nominais de um motor de indução estão definidas e comentadas abaixo.

1.1.Tensão nominal

Motores industriais são alimentados, normalmente, por tensões de 220V, 380V, 440V e 660V. Essas tensões nominais não devem sofrer variações maiores que $\pm 10\%$.

1.2.Potência nominal

É a potência desenvolvida pelo motor e entregue à sua carga através do torque e da velocidade de seu eixo. É dada nas unidades cv (cavalo vapor = 0,736 kW), HP (Horse Power = 0,746 kW) ou em kW (quilowatt). A potência drenada da rede elétrica, portanto, é maior que a potência nominal do motor, sendo calculada a partir do conhecimento do rendimento do motor.

1.3.Corrente nominal

E a corrente drenada da rede elétrica sob condições de tensão e potência nominais do motor. É calculada a partir das relações conhecidas entre potência aparente, tensão e corrente: $S = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L$.

A expressão que calcula a corrente nominal é, portanto:

$$I_{nom} = \frac{736.P_{nom}}{\sqrt{3}.V_L.\eta.\cos\phi} \quad (A)$$

Onde:

V_L = tensão de linha nominal;

P_{nom} = potência nominal (em cv);

η = rendimento do motor;

$\cos(\Phi)$ = fator de potência do motor, sob carga nominal.

1.4.Classes de isolamento

São letras normalizadas associadas às temperaturas máximas das isolações utilizadas nos enrolamentos de motores elétricos. As principais classes de isolamento são: A, E, e B. A corresponde à temperatura de 105°C; E, à temperatura de 120°C, e B, à temperatura de 130°C. Essas temperaturas não devem ser ultrapassadas, no regime de funcionamento do motor, para que seja garantida sua longa vida útil. Toda vez que a temperatura da classe de isolamento for ultrapassada, a vida útil decai significativamente, podendo, inclusive, levar à queima precipitada do motor. Por exemplo, se um motor de Classe A funcionar em temperatura contínua de 120°C terá sua vida útil diminuída de 50 000 horas para cerca de 10 000 horas.

1.5.Conjugado mecânico

Conhecido, também, como torque, é equivalente à força tangencial aplicada a um eixo rotacional. A potência desenvolvida pelo eixo do motor é equivalente ao produto do torque pela sua velocidade rotacional. O conjugado é normalmente dado em unidades N.m (Newton.metro) ou kgf.m (quilograma-força.metro).

A curva característica de torque versus velocidade (ou escorregamento) é dada na Fig. 11.

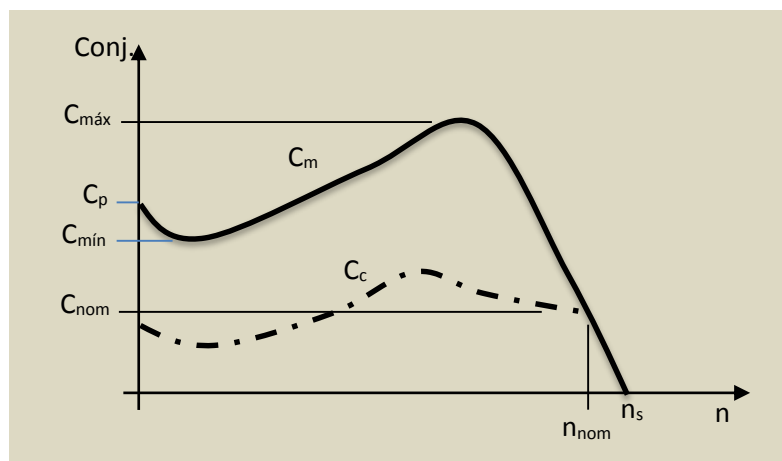


FIG. 11– CURVA CARACTERÍSTICA DE TORQUE X VELOCIDADE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.

Nesta figura verifica-se que o motor desenvolve, desde a partida até a situação de velocidade nominal, vários torques: C_p = torque de partida; $C_{máx}$ = torque máximo; $C_{mín}$ = torque mínimo; e C_{nom} = torque nominal, para carga nominal. Em termos de velocidade, podem-se citar a velocidade síncrona, nunca atingida pelo motor de indução (mas própria do motor síncrono trifásico), e a velocidade nominal, correspondente à carga nominal.

O conjugado de aceleração instantâneo corresponde à diferença instantânea (a cada instante de tempo durante o processo de partida) entre o conjugado do motor e o conjugado da carga (C_c , na Fig. 1.5). Quanto maior esta diferença, mais rapidamente o motor acelera e em menor tempo ocorre o estabelecimento da velocidade operacional (que pode ser menor ou maior do que a velocidade nominal).

Para um cálculo aproximado, pode-se definir um conjugado médio do motor e um conjugado médio da carga. A diferença entre esses dará o conjugado médio de aceleração, e um tempo aproximado de aceleração poderá ser calculado.

O conjugado médio para os motores da categoria N e H é dado pela expressão:

$$C_{mm} = 0,45. (C_p + C_{m\acute{a}x})$$

E para os de categoria D:

$$C_{mm} = 0,60. C_p$$

Essas categorias de conjugado estão ilustradas na Fig. 1.5.1.

Esta figura mostra que os motores podem ser construídos com variações nos valores de sua resistência rotórica, resultando motores com elevados torque de partida quando a resistência rotórica é feita de valor elevado.

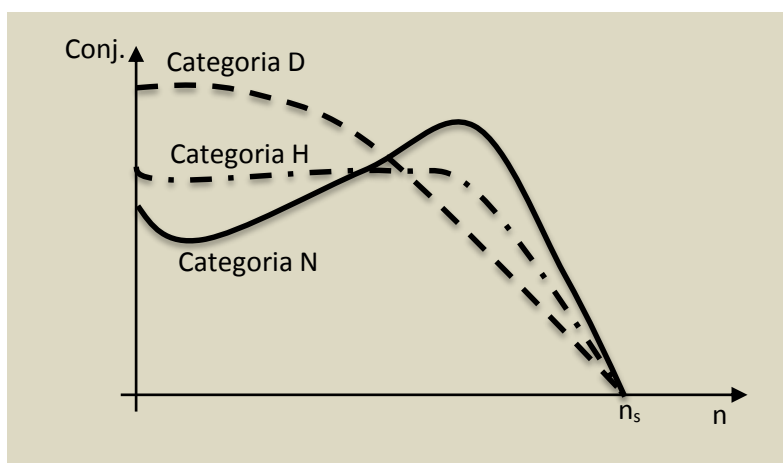


FIG. 12 – CATEGORIAS DE CONJUGADO DE MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.

1.5.1. Expressões para conjugados de carga

A potência nominal de um motor é calculada, para efeito de seu dimensionamento, em função da característica de torque resistente da carga. Igualando-se, portanto, a potência do motor à potência exigida pela carga e considerando-se o rendimento do equipamento correspondente a essa carga, obtém-se a potência mínima necessária a ser desenvolvida pelo eixo do motor.

1.5.1.1. Bomba centrífuga

A bomba centrífuga pode ter a potência em seu eixo de entrada como dada por:

$$P_b = \frac{9,8.Q.\gamma.H}{\eta} \text{ (kW)}$$

Onde:

$\gamma = 1 \text{ kg/dm}^3$, é a densidade específica da água;

η = rendimento da bomba: $0,87 \leq \eta \leq 0,90$ (para bombas a pistão); $0,40 \leq \eta \leq 0,70$ (para bombas centrífugas);

Q = vazão d'água;

H = altura da coluna d'água (recalque + elevação).

Esta expressão está baseada na expressão para a potência hidráulica: $P_H = 9,8.Q.\gamma.H$. O rendimento da bomba é utilizado para elevar a sua potência de entrada. Esta deverá vir do motor. Portanto, o motor deverá desenvolver potência mínima igual à expressão para a potência da bomba (P_b).

Observe-se que o sistema motor–bomba pode ser entendido, também, como um sistema de fluxo inverso, isto é: bomba–gerador. Neste caso, a bomba estará sendo acionada como uma turbina hidráulica, pela vazão de água a ela imposta, e esta acionará o gerador, que receberá potência pelo seu eixo e produzirá potência elétrica em seus terminais.

1.5.1.2. Elevador de carga

O elevador de carga tem sua potência dada pela expressão:

$$P_e = \frac{C.V}{102.\eta} \text{ (kW)}$$

Onde:

$\eta \cong 0,70$, é o rendimento do sistema elevador de carga;

V = velocidade em m/s $\Rightarrow 0,5 \leq V \leq 1,5$ m/s (elevadores de pessoas); $0,4 \leq V \leq 0,6$ m/s (elevadores de carga);

C = massa sendo elevada (kg);

V = velocidade linear da elevação (m/s).

102 = fator que surge em função da necessidade de multiplicar-se o numerador pela constante de aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) e para ajustar a potência em kW.

1.5.1.3. Compressor

A potência no eixo de um compressor é dada pela expressão:

$$P_c = \frac{2.\pi.\omega_c.C_{nc}}{1000.\eta_{ac}} \text{ (kW)}$$

Onde:

ω_c = velocidade nominal do compressor, em rps;

$\eta_{ac} \cong 0,95$ (rendimento do acoplamento);

C_{nc} = conjugado nominal do compressor (em m.N);

$2.\pi$ = fator necessário para converter a entrada em rps para rad/s;

1000 = fator para ajustar o valor de saída em kW.

1.5.1.4. Ventilador

Para o caso de um ventilador, a potência pode ser calculada pela expressão:

$$P_v = \frac{Q.P}{1000.\eta} \text{ (kW)}$$

Onde:

Q = vazão do ventilador em m^3/s ;

P = pressão do fluido em N/m^2 ;

η = rendimento do ventilador: $0,50 \leq \eta \leq 0,80$ – para ventiladores com $P > 400 \text{ mmHg}$; $0,35 \leq \eta \leq 0,50$ – para ventiladores com $100 \leq P \leq 400 \text{ mmHg}$; $0,20 \leq \eta \leq 0,35$ – para ventiladores com $P < 100 \text{ mmHg}$;

1000 = fator para ajustar unidade de saída em kW.

Obs.: No caso de um dimensionamento para estudo, pode-se utilizar qualquer rendimento. Mas no caso de um projeto real, os valores do rendimento devem ser obtidos por meio da folha de especificação do ventilador, de responsabilidade do fabricante.

1.6.Elevação de temperatura nos motores

Somente os grandes motores têm sensores incorporados em seus enrolamentos estatóricos para efeito de monitoramento de sua temperatura. Esta deve ser objeto de cuidados para que não seja ultrapassada a temperatura máxima da classe de isolamento do motor. Os sensores são denominados de **termostatos** (componentes bimetálicos com base em duas lâminas de coeficientes de dilatação diferentes), **termorresistores** (componentes metálicos à base de cobre, platina e níquel, com coeficientes positivos de temperatura) e **termistores** (componentes semicondutores com variação abrupta de sua resistência sob determinada temperatura: podem ser PTC = *positive temperature coefficient*, e NTC = *negative temperature coefficient*).

Na falta de sensores integrados aos motores, as expressões abaixo podem ser utilizadas para cálculos aproximados da temperatura média (T) dos enrolamentos estatóricos e para determinação da elevação de temperatura do motor, ΔT , desde a sua temperatura inicial, ambiente.

$$T = \frac{R_q}{R_f} (235 + T_f) - 235 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$\Delta T = \frac{R_q - R_f}{R_f} (235 + T_f) \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Onde:

R_q = resistência a quente do enrolamento estatóricos, em ohms;

R_f = resistência a frio do enrolamento estatóricos, em ohms;

235 = constante (em $^\circ\text{C}$) referente ao cobre.

As expressões acima baseiam-se no gráfico da Fig. 13, que expressa a variação da resistência de materiais condutores, como o cobre e o alumínio, com a temperatura.

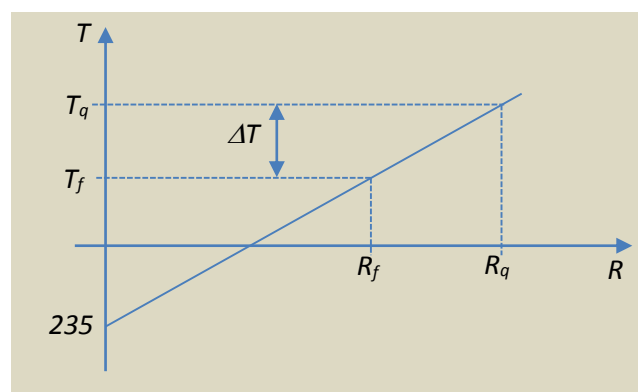


FIG. 13 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM A TEMPERATURA, PARA O COBRE.

1.7. Característica de potência constante dos motores de indução trifásicos

Os motores de indução trifásicos apresentam característica de potência constante quando acionam suas cargas através da rotação de seu eixo. Isto se explica pela conhecida relação entre potência, torque e velocidade.

$$P_m = T \cdot \omega$$

Esta relação mostra que, para uma dada tensão aplicada, a potência desenvolvida pelo eixo do motor dependerá do torque da carga – que é igual ao desenvolvido pelo motor, em regime permanente – e de sua velocidade. Como o torque da carga pode ser considerado constante, no seu ponto de operação estável, e a velocidade do motor depende apenas da frequência da rede, a potência drenada pelo motor da rede elétrica será aproximadamente constante.

Uma tensão mais baixa, momentaneamente, ou uma falta de fase, provocará, portanto, um acréscimo da corrente de linha, já que a potência do motor não deverá variar significativamente. Isto caracterizará uma situação de corrente de sobrecarga, o que, dependendo do ajuste da proteção do motor, poderá desligá-lo.

No caso particular de uma falta de fase, o motor operará como se fosse bifásico e a relação a seguir se aplicará – para potência considerada inalterada após a falta da fase.

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_{3\phi} = P_{2\phi} = V_L \cdot I_{2\phi}$$

Desta relação, resulta que as correntes passam a ter a seguinte relação:

$$I_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot I_{3\phi}$$

Conclui-se, então, que a corrente drenada, pelo motor, da rede elétrica será cerca de 73% superior à corrente nominal de linha (trifásica) do motor.

2. ALGUNS ASPECTOS SOBRE CARGAS ACIONADAS

Dependendo da carga ligada ao eixo do motor, isto é, acionada por este, o motor terá maior ou menor dificuldade para partir da velocidade zero à velocidade nominal. Isto se deve ao momento de inércia que a carga apresente ao motor, definindo, assim, variados tempos de aceleração do motor. Além desses, outros aspectos estão comentados a seguir.

2.1.Momento de inércia do motor e da carga

O momento de inércia da carga é, normalmente, muitas vezes superior ao momento de inércia próprio do motor. A expressão a seguir é uma possibilidade para calcular-se o momento de inércia máximo que uma carga (J_c) pode oferecer ao eixo do motor.

$$J_c = 0,04 \cdot P_{nm}^{0,9} \cdot N_p^{2,5} \quad (\text{kg.m}^2)$$

Onde:

P_{nm} = potência nominal do motor, em kW;

N_p = número de pares de polos.

2.2.Carga conectada por meio de polia

Considerando-se um motor conectado à sua carga por meio de um sistema de polias (caixa redutora), tem-se a seguinte expressão para calcular-se a inércia da carga em relação ao motor (J_{cm}) .

$$J_{cm} = J_c \left(\frac{\omega_c}{\omega_m} \right)^2 \quad (\text{kg.m}^2)$$

Onde:

J_c = momento de inércia da carga acionada pelo motor via sistema de redução (kg.m^2);

ω_c = velocidade de rotação da polia ligada à carga;

ω_m = velocidade de rotação da polia ligada ao motor.

Esta expressão de um acionamento mecânico envolvendo os momentos de inércia de um lado e de outro de um acoplamento de redução pode ser comparado à relação entre as impedâncias de um lado e de outro de um transformador. Assim têm-se as duas relações:

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot Z_2$$

$$J_1 = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 \cdot J_2$$

Observe-se que a razão de velocidades está invertida, em relação ao caso das impedâncias, em virtude de que são, de fato, trocadas as relações entre impedâncias e número de espiras (N) e momento de inércia e velocidades. De fato:

$$Z_1 > Z_2 \rightarrow N_1 > N_2; \quad J_1 < J_2 \rightarrow \omega_1 > \omega_2$$

Portanto, recorrendo-se à analogia do sistema mecânico com o elétrico, fica explicada a expressão mecânica acima. De outra maneira, associando-se as velocidades angulares com as correntes I_1 e I_2 , tem-se uma comparação até mais direta!

2.3.Tempo de aceleração de cargas

Para o cálculo aproximado do tempo de aceleração de um motor (T_{ac}), tendo uma carga com momento de inércia conhecido ligada ao seu eixo, pode-se utilizar a seguinte expressão.

$$T_{ac} = \frac{J_{mc} \cdot \Delta\omega}{94 \cdot C_{ac}}$$

Onde:

J_{mc} = momento de inércia conjunto motor + carga (kg.m²);

$\Delta\omega$ = variação de velocidade de zero à nominal (pode ser considerada outro intervalo), em rpm;

C_{ac} = conjugado de aceleração (kgf.m);

94 = fator de adaptação de entrada de unidades = $60 \times 9,81 / 2 \cdot \pi$

O conjugado de aceleração pode ser obtido a partir das curvas conjugado versus escorregamento (ou velocidade) tanto para o motor como para a carga, fornecidas pelos fabricantes. Dessas curvas obtêm-se os valores médios de conjugado do motor (C_{mm}) e da carga (C_{mc}). Daí tem-se: $C_{ac} = C_{mm} - C_{mc}$.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO IV

MELHORIA DO FATOR DE POTÊNCIA

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em termos de fator de potência, pode-se distinguir entre correção – o fato de se elevar o seu valor para o mínimo exigido por Lei –, ou melhoria – o fato de ajustar o seu valor ao mais adequado ao sistema elétrico em foco. Neste último caso, melhoria do fator de potência, inclui-se a liberação de potência em transformadores e alimentadores por meio do cálculo de potência reativa a ser instalada no local adequado, utilizando-se de bancos de capacitores.

A seguir alguns aspectos sobre a melhoria do fator de potência.

2. EQUIPAMENTO FUNCIONANDO EM VAZIO

Se um equipamento, como um transformador ou um motor, estiver funcionando em vazio ou, mesmo, com pouca carga, o seu fator de potência fica baixo e prejudica o fator de potência da instalação elétrica. No caso de um transformador que necessite estar energizado mas com pouca carga – horário noturno, por exemplo, pode-se melhorar o seu baixo fator de potência, elevando-o para o valor unitário, por meio da instalação de um banco de capacitores com potência reativa total (Q_{tc}) dada por:

$$Q_{tc} = \sqrt{\left(\frac{I_o}{I_{nt}} \cdot P_{nt}\right)^2 - P_{p0}^2}$$

Onde:

P_{nt} = potência aparente nominal do transformador (kW);

P_{p0} = potência de perdas em vazio (kW);

I_0 = corrente de magnetização do transformador;

I_{nt} = corrente nominal do transformador.

A potência reativa está sendo calculada a partir da fração da potência aparente nominal que está sendo, efetivamente, solicitada da rede, descontada da potência ativa de perdas em vazio. Esta é a única potência ativa que está sendo solicitada da rede.

3. FATOR DE POTÊNCIA NA PARTIDA DE MOTORES

O estudo da partida de motores elétricos de indução trifásicos é importante porque está associado a problemas de queda de tensão. Isto é, devido às elevadas correntes de partida de motores, quedas significativas de tensão podem ocorrer no circuito correspondente, afetando, possivelmente, outros equipamentos no mesmo circuito.

A Norma NBR 5410/2004 estabelece um limite de 10% de queda de tensão em circuitos que estejam submetidos a partidas de motores elétricos. É claro, que, quanto maior for a potência do motor, maior será a corrente de partida, seu tempo de duração e a queda de tensão associada. A mesma Norma sugere a utilização de um fator de potência de 30%, indutivo, para os cálculos da corrente durante a partida do motor.

Esta sugestão de uso de um fator de potência tão baixo se justifica. De fato, durante a partida de um motor trifásico de indução o circuito monofásico equivalente é semelhante ao circuito correspondente ao cálculo de um curto-circuito. Isto significa que o circuito é predominantemente indutivo, fazendo com que o fator de potência refletido no estator seja muito baixo. Para melhor compreensão dessa afirmativa, deve-se lembrar que, no instante inicial da partida (situação de rotor bloqueado), o circuito rotórico fica submetido à

maior frequência induzida (60Hz), cujo valor vai diminuindo à medida que o rotor ganha velocidade. Em torno da velocidade nominal, têm-se valores muito baixos de frequência rotórica – alguns por cento da frequência da rede. É devido a essa alta frequência que o circuito equivalente monofásico do rotor, durante a partida, é representado por uma elevada impedância indutiva, já que a sua resistência não varia com a frequência. Tem-se, então, para esta impedância:

$$Z_p = R_2 + j.X_2$$

Onde:

R_2 = resistência rotórica (invariável com a frequência induzida);

X_2 = reatância rotórica na partida (função da frequência induzida);

Pode-se estabelecer, ainda, a seguinte relação:

$$X_r = s.X_2$$

Onde:

X_r = reatância rotórica (variável);

s = escorregamento do motor (variável).

Verifica-se, finalmente, que para o valor $s = 1$, que corresponde ao valor do escorregamento do motor na partida, tem-se $X_r = X_2$. Na partida, portanto, a impedância apresenta um grande ângulo ($\phi = \tan^{-1}(X_2/R_2)$), o que faz com que o fator de potência deva ser considerado, realmente, um valor baixo, conforme sugere a Norma. Finalmente, se o fator de potência na partida for considerado, para o cálculo da corrente de partida, o seu valor nominal (valor elevado), a corrente de partida e sua correspondente queda de tensão resultariam exageradamente elevadas, o que não seria correto fazer.

4. LIBERAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA

A melhoria do fator de potência de uma instalação, além de satisfazer à legislação e melhorar as quedas de tensão no alimentador, tem, como consequência interessante e econômica, a liberação de potência ativa de um transformador ou de um alimentador.

Isto se explica pelo seguinte raciocínio, aliás, decorrente do próprio conceito e fator de potência. Se um equipamento, um transformador por exemplo, tem 100 kVA de potência nominal e está operando em plena carga com um fator de potência, visto pelo seu secundário, igual a 85%, indutivo. Isto significa que, embora plenamente carregado, ainda há uma folga para fornecimento de potência ativa, já que nem toda a potência transferida através do equipamento é ativa: há um percentual de 52,7% de potência reativa (52,7 kvar)! – O leitor pode conferir com facilidade.

É esta folga que permite ao técnico calcular a quantidade de potência reativa que um banco de capacitores deverá fornecer, sendo ligado em paralelo aos terminais secundários do transformador. Utilizando-se o método analítico, que tem por base o triângulo de potências (ou de correntes, para o caso de um alimentador), pode-se definir essa quantidade de potência reativa do banco de capacitores. Levando-se em conta que a potência ativa do equipamento seja igual à sua capacidade nominal (em kVA), e seu fator de potência final seja unitário, calcula-se a nova potência reativa total a ser solicitada do transformador. Atente-se para o fato de que a nova carga, se for um motor, solicitará potências tanto ativa quanto reativa! Após o cálculo dessa nova potência reativa total, tem-se esse valor como sendo o do banco de capacitores a ser ligado.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO V

CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

1. FORMAS DE ONDA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

A forma de onda de uma corrente de curto-circuito é caracterizada, basicamente, pelo seu circuito equivalente de Thevenin e pelo instante em que ocorre, com relação à senoide da tensão da fonte. Será analisada apenas a corrente para uma fase do sistema trifásico, já que um curto-circuito trifásico é considerado equilibrado. E será considerada a pior situação de curto-circuito trifásico.

1.1. Equivalente de Thevenin

O equivalente de Thevenin é o circuito básico definido pela tensão da fonte que provocará a circulação da corrente de curto-circuito em série com a impedância de curto-circuito. Esta é a impedância total que limitará a intensidade da corrente de curto-circuito e que é determinada pela soma das impedâncias entre o gerador e o ponto de ocorrência do curto-circuito.

A Fig. 14 ilustra o circuito equivalente, monofásico, correspondente a uma situação de ocorrência de curto-circuito trifásico em uma linha de transmissão.

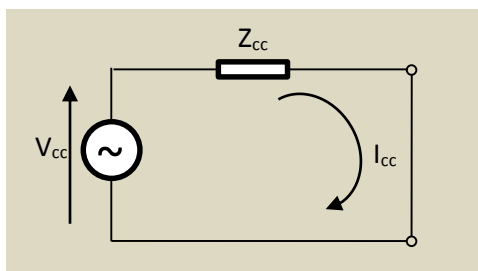


FIG. 14 – CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN PARA CURTO-CIRCUITO.

Por meio dos valores desse circuito equivalente, pode-se calcular a intensidade da corrente de curto-circuito em regime permanente, isto é, na hipótese de que essa corrente permaneça por tempo suficiente para estabilizar-se.

1.2. Instante em que ocorre o curto

O instante em que ocorre o curto-circuito é decisivo para a definição da forma de onda da corrente resultante. Este instante pode ser definido como um ângulo, a partir do início da senoide de tensão, em que ocorre o curto-circuito, isto é, o ângulo ($\alpha = \omega.t$) em que se inicia a corrente de curto.

Será verificado que a pior situação de qualquer curto-circuito será quando o ângulo α for nulo, isto é, quando o curto-circuito ocorrer no instante inicial da senoide de tensão. Isto se justifica pelo fato de que uma componente de corrente contínua (DC ou *off set*) aparecerá, necessariamente, quando o ângulo α for diferente do ângulo da impedância de curto-circuito (ϕ). E quando o ângulo de ocorrência do curto coincidir com o ângulo ϕ ,

Esta afirmação acima está de acordo com a seguinte constatação. Se o curto-circuito ocorrer no exato momento do ângulo da impedância de curto-circuito (ϕ), a forma de onda da corrente de curto terá somente sua componente de regime permanente, uma vez que a corrente já se iniciará com o defasamento correto entre tensão e corrente. A equação da corrente de curto-circuito para o circuito da Fig. X.1, esclarece esta situação, pois pode ser dada por (Ver: ARAGÃO FILHO, W. C. P. de. **Eletrônica de potência I – Retificadores monofásicos e trifásicos**. Ed. do Autor, Vitória – ES, 1.ed, 2012, p. 28):

$$i_c(\omega t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{cc}}{\sqrt{R^2 + X^2}} \left[\sin(\omega t - \phi) + \sin(\phi - \alpha) \cdot e^{-(t - \alpha/\omega)/\tau} \right] \quad \text{ou} \quad i_c(\omega t) = i_2(\omega t) + i_1(\omega t)$$

Onde:

$\phi = \tan^{-1}(X/R)$ é o ângulo da impedância de curto-circuito;

$X = \omega L$ é a componente reativa da impedância de curto-circuito;

$\tau = L/R$ é a constante de tempo relativa à impedância de curto-circuito.

A Fig. 15 mostra a variação da corrente de curto-circuito, iniciando-se no zero da tensão senoidal da fonte, e a corrente de curto-circuito, no seu primeiro ciclo.

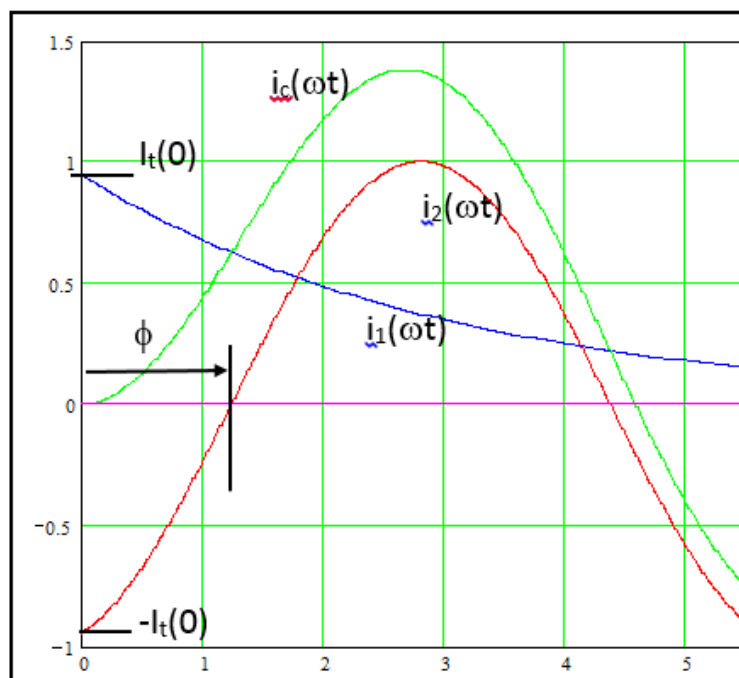


FIG. 15 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO OCORRENDO PARA O ÂNGULO $\alpha = 0^\circ$ E SUAS COMPONENTES TRANSITÓRIA E DE REGIME PERMANENTE.

Nesta figura, $i_t(0)$ corresponde ao valor inicial da componente DC, que somente existirá para a situação em que α seja diferente do ângulo ϕ . De fato, de acordo com a equação do curto-circuito acima, a segunda parcela, correspondente à componente transitoria (componente DC) torna-se nula quando $\alpha = \phi$.

2. TRÊS SITUAÇÕES POSSÍVEIS

Três situações podem ser analisadas para que se compreenda bem as formas de onda de uma corrente de curto-circuito.

O curto-circuito em uma linha de transmissão, ou em uma parte do sistema de potência, pode ser analisado em termos de sua proximidade com a fonte de tensão equivalente, o gerador síncrono. Este tem comportamento tão característico, que deve ser levado em conta. Tal comportamento liga-se ao fato de que sua impedância varia, num crescendo, durante os instantes iniciais do curto-circuito. No primeiro instante (primeiros dois ou três ciclos) a impedância do gerador síncrono é a menor possível e é caracterizada pela presença dos denominados enrolamentos amortecedores (Ver KINDERMAN, G. **Curto-circuito**. Ed. do Autor, Florianópolis, 5.ed, p. 57). Em seguida, a impedância cresce e fica dependente dos enrolamentos de campo da máquina. Finalmente, nos ciclos seguintes, a impedância é aquela associada a impedância síncrona da máquina (impedância tradicional, de dispersão, de sequência positiva, ou de eixo direto).

Portanto, se o curto-circuito ocorrer nos terminais do transformador elevador de uma usina hidrelétrica, por exemplo, a corrente de curto-circuito terá a forma dada pela Fig. 16 (Vide IEC 60909-0: 2001, p. 33, com errata à p. inicial).

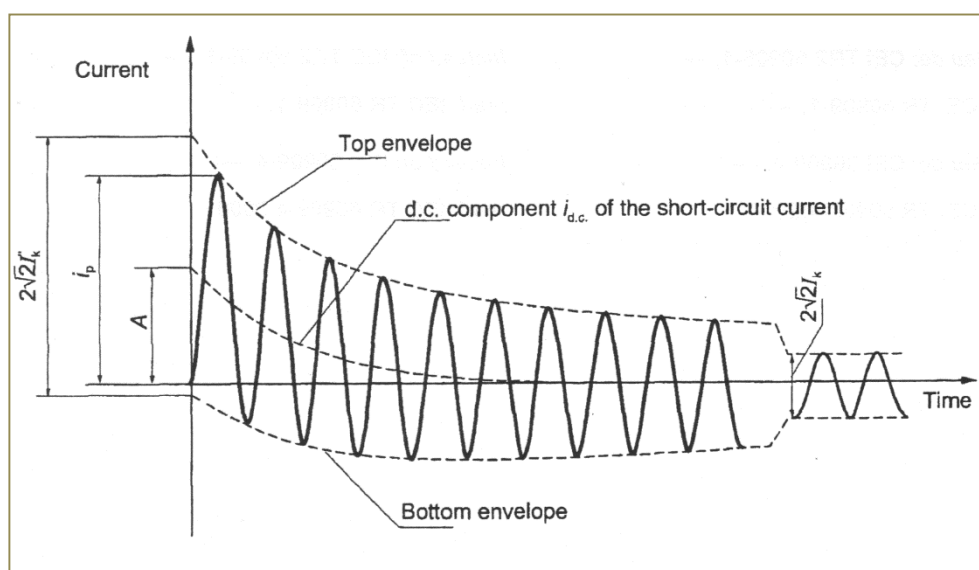


FIG. 16 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO OCORRENTE PERTO DO GERADOR SÍNCRONO.

Verifica-se que a corrente tem um comportamento exponencial em virtude de o curto-circuito estar ocorrente no início da tensão da fonte, e, também, em virtude da variação do módulo da impedância interna do gerador. Leve-se em conta que a impedância do transformador (constante) não altera, substancialmente, o comportamento variável da impedância total de curto-circuito (gerador + transformador). Observe-se que o valor pico a pico da corrente está caindo até um valor bem menor em regime permanente (supondo a manutenção da corrente de curto).

Este comportamento é distinto do que será visto à frente, e que dependerá da relação X/R e do instante do curto-circuito. Considere-se a situação da Fig. X.3 como dependente tão somente da característica variável da impedância de curto-circuito do gerador.

2.1.2. Curto-circuito longe do gerador

Para a situação em que o curto-circuito ocorra distante do gerador, incluindo a impedância de uma linha de transmissão, por exemplo, a impedância total de curto-circuito ficará, praticamente, independente das variações da impedância do gerador, visto que a impedância da linha, acrescida à do transformador, é constante e bem maior que a do gerador.

A Fig. 17 ilustra o comportamento da corrente de curto-circuito ocorrendo distante do gerador síncrono.

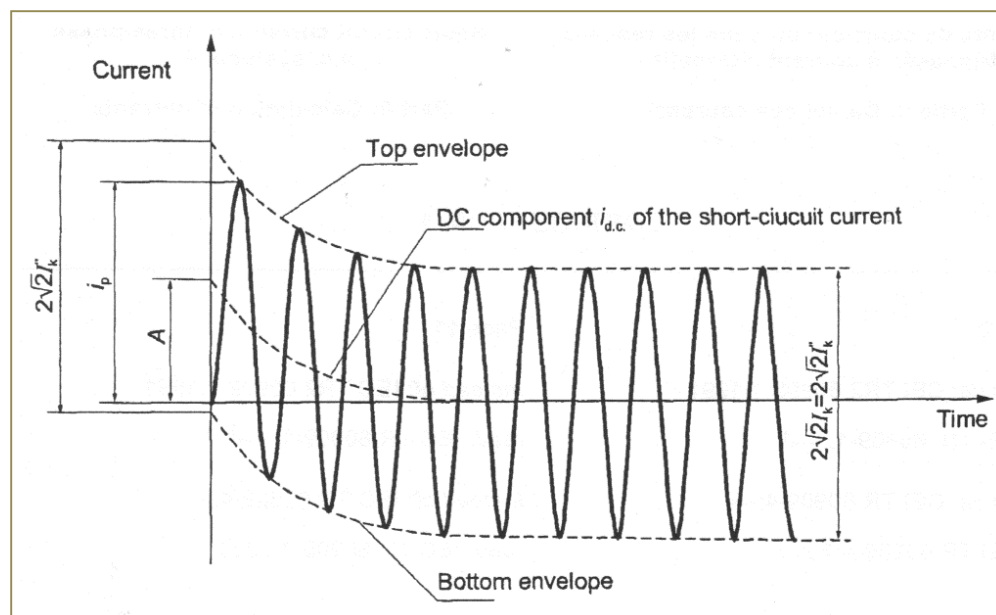


FIG. 17 – CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO OCORRENTE DISTANTE DO GERADOR SÍNCRONO.

Verifica-se, nesta figura, que a corrente de curto-circuito tem um comportamento de queda exponencial devido, não mais à impedância variável do gerador síncrono, mas à elevada relação entre a reatância e a resistência e ao ponto de ocorrência do curto-circuito (no início da tensão senoidal da fonte). Isto será visto e demonstrado mais à frente. Observe-se que a amplitude da corrente de curto está caindo até estabilizar-se no valor de regime permanente (supondo corrente de curto-circuito mantida). Mas o valor pico a pico é mantido mesmo nos instantes iniciais. Isto é diferente do que ocorre no caso anterior, para curto perto do gerador.

2.2.Reatância igual à resistência, ou menor ($X = R$ ou $X < R$)

Esta segunda situação será considerada longe do gerador, portanto, com impedância de curto-circuito constante. Neste caso, a relação X/R da impedância influenciará o formato da corrente de curto-circuito.

A influência da relação X/R tem dois aspectos: determina o ângulo ϕ , e determina a amplitude inicial e a constante de tempo do decaimento da componente DC, esta, dependente do instante de ocorrência do curto.

Para esses valores da relação X/R ($X \leq R$), o instante de ocorrência do curto-circuito tem pouca influência sobre a amplitude inicial da corrente de curto. As figuras a seguir ilustram esse fenômeno. Nessas figuras, a senoide maior corresponderá, sempre, à corrente de curto-circuito, e a menor, à tensão.

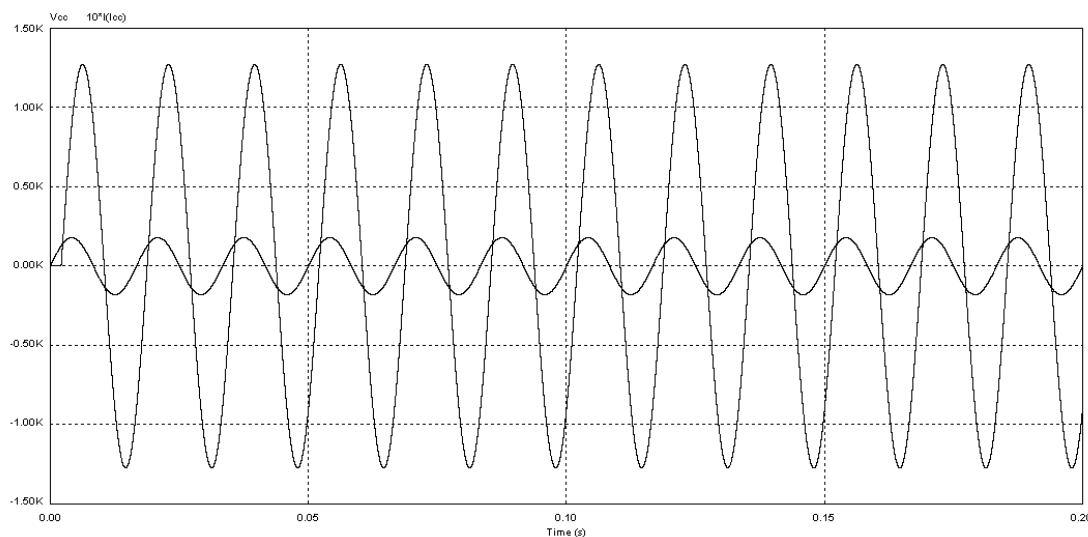


FIG. 18 – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO PARA: $X = R$ ($\phi = 45^\circ$) E $\alpha = 45^\circ$ ($\alpha = \phi$).

Verifica-se, nesta figura, que a amplitude inicial da corrente de curto é exatamente igual à amplitude dos demais ciclos. Isto por quê, de acordo com a equação definidora da corrente de curto-circuito, sendo iguais os ângulo α e ϕ , resulta nula a componente DC, resultando, apenas, a componente de regime permanente.

Para o caso em que o instante de ocorrência do curto-circuito aconteça no início da tensão senoidal da fonte ($\alpha = 0^\circ$), tem-se o formato da corrente como o ilustrado na Fig. 19.

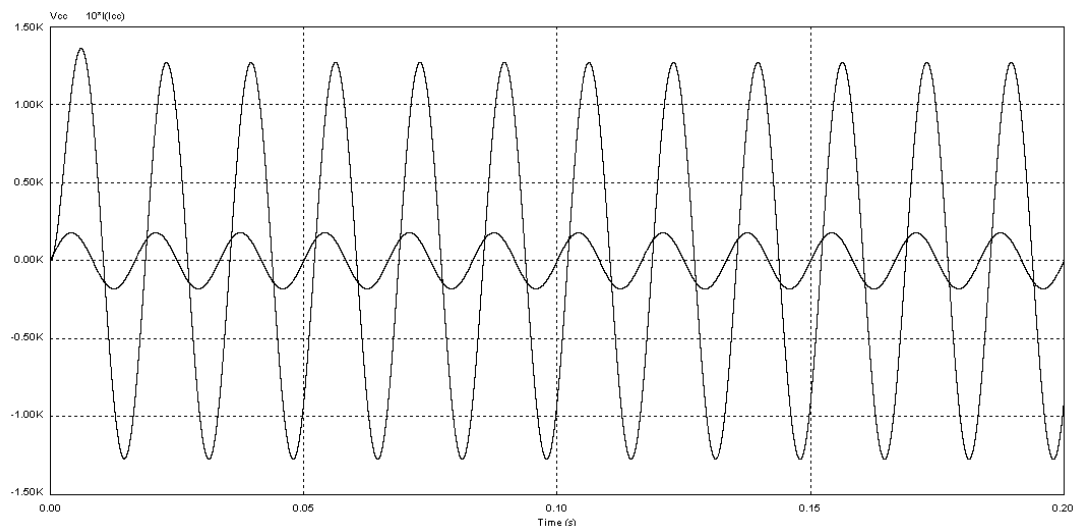


FIG. 19 – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO PARA: $X = R$ ($\phi = 45^\circ$) E $\alpha = 0^\circ$.

Neste caso, verifica-se uma amplitude inicial ligeiramente maior do que a dos demais ciclos. Esta relação corresponde a um Fator de Assimetria igual a 1,07, para $X/R = 1$, como será visto mais à frente. Confirma-se, já aqui, que a amplitude inicial maior depende da relação X/R , mas somente se concretizará se o instante do curto ocorrer no início da tensão senoidal da fonte.

Pode-se, concluir, portanto, que, para o caso $X = R$, o instante da ocorrência do curto-circuito não terá influência sobre a amplitude dos ciclos iniciais da corrente, podendo-se, considerar para essa gama de relações X/R , o Fator de Amplitude como aproximadamente igual a um (1,0).

2.3. Reatância maior que a resistência ($X > R$)

Esta terceira situação corresponde a valores mais práticos (reais) de linhas de transmissão, em que, de fato, os valores da reatância de curto-circuito são muito maiores do que os de resistência.

Neste caso, a influência do instante de ocorrência do curto-circuito será decisiva para a definição final da forma de onda da corrente de curto-circuito.

2.3.1. Para $X > R$ e $\alpha = \phi$

Neste caso, supondo a ocorrência do curto-circuito no instante exato em que os ângulos α e ϕ sejam iguais, ter-se-á a componente DC nula. A corrente de curto não apresentará qualquer amplitude maior nos primeiros ciclos, correspondendo à componente de regime permanente, defasada de um ângulo ϕ , em atraso, em relação à tensão da fonte.

A Fig. 20 ilustra o comportamento da corrente de curto-circuito para este caso, em que o momento do curto coincide com o correspondente ao ângulo ϕ .

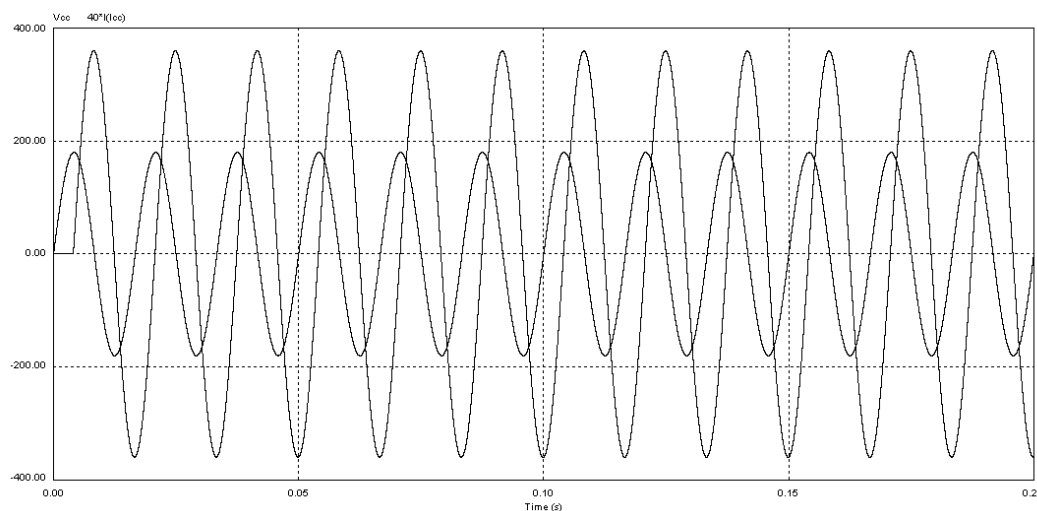


FIG. 20 – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO PARA: $X \gg R$ ($\phi = 87,14^\circ$) E $\alpha = 87,14^\circ$ ($\alpha = \phi$)

Verifica-se, nesta figura, que o momento do curto-circuito está ocorrendo, de fato, quase no pico da tensão da fonte. E como o ângulo dessa tensão senoidal (α) coincide com o ângulo da impedância de curto-circuito (ϕ), a corrente de curto é puramente senoidal.

2.3.2. Para $X > R$ e $\alpha = 0^\circ$

Este caso considera a ocorrência do curto-circuito no início da tensão senoidal da fonte, o que corresponde à pior situação de curto-circuito. Se a relação X/R

for considerada de valor elevado (como acontece na prática), ter-se-á a forma de onda de corrente de curto com o maior Fator de Amplitude.

A Fig. 21 ilustra a forma de onda da corrente de curto-circuito para esta situação.

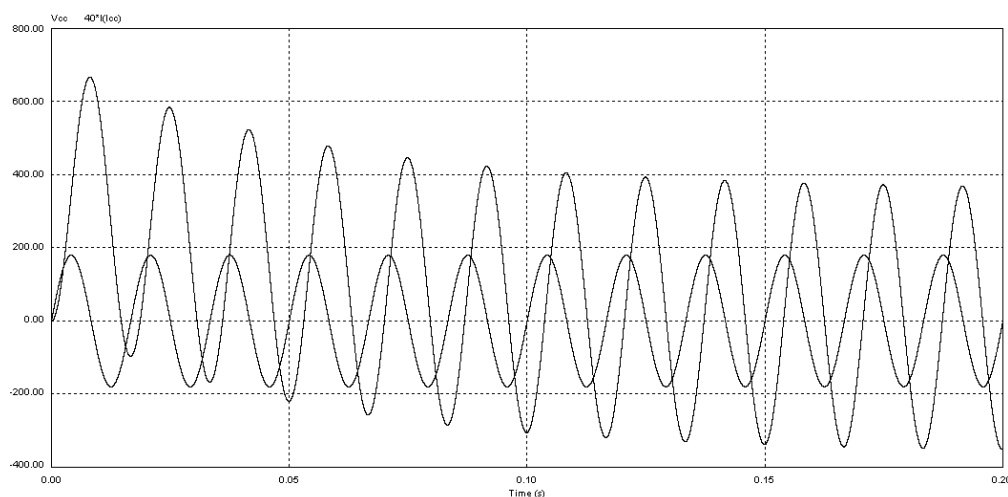


FIG. 21 – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO PARA: $X \gg R$ ($\phi = 87,14^\circ$) E $\alpha = 0^\circ$ (OU $\alpha \ll \phi$)

A Fig. 22 ilustra a mesma corrente da Fig. 21, mas mostrando o regime permanente tendo sido atingido.

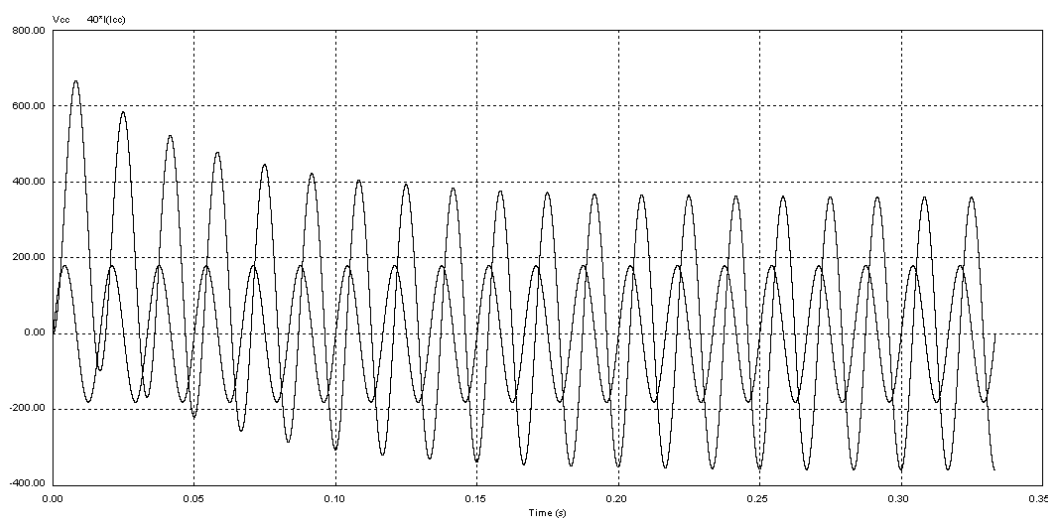


FIG. 22 – CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO PARA: $X \gg R$ ($\phi = 87,14^\circ$) E $\alpha = 0^\circ$ (OU $\alpha \ll \phi$) – CORRENTE ATINGE O REGIME PERMANENTE.

3. ANÁLISE DO FATOR DE ASSIMETRIA E DA ASSIMETRIA

O fator de assimetria é importante para dimensionar-se um disjuntor, por exemplo. É definido como a relação entre o pico da corrente de curto-circuito inicial e o pico da corrente de regime permanente. E depende, como já visto, da relação X/R , sendo definido para $\alpha = 0^\circ$.

3.1. Assimetria para $X < R$

Considerando-se, inicialmente, a relação $X < R$, têm-se os seguintes resultados de simulação para a corrente de curto-circuito ocorrendo em alguns instantes especiais. Considere-se, a partir de agora, que a assimetria seja “positiva” para pico inicial maior que o pico de regime permanente.

A Fig. 23 ilustra o caso em que $X < R$ ($\phi = 26,57^\circ$) e $\alpha = 26,57^\circ$ ($\alpha = \phi$).

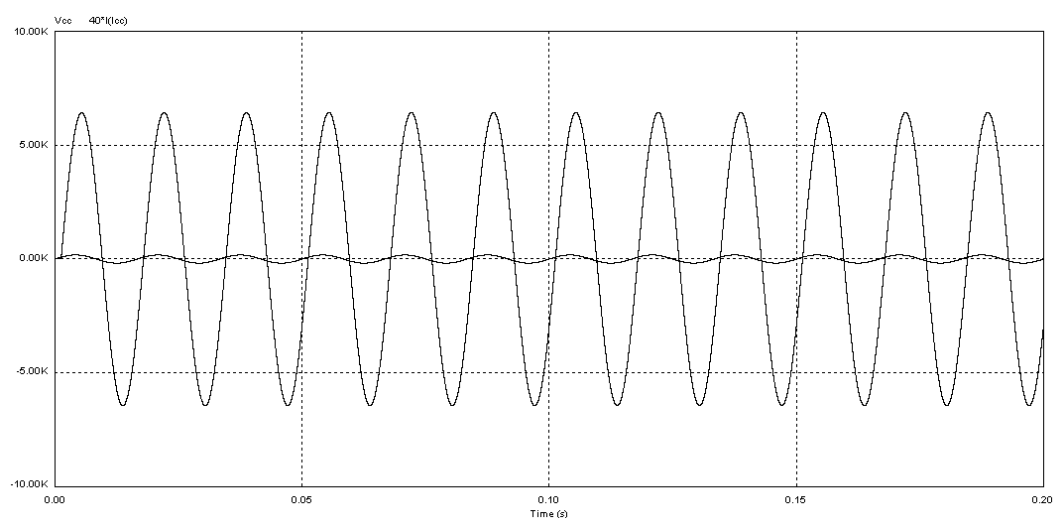
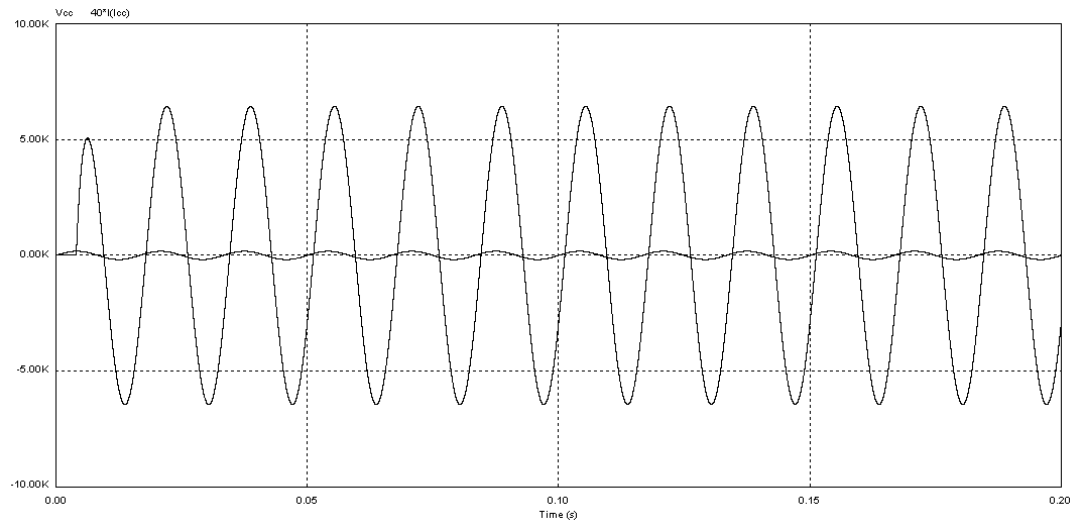


FIG. 23 –ASSIMETRIA QUASE NULA, PARA $X < R$ ($\phi = 26,57^\circ$) E $\alpha = 26,57^\circ$ ($\alpha = \phi$).

Verifica-se, neste caso simulado, que o curto-circuito acontece no exato momento em que α iguala ϕ . Isto é, a corrente de curto-circuito já está devidamente defasada da tensão pelo seu ângulo de atraso ϕ . Isto não exige, portanto, qualquer valor para a componente DC, e a corrente de curto não apresenta qualquer assimetria inicial.

Fig. 24 ilustra o caso em que $X < R$ ($\phi = 26,57^\circ$) e $\alpha = 87^\circ$ ($\alpha > \phi$).

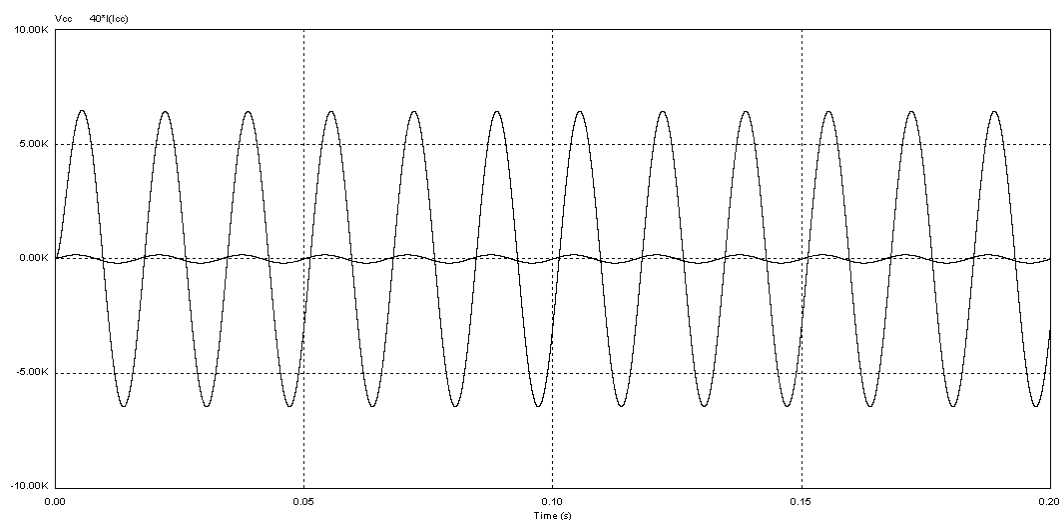


A

FIG. 24 – ASSIMETRIA “NEGATIVA” PARA: $X < R$ ($\phi = 26,57^\circ$) e $\alpha = 87^\circ$ ($\alpha > \phi$).

Verifica-se, nesta figura, que a assimetria é negativa, pois o ponto de ocorrência do curto-circuito é tal que o ângulo α é maior que o ângulo ϕ . Isto é, a corrente resulta atrasada de um ângulo muito grande, inicialmente, e tem de ser como que adiantada para que seu ângulo de defasamento correto (ϕ) se estabeleça.

Fig. 25 ilustra o caso em que $X < R$ ($\phi = 26,57^\circ$) e $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha < \phi$).



A

FIG. 25 – FATOR DE ASSIMETRIA UNITÁRIO PARA: $X < R$ ($\phi = 26,57^\circ$) E $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha < \phi$).

Verifica-se, nesta figura, que a assimetria é praticamente nula, e o Fator de Assimetria resulta, praticamente, unitário, apesar de o instante de ocorrência do curto-circuito ter-se dado na pior situação, isto é: no instante inicial da tensão senoidal da fonte (que é a situação que define o Fator de Assimetria).

Verifica-se, finalmente, que até o valor $X/R = 1$ (ou $X = R$), o fator de assimetria é praticamente unitário, passando a crescer, como será mostrado á frente, para valores de relação X/R crescentes a partir da unidade.

3.2. Assimetria para $X > R$

A Fig. 26 ilustra o caso em que $X/R = 4$ ($\phi = 75,96^\circ$) e $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha < \phi$).

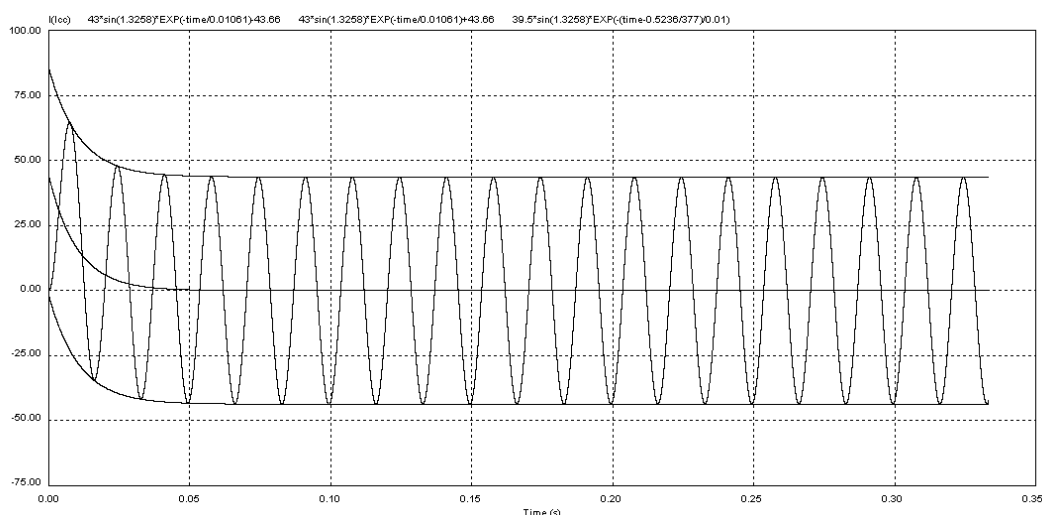


FIG. 26 – FATOR DE ASSIMETRIA MAIOR QUE A UNIDADE PARA: $X/R = 4$ ($\phi = 75,96^\circ$) E $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha < \phi$).

Verifica-se, nesta figura, que o curto-circuito, em função de o instante de tempo ocorrer antes do correspondente ângulo ϕ , isto é, na pior situação ($\alpha = 0^\circ$), desenvolve-se segundo uma envoltória exponencial para os seus picos. O Fator de Assimetria é definido, pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) para o instante correspondente a meio ciclo da rede: o primeiro pico da onda de corrente. O FA é, claramente, maior que um nesta situação ilustrada pela Fig. 26.

3.3.Fator de Assimetria – gráficos em função de X/R e R/X

A determinação do Fator de Assimetria pode ser feita a partir de gráficos que o relacionem com os valores de X/R ou R/X.

Todos os gráficos a seguir foram gerados a partir da expressão obtida da Norma IEC 60909-0, Eq. 55, p. 101:

$$FA = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3 \cdot R/X}$$

A Fig. 27 mostra um gráfico FA versus R/X.

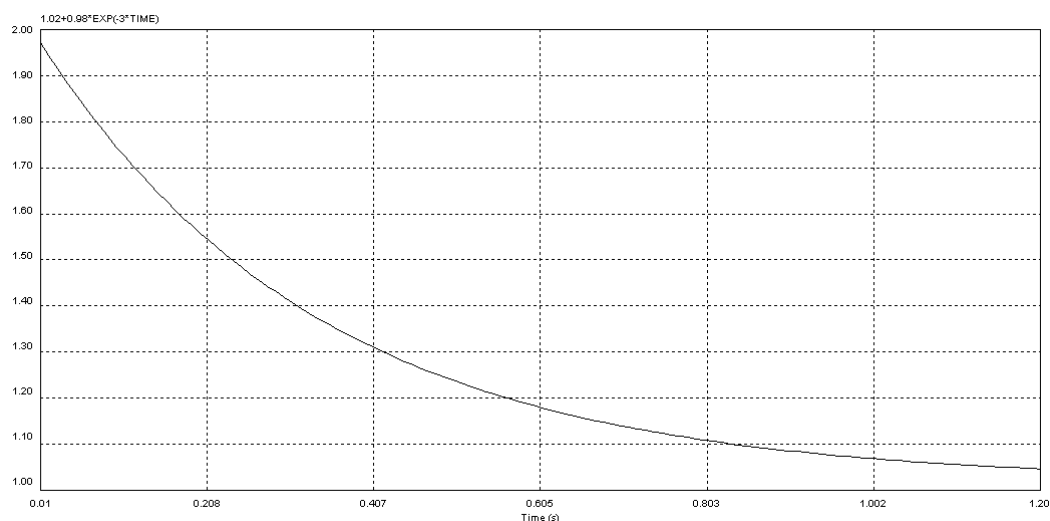


FIG. 27 – FATOR DE ASSIMETRIA, EM FUNÇÃO DE R/X.

Um gráfico equivalente, mas em escala logarítmica, pode ser visto na Fig. 28.

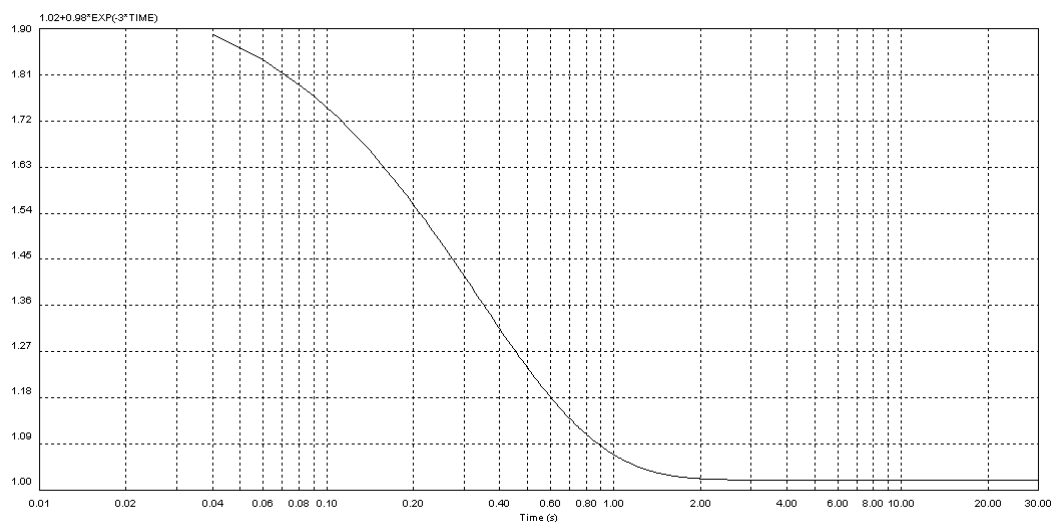


FIG. 28 – FATOR DE ASSIMETRIA, EM FUNÇÃO DE R/X , MAS COM ESCALA LOGARÍTMICA.

A Fig. 29 mostra um gráfico FA versus X/R .

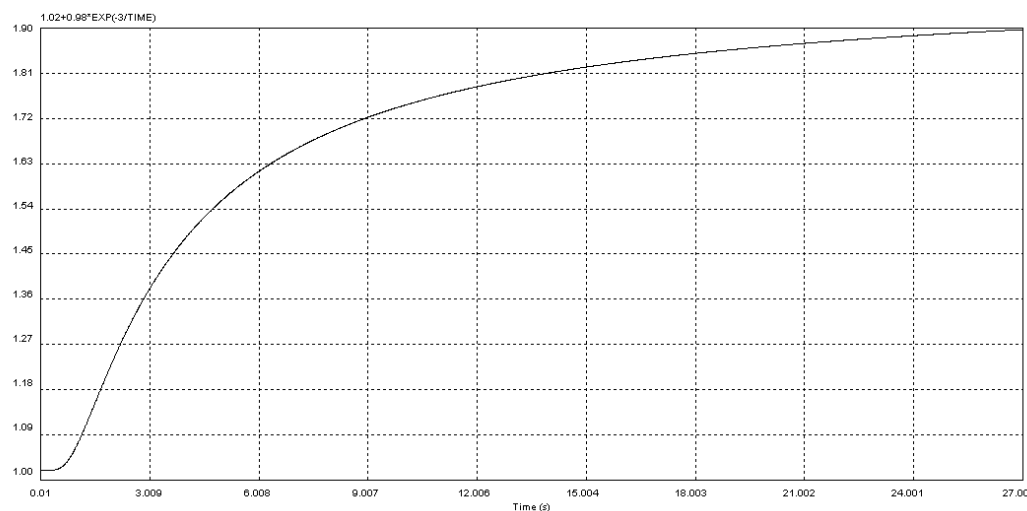


FIG. 29 – FATOR DE ASSIMETRIA EM FUNÇÃO DE X/R .

Um gráfico equivalente, mas em escala logarítmica, pode ser visto na Fig. 30.

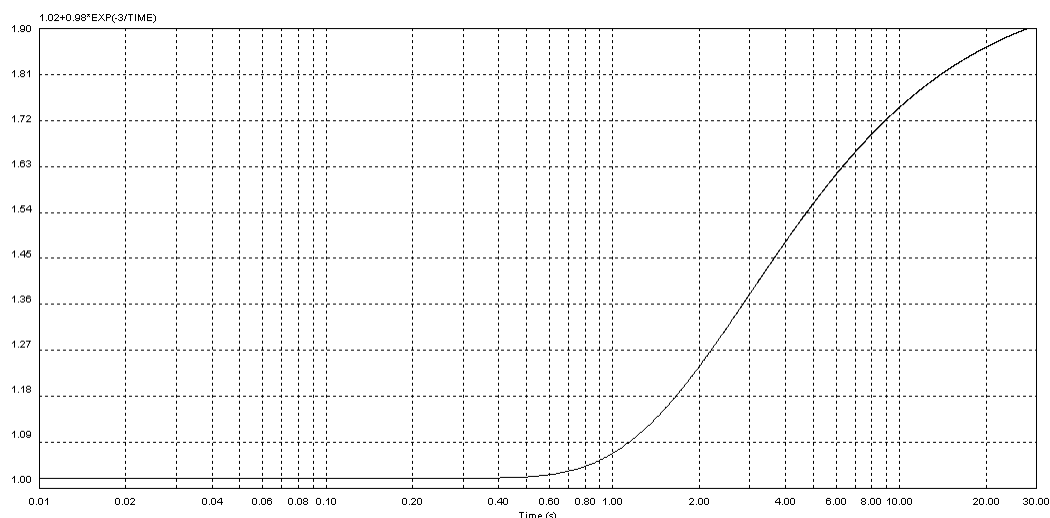


FIG. 30 – FATOR DE ASSIMETRIA, EM FUNÇÃO DE X/R, MAS COM ESCALA LOGARÍTMICA.

3.4.Conclusão

O Fator de Assimetria, de fato, depende essencialmente da relação X/R. Quanto maior este valor, maior será o FA. No entanto, a assimetria somente surgirá para a situação em que o momento do curto aconteça para um ângulo alfa menor do que o ângulo ϕ .

A componente DC aparecerá em função do ponto em que ocorre o curto-circuito em relação à tensão da fonte. Quanto menor for o ângulo alfa em relação ao ângulo ϕ , maior será a componente DC da corrente de curto-circuito.

A maior assimetria ocorre para a pior situação de componente DC, Isto é, quando a relação X/R for a máxima (ϕ máximo) e o alfa for o mínimo ($\alpha = 0^\circ$).

OBS.: O Fator de Assimetria (FA) depende da relação X/R e é definido para $\alpha = 0^\circ$ (pior situação de curto-circuito. Já a Assimetria é dependente tanto da relação X/R quanto do instante do curto (relação entre os ângulos ϕ e α).

4. CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO NAS TRÊS FASES

Para ilustrar as formas de onda das correntes nas três fases de um curto-circuito trifásico são mostradas as duas figuras a seguir.

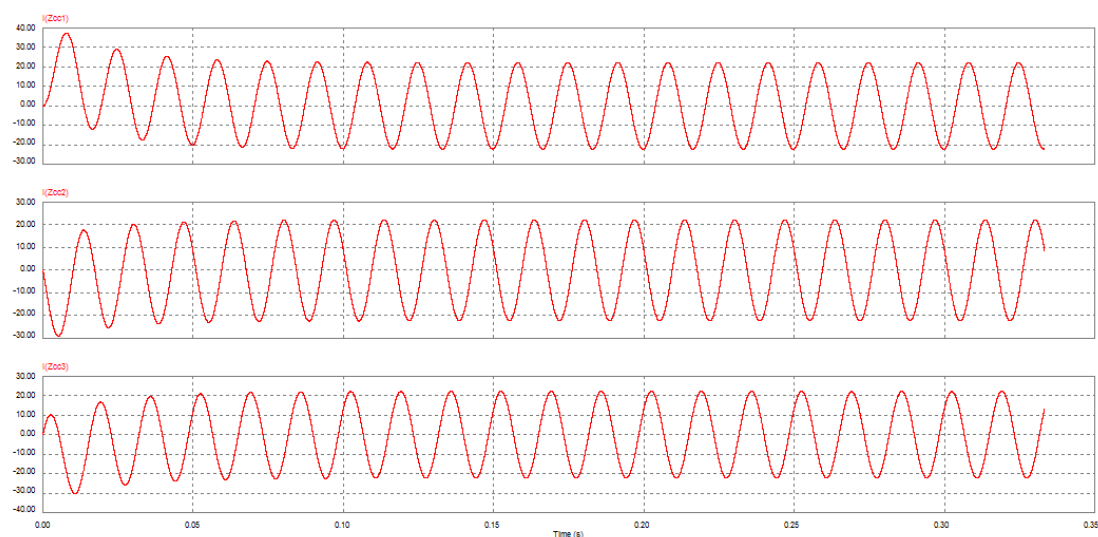


FIG. 31 – CORRENTES DE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO, PARA: $X/R = 8$ ($\phi = 82,87^\circ$) E $\alpha = 0^\circ$.

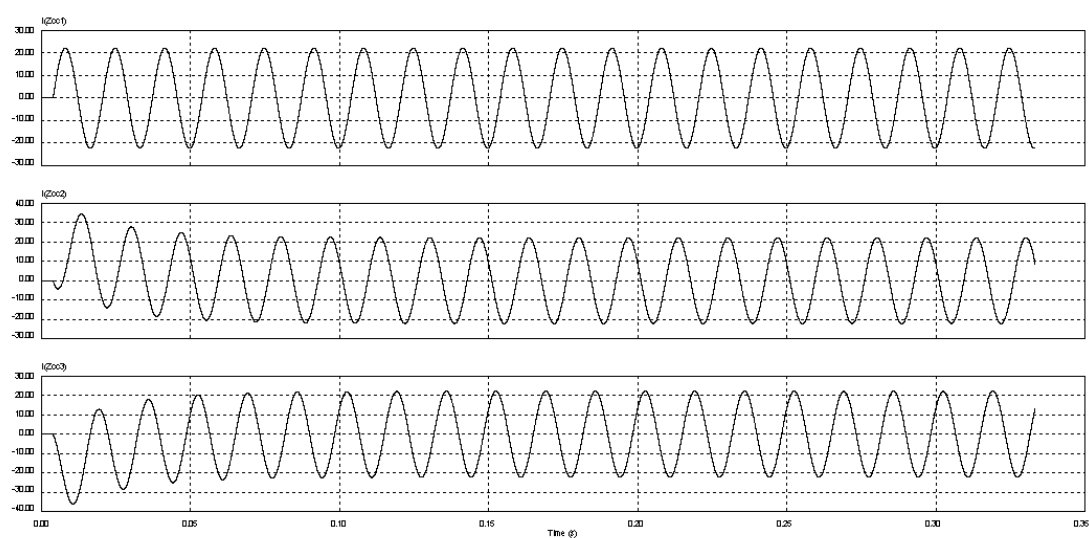


FIG. 32 – CORRENTES DE UM CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO, PARA: $X/R = 8$ ($\phi = 82,87^\circ$) E ($\alpha = \phi$).

5. CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO

A figura a seguir ilustra as formas de onda de correntes de um curto-circuito bifásico.

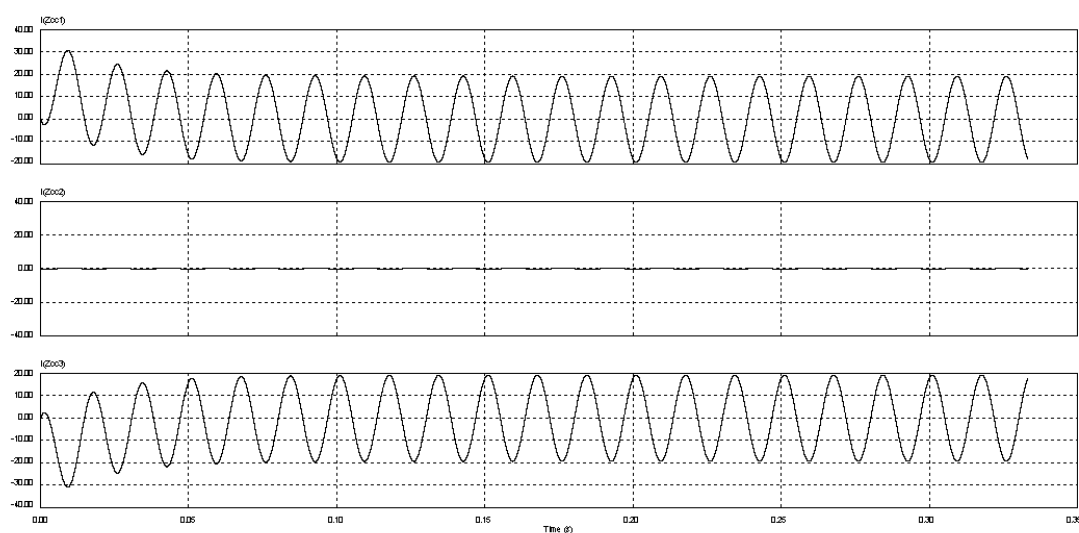


FIG. 33 – CORRENTES DE UM CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO PARA: $X/R = 8$ ($\phi = 82,87^\circ$) e $\alpha = 0^\circ$ ($\alpha < \phi$)

Verifica-se que as correntes são iguais e opostas.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO VI

COMPONENTES SIMÉTRICOS

Este tema, componentes simétricos, derivado do Teorema de Fortescue, é um assunto muito importante na proteção das instalações elétricas, na medida em que fornece a ferramenta básica para o cálculo de curtos-circuitos desequilibrados, isto é: os curtos-circuitos bifásicos, bifásicos para terra e monofásicos (ou monopolares).

O cálculo do curto-circuito trifásico, equilibrado, é facilmente feito a partir da simples aplicação da Lei de Ohm. Conhecendo-se a tensão nominal de um circuito trifásico e sua impedância de curto-circuito equivalente, basta dividir a tensão pela impedância, obtendo-se a desejada corrente de um curto-circuito trifásico.

A utilização dos chamados circuitos monofásicos de impedância, equivalentes aos circuitos trifásicos equilibrados, não permite que se calcule a corrente de um curto-circuito monopolar, por exemplo. Pois esses circuitos de impedância, normalmente montados em valor por unidade (pu), só são válidos para situação de cargas (ou curtos) equilibrados.

1. TEOREMA DE FORTESCUE

O Teorema de Fortescue, desenvolvido pelo engenheiro eletricitista Charles Legeyt Fortescue (Fig. 34), em 1918, é a base da teoria dos componentes simétricos. O Teorema afirma que qualquer conjunto de N fasores (vetores girantes) de um sistema polifásico desequilibrado pode ser expresso pela soma

de três conjuntos de N fasores equilibrados, denominados, respectivamente, componentes simétricos: de sequências positiva, negativa e zero.

No caso de um sistema de potência trifásico desequilibrado, de 60 Hz ou 50Hz, de tensões ou correntes, esses fasores podem ser transformados em três conjuntos de três fasores equilibrados de sequências positiva (girando em igual sentido ao dos fasores originais), negativa (sentido contrário) e zero (girando em fase). Observar, para estes últimos fasores de sequência zero, que não são fasores de frequência nula, mas fasores que não estão defasados entre si, como os demais, mas têm todos o mesmo ângulo de fase.

A Fig. 35 ilustra o que pode ser entendido como uma “transformação de componentes simétricos”: de um domínio de fasores trifásicos desequilibrados (mundo real) para um domínio de três conjuntos de fasores trifásicos equilibrados, de sequências positiva, negativa e zero (mundo fictício).



Engenheiro eletricitista (1876 – 1936), escreveu artigo técnico em 1918, intitulado: Método das coordenadas (componentes) simétricas aplicadas à solução de redes polifásicas.

FIG. 34 – CHARLES LEGEYT FORTESCUE: CRIADOR DO SISTEMA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS.

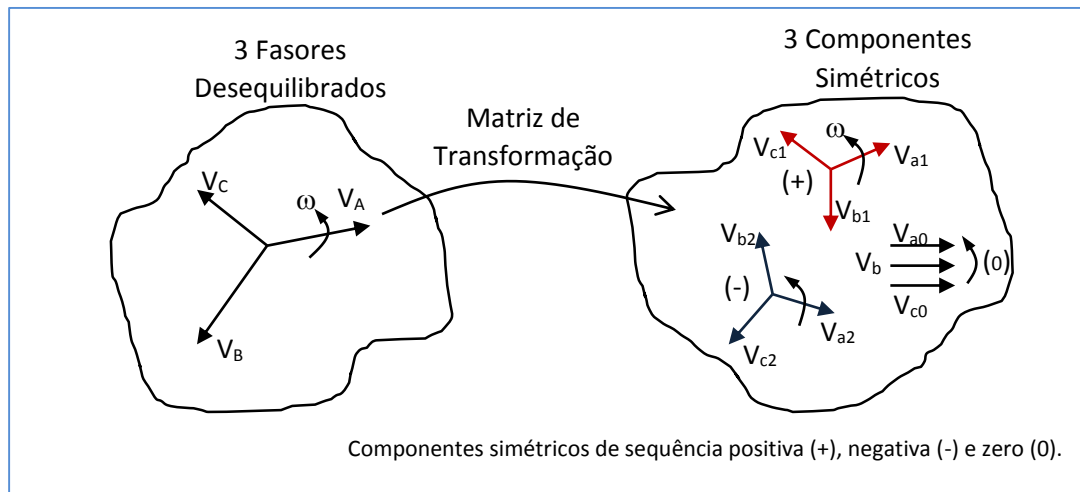


FIG. 35 – TRANSFORMAÇÃO DE COMPONENTES SIMÉTRICOS.

A transformação entre os dois domínios pode ser apresentada por meio da relação matricial entre os fasores originais (desequilibrados) e os fasores equilibrados de componentes simétricos. Supondo fasores de tensão (vale para correntes, também), tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = M_s \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}$$

Esta relação matricial permite que sejam identificados (ou calculados) os fasores componentes simétricos das sequências positiva, negativa e zero. Esta matriz, M_s , deve ser interpretada como a matriz que transforma (gera, cria) os componentes simétricos a partir dos fasores originais desequilibrados. Portanto, M_s , neste livro, denota a Matriz de Transformação de Componentes Simétricos.

Sendo conhecidos os componentes simétricos, uma transformação inversa – utilizando a inversa da matriz de transformação M_s – permitirá calcular os fasores desequilibrados:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Observação: A literatura relativa aos componentes simétricos denomina essas duas matrizes de forma contrária ao que está apresentado. A matriz de transformação inversa acima é identificada como sendo a matriz de transformação (chamada T); e a matriz M_s , acima, é denominada de matriz de transformação inversa. Este autor entende que a melhor designação é a

adotada acima porque, conforme a Fig. 35, os componentes simétricos são gerados pela aplicação da matriz M_s sobre os fasores originais desequilibrados. Portanto, esta é a matriz que os transforma em componentes simétricos, ou, que os transporta para o domínio dos seus componentes simétricos.

Em resumo: $M_s = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \Rightarrow$ Matriz de Transformação de comp. simétricos;

$$M_s^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \Rightarrow \text{Matriz de transformação inversa.}$$

O operador “a”, nessas matrizes, vale: $a = 1\angle 120^\circ$.

1.1.Características dos componentes de sequência negativa

Os componentes de sequência negativa (seq. CBA, se a sequência positiva for ABC), só existirão se os fasores originais forem, de fato, desequilibrados. Entenda-se que, se tais fasores forem equilibrados, como numa situação normal de carga equilibrada trifásica, ou, até mesmo, de um curto-circuito trifásico (as três fases unidas, sob falta direta), só existirão, no domínio dos componentes simétricos, os de sequência positiva. A existência de componentes de sequência negativa são, portanto, uma evidência de desequilíbrio nas fases do sistema trifásico. Daqui fala-se em relés de sequência (negativa), para indicar relés de desequilíbrio de correntes ou de tensões num sistema elétrico.

1.2.Características dos componentes de sequência zero

Os componentes de sequência zero são fasores de frequência industrial, como os originais, girando no mesmo sentido dos fasores de sequência positiva, mas com defasamento nulo entre si (ou com ângulos de fase iguais). Sua existência está, necessariamente, associada à ligação à terra, direta ou por meio de impedância, de neutros do sistema elétrico.

Como são vetores que estão em fase, entre si, no circuito elétrico trifásico, somam-se no neutro de um sistema em estrela com neutro aterrado. Neste sentido, assemelham-se aos componentes de terceira harmônica e seus múltiplos ímpares que circulem nas três fases de um sistema elétrico com correntes distorcidas: esses harmônicos somam-se no neutro aterrado do sistema elétrico.

2. CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA GERADOR DESEQUILIBRADO

Para o bom entendimento dos circuitos monofásicos equivalentes às três seqüências (circuitos de seqüência), tratados à frente, é interessante que se faça a análise do caso de um gerador elétrico desequilibrado. Embora, na prática tal gerador não exista, por não fazer sentido, a análise de tal caso é bem didática para a introdução dos circuitos de seqüência. Parte-se do pressuposto de que, existindo tensões de seqüências positiva, negativa e zero, existirão as correspondentes correntes e impedâncias de seqüência.

Supondo-se a existência de um gerador desequilibrado que gere as tensões de fase desequilibradas da Fig. 35, reproduzida na Fig. 36, podem ser identificados os três circuitos trifásicos de seqüência da Fig. 37.

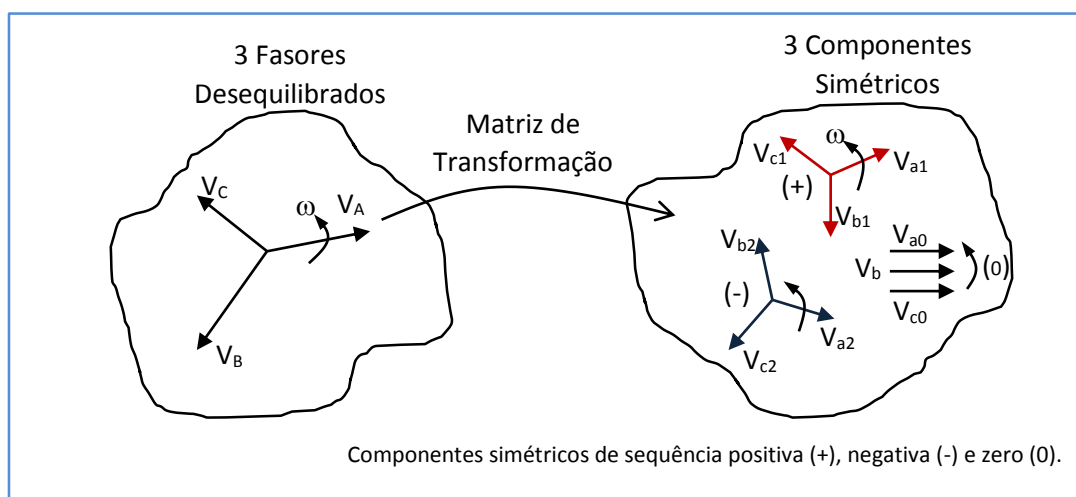


FIG. 36 – TENSÕES DE UM GERADOR DESEQUILIBRADO E SEUS COMPONENTES DE SEQUÊNCIA.

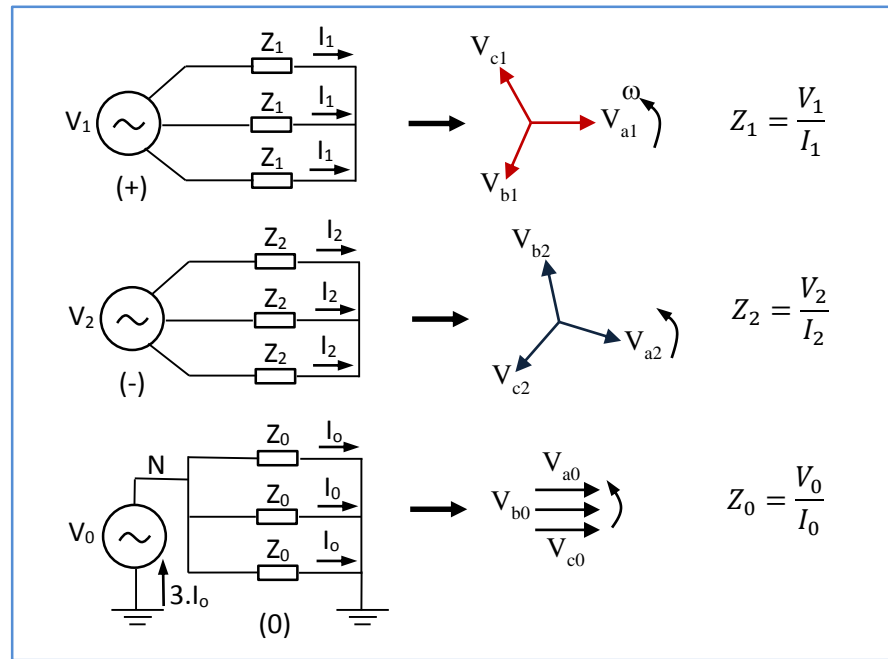


FIG. 37 – CIRCUITOS TRIFÁSICOS EQUILBRADOS DE SEQUÊNCIAS POSITIVA, NEGATIVA E ZERO DO GERADOR DESEQUILBRADO SOB ESTUDO.

Verifica-se na Fig. 37 que o gerador com tensões desequilibradas é representado por três geradores equilibrados de seqüências positiva, negativa e zero. As impedâncias se relacionam conforme a Lei de Ohm, conforme se vê na figura.

Esses três circuitos trifásicos de seqüência, equilibrados, podem ser representados por seus circuitos monofásicos equivalentes, ou, simplesmente, seus circuitos de seqüência, conforme a Fig. 38.

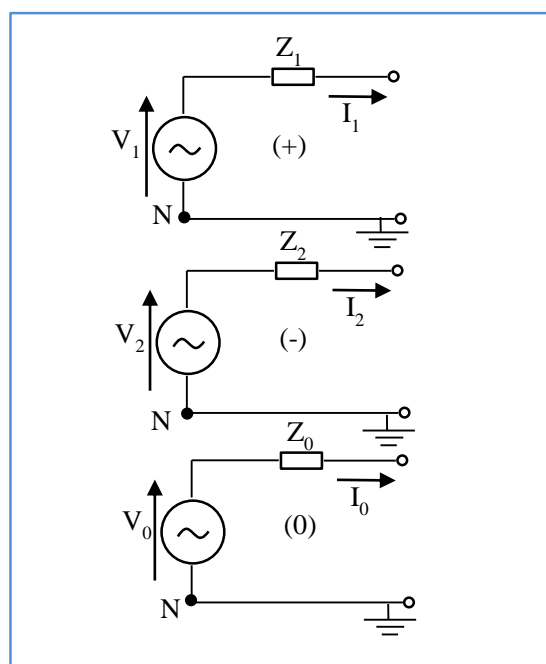


FIG. 38 – CIRCUITOS MONOFÁSICOS DE SEQUÊNCIAS POSITIVA, NEGATIVA E ZERO DO GERADOR DESEQUILIBRADO.

Verifica-se, nesta figura, que cada fonte de seqüência pode gerar sua corrente de seqüência através de sua impedância de seqüência. Se o gerador não tiver o neutro aterrado, não existirá o seu circuito de seqüência zero. E se o gerador fosse equilibrado, não existiria, também, a tensão de seqüência negativa, que só existe para circuitos originais desequilibrados. Isto é, a fonte de tensão negativa no circuito de seqüência negativa seria substituída por um curto-circuito (= fonte de tensão nula).

3. CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA GERADOR EQUILIBRADO

Para o caso, mais real, de um gerador produzindo tensões simétricas, ou equilibradas, as tensões de seqüência negativa e zero serão substituídas por tensões nulas, isto é, curtos-circuitos. A Fig. 39 ilustra os novos circuitos de seqüência para um gerador equilibrado.

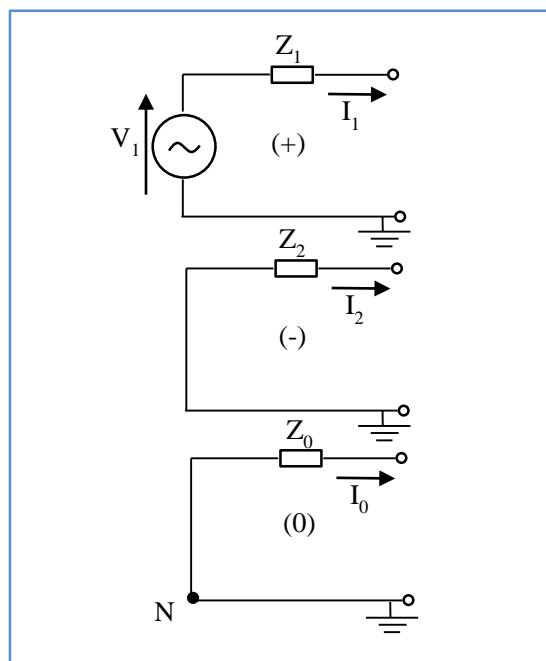


FIG. 39 – CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA UM GERADOR EQUILIBRADO.

Esses três circuitos de sequência formam a base para cálculos de curtos-circuitos desequilibrados em sistemas elétricos de potência. As impedâncias positiva, negativa e zero da Fig. 39 serão substituídas pelas impedâncias de sequência totais do circuito trifásico em consideração:

4. CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA UM SISTEMA ELÉTRICO

Para os cálculos de curto-circuito desequilibrado em um sistema elétrico simples, constituído, por exemplo, por gerador, transformador e linha de transmissão, a impedância de sequência positiva da Fig. 39, será, portanto, a soma das impedâncias de sequência positiva do gerador, do transformador e da linha de transmissão, até o ponto da falta. O mesmo acontece para a impedância de sequência negativa. Para a impedância de sequência zero, o caso é diferente, pois, como será visto, o circuito de sequência zero total dependerá do tipo do transformador e de sua ligação (delta, estrela ou zigzague).

A Fig. 40 exemplifica a aplicação do Teorema dos componentes simétricos a um sistema elétrico de potência que será estudado para cálculos de curto-circuito desequilibrado.

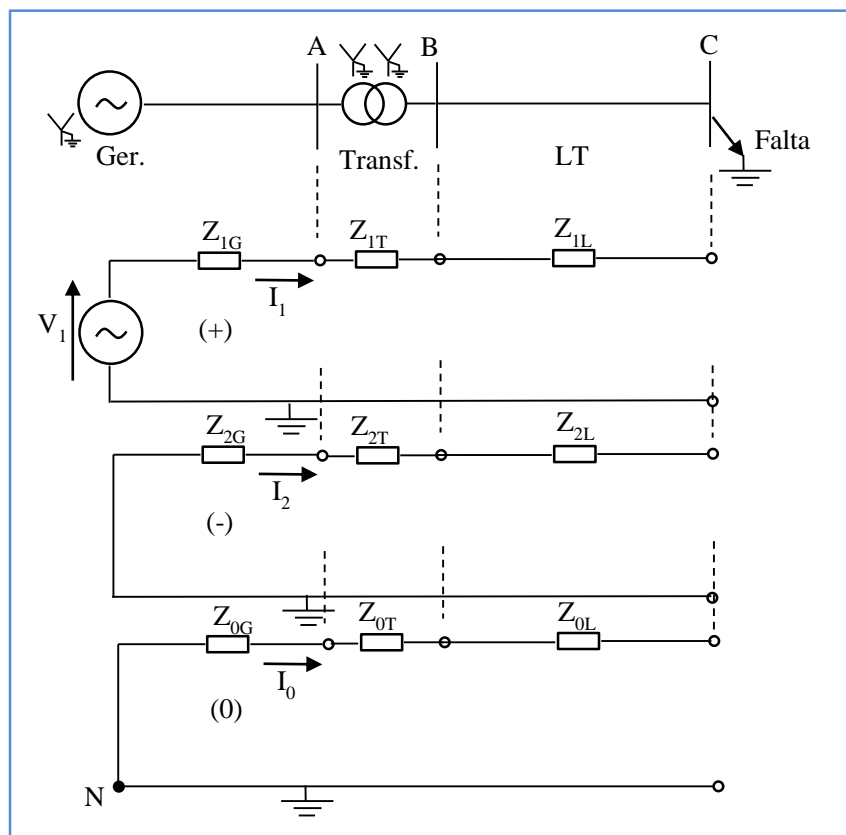


FIG. 40 – CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA UM PEQUENO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.

Se o sistema da Fig. 40 for radial, isto é, fluxo de potência do gerador para a carga (A → C), em caso de falta no ponto C as impedâncias de sequência seriam todas somadas para dar uma equivalente. Por exemplo: $Z_1 = Z_{1G} + Z_{1T} + Z_{1L}$. Se a falta ocorrer na barra B, as impedâncias de sequência da LT (linha de transmissão) serão desconsideradas, pois a corrente de curto-circuito não passará pela LT. E os circuitos de sequência serão formados apenas pelas impedâncias de sequência até a barra B.

5. CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA PARA CURTOS-CIRCUITOS

Para os curtos-circuitos trifásicos (não envolvendo a terra) os circuitos de sequência não são, estritamente, necessários, pois tais curtos são equilibrados, podendo ser calculados diretamente dos diagramas monofásicos de impedância, em pu, equivalentes dos circuitos trifásicos. Mas, pelo uso do circuito de sequência positiva (o único necessário para circuitos originais equilibrados) também é possível o cálculo do curto-circuito trifásico.

Para cálculos de curtos-circuitos desequilibrados, como os bifásicos, os bifásicos para a terra e os monofásicos para a terra, os circuitos de sequência devem ser obrigatoriamente formados. A seguir, a aplicação dos circuitos de sequência para os cálculos de curtos-circuitos.

5.1. Curto-circuito trifásico (equilibrado)

Por meio do circuito monofásico equivalente de sequência positiva o curto-circuito trifásico pode ser facilmente calculado. A Fig. 34 ilustra tal circuito para um sistema de potência com valores conhecidos de impedância de sequência positiva, que equivalem às impedâncias usuais dos equipamentos, dadas, normalmente, em percentual ou em pu: impedância síncrona do gerador; impedância percentual do transformador, etc. Nesta figura, supõe-se que o curto-circuito esteja ocorrendo no final da linha de transmissão. Portanto, a impedância total inclui as três impedâncias: do gerador, do transformador e da linha.

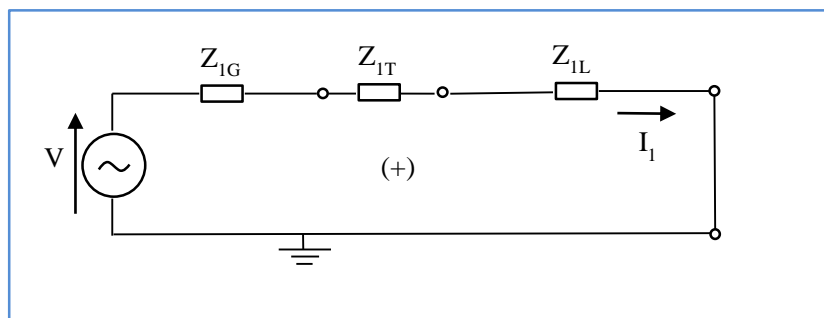


FIG. 41 – CIRCUITO MONOFÁSICO EQUIVALENTE DE IMPEDÂNCIAS DA SEQUÊNCIA POSITIVA.

A corrente de curto-circuito trifásico pode ser calculada, portanto, a partir da expressão:

$$I_{cc3\phi} = I_1 = \frac{1,0}{Z_{1G} + Z_{1T} + Z_{1L}}$$

Onde V, na Fig. 41, foi substituída por 1,0 pu e a corrente de sequência positiva é igualada à corrente de curto-circuito trifásico. Isto pode ser facilmente verificado pela aplicação da relação entre as correntes originais, de fase, e os componentes simétricos, que envolve a matriz M_s^{-1} .

5.2. Curto-circuito bifásico (desequilibrado)

Para o cálculo do curto-circuito bifásico, que é desequilibrado, já que uma corrente fica normal, utilizam-se os circuitos de sequência positiva e negativa ligados em paralelo. Isto vem da análise da relação de transformação de componentes simétricos e do fato de que a componente de sequência zero não existe, porque o curto não envolve a terra.

A Fig. 42 ilustra os circuitos de sequência para o cálculo desejado.

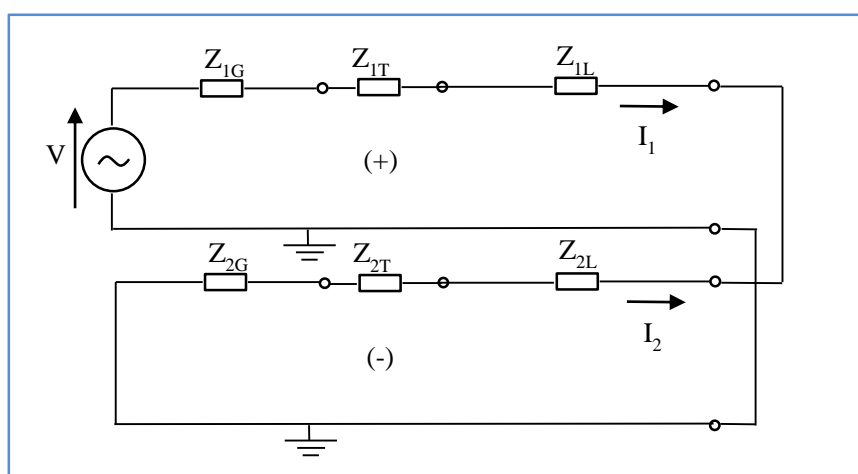


FIG. 42 – CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA EM PARALELO PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO BIFÁSICO.

As correntes de sequência de curto-circuito bifásico podem ser calculadas, portanto, a partir do circuito da Fig. 42, pela expressão:

$$I_1 = -I_2 = \frac{1,0}{Z_1 + Z_2}$$

Onde Z_1 e Z_2 são as impedâncias totais positiva e negativa, respectivamente.

De posse dessas correntes de sequência, aplica-se a relação de transformação inversa para o cálculo da corrente no sistema trifásico, o que dá:

$$I_{cc2\phi} = a^2 \cdot I_1 + a \cdot I_2$$

Esta é a corrente de curto-circuito bifásico atravessando, portanto, as duas fases em curto no sistema trifásico.

5.3. Curto-circuito monofásico (ou monopolar, desequilibrado)

No caso de um curto-circuito monopolar, de uma fase para a terra, a partir da análise da relação matricial de transformação de componentes simétricos, conclui-se que os circuitos monofásicos de impedâncias de sequência devem ser ligados em série. A Fig. 43 ilustra esta ligação.

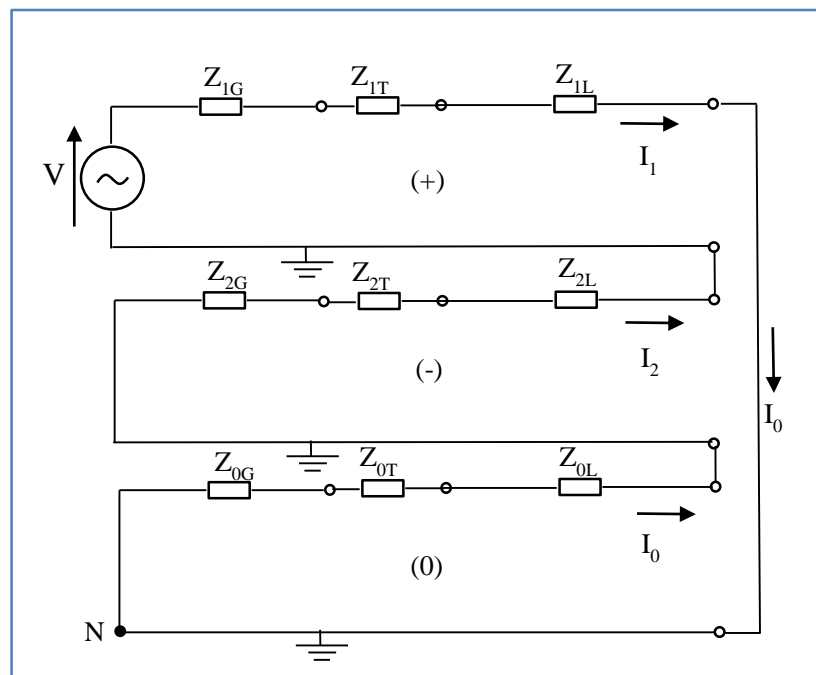


FIG. 43 – CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA LIGADOS EM SÉRIE PARA O CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO MONOPOLAR.

A ligação em série exige que as três correntes de sequência sejam iguais. E a expressão que calcula o valor do componente de sequência zero é:

$$I_0 = \frac{1,0}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

Onde V foi substituído por 1,0 pu e Z_1 , Z_2 , e Z_0 correspondem aos valores totais das impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

Finalmente, a corrente de curto-circuito monopolar, no sistema trifásico real, pode ser encontrada a partir das relações de transformação já vistas acima. Supondo que o curto-circuito monopolar afete a fase A, tem-se:

$$I_{cc1\phi} = i_{ccFT} = I_0 + I_1 + I_2 = 3 \cdot I_0$$

Observação 1: Se houver uma impedância de aterramento (Z_{at}) no neutro do gerador, este valor entrará no circuito de sequência zero ligado entre o terra e o neutro (N) e será multiplicado por três (3). Isto se dá porque no circuito trifásico de sequência zero, equilibrado, são três correntes de sequência zero que atravessam a terra e, portanto, a impedância de aterramento. No circuito equivalente monofásico de impedâncias de sequência, para a equivalência acontecer, a impedância Z_{at} deverá ser multiplicada por três porque a corrente é apenas uma e a queda de tensão deve ser: $Z_{at} \cdot 3 \cdot I_0$.

Observação 2: Se houver uma impedância de aterramento (Z_{at}) no neutro do transformador (estrela aterrado por meio de impedância) no secundário ou no primário, este valor deverá ser introduzido, no circuito de sequência zero, em série com a impedância de sequência zero do transformador, também multiplicada por três (3), pelas mesmas razões dadas acima, para o gerador.

6. CIRCUITOS DE SEQUÊNCIA ZERO PARA TRANSFORMADORES

Os transformadores, em função da variedade de ligações (delta, estrela e zig-zague) afetando o primário e o secundário, devem ser estudados de forma particular e cuidadosa. O resultado de tal estudo conduz ao seguinte

circuito monofásico equivalente (Fig. 44) para a sequência zero de um transformador de núcleo envolvente (ou banco trifásico de transformadores).

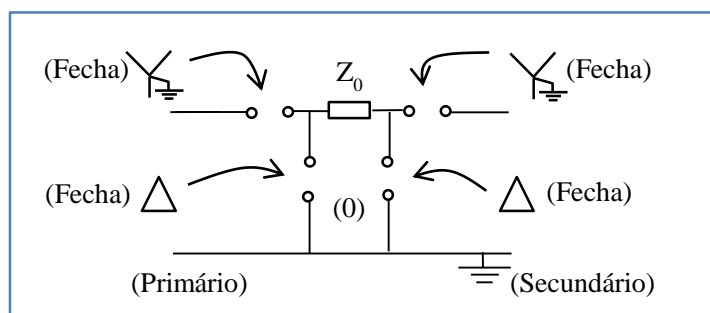


FIG. 44 – CIRCUITO MONOFÁSICO EQUIVALENTE PARA A SEQUÊNCIA ZERO DE UM TRANSFORMADOR DE NÚCLEO ENVOLVENTE.

A interpretação desta figura é a seguinte: somente se o primário ou o secundário estiver ligado em delta, a chave em derivação (para terra) será fechada; somente se o primário ou o secundário estiver em estrela aterrada, a chave série será fechada. A elaboração correta do circuito monofásico equivalente de impedâncias de sequência é fundamental para os cálculos de curtos-circuitos desequilibrados.

No caso da existência de impedância de aterramento no neutro do transformador, esta será ligada, conforme explicado na Observação 2, acima, em série com a impedância Z_0 do transformador, no lado correspondente (primário ou secundário).

7. CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SEQUÊNCIA ZERO PARA A FONTE

Quando se tem conhecidas, além da tensão, a potência de curto-circuito trifásico ($S_{3\phi}$) ou a corrente de curto-circuito de uma fonte ($I_{cc3\phi}$), isto é, de uma rede elétrica ou de um gerador, suas impedâncias de sequência podem ser calculadas.

A impedância de sequência positiva (Z_1) pode ser, facilmente, calculada a partir da expressão para um curto-circuito trifásico, ou equilibrado.

$$Z_1 = Z_{cc} = \frac{V_L^2}{S_{3\phi}} (\Omega)$$

A impedância de sequência negativa poderá ser considerada igual à positiva, para o caso de uma rede elétrica, mas poderá ser diferente, no caso de um gerador síncrono, por exemplo. Neste caso, a tabela do fabricante deverá ser consultada.

O cálculo da impedância de sequência zero poderá ser feito com base nos circuitos de sequência, ligados em série, e no circuito trifásico equilibrado de sequência zero da fonte. As figuras Fig. 45 e Fig. 46 mostram esses circuitos citados.

Com base na Fig. 45 obtém-se uma primeira equação para a corrente de sequência zero:

$$I_0 = \frac{V_{FN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

A Fig. 46 permite a obtenção de uma segunda expressão para a corrente de sequência zero, observando-se que a potência monofásica ($S_{1\phi}$) é proporcional a $3 \times I_0$:

$$I_0 = \frac{S_{1\phi}}{3 \cdot V_{FN}}$$

Igualando-se essas duas expressões para a corrente de sequência zero, obtém-se, finalmente, a expressão para a impedância de sequência zero:

$$Z_0 = \frac{3 \cdot V_{FN}^2}{S_{1\phi}} - (Z_1 + Z_2)$$

Para o caso de uma rede elétrica, pode-se definir $Z_1 = Z_2$, obtendo-se, então:

$$Z_0 = \frac{3 \cdot V_{FN}^2}{S_{1\phi}} - 2 \cdot Z_1$$

Podem ser tiradas as seguintes conclusões, a partir desta expressão para a impedância de sequência zero de uma rede elétrica:

- a) Se a potência de curto-circuito monofásica é conhecida e Z_1 já está calculada, pode-se obter, diretamente, o valor da Z_0 .
- b) Se a potência monofásica de curto-circuito equivale à metade da potência trifásica $\rightarrow Z_0 = \text{nulo!}$
- c) Se a potência monofásica de curto-circuito equivale a um terço da potência trifásica, $\rightarrow Z_0 = Z_1 !$
- d) Finalmente: $0 \leq Z_0 \leq Z_1$

Mas o que define o valor da potência monofásica, solicitado como dado de entrada de alguns softwares como o PTW–SKM? Na verdade, o projetista terá ou a informação dessa potência ou o valor da impedância total de sequência zero da rede elétrica. Tendo uma, obtém-se a outra. A impedância de sequência zero total (Z_{0T}) incluirá uma possível impedância de aterramento (natural ou inserida), Z_{at} , existente no circuito da rede (ou do gerador). Esse valor será dado por:

$$Z_{0T} = Z_0 + Z_{at}$$

Esta impedância total tomará o lugar de Z_0 nas expressões acima. E, no caso de $Z_{at} = 0$, tem-se, novamente, o valor Z_0 .

Verifica-se que, quando se tem uma impedância de sequência zero nula, a potência de curto-circuito monofásica será a máxima, pois a corrente de curto-circuito monopolar deverá a maior possível.

Verifica-se que, quando se tem uma impedância de sequência zero máxima (= Z_1), a potência de curto-circuito monofásica será a mínima, pois a corrente de curto-circuito monopolar deverá a menor possível.

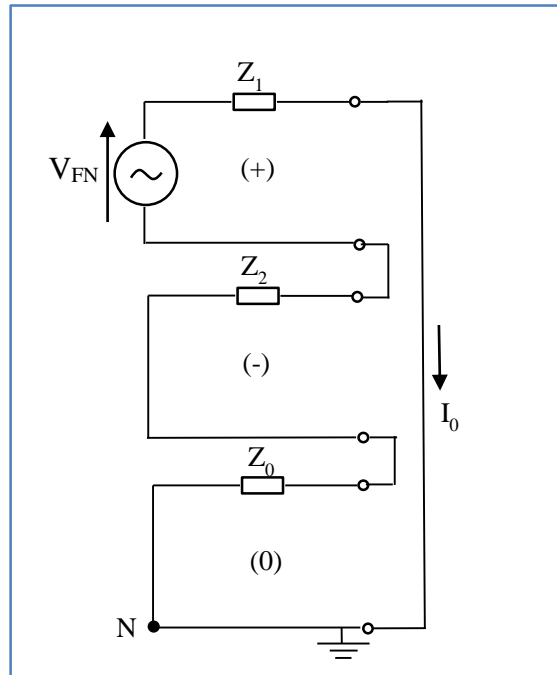


FIG. 45 – CIRCUITO DE SEQUÊNCIA LIGADOS EM SÉRIE.

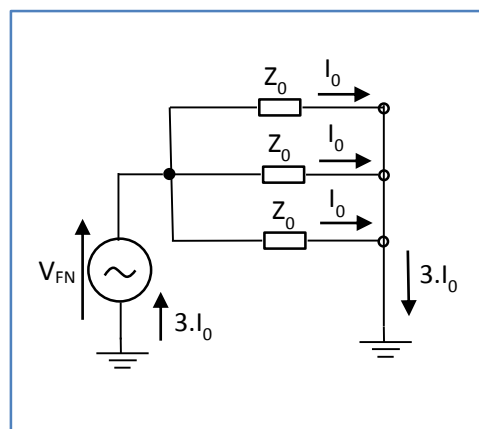


FIG. 46 – CIRCUITO TRIFÁSICO EQUILIBRADO DE SEQUÊNCIA ZERO.

INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

CAPÍTULO VII

ATERRAMENTO DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

1. INTRODUÇÃO

Nos primórdios das instalações elétricas industriais os engenheiros eletricitas ainda estavam aprendendo, estudando e tentando compreender bem os fenômenos associados aos circuitos elétricos práticos, dos pontos de vista de sua eficácia e sua segurança material e humana. Por isto, não se tinha atingido, ainda, sistemas elétricos seguros e eficazes.

Os primeiros sistemas elétricos industriais, por exemplo, eram sistemas isolados, pois a preocupação com os possíveis e perigosos choques elétricos, assim o recomendava. Sendo isolado, o sistema elétrico não tinha conexão com a terra, isto é, era um sistema não aterrado.

Com o passar do tempo e com algumas experiências negativas evoluiu-se para a prática com sistemas aterrados. Embora ainda sejam utilizados, os sistemas isolados, ou não aterrados, não são os mais comuns.

As vantagens de um sistema elétrico, utilizando esquemas de aterramento os mais variados, podem ser elencadas:

- ✚ Garante o escoamento rápido e eficaz de descargas atmosféricas que venham a atingir a instalação;
- ✚ Garante o escoamento contínuo e eficaz de cargas estáticas das massas metálicas (carcaças) dos equipamentos;
- ✚ Protege pessoas e animais contra possíveis choques elétricos (por contato indireto);

- ✚ Garante a equipotencialização de todas as massas metálicas normalmente não energizadas;
- ✚ Aumenta a sensibilidade de dispositivos de proteção contra correntes de curto-circuito e facilita a sua rápida identificação.

2. SISTEMAS ISOLADOS E ATERRADOS

A configuração de sistemas elétricos, do ponto de vista do aterramento, pode ser de dois tipos básicos: sistemas elétricos não aterrados, ou isolados, ou, ainda, aterrados com impedâncias elevadas; e sistemas elétricos efetivamente aterrados, normalmente com baixas impedâncias.

Esses variados tipos de “esquemas de aterramento”, todos normalizados pela NBR ABNT 5410/2004, são tratados a seguir.

2.1. Sistemas isolados

Os sistemas elétricos isolados, ou com os neutros de geradores e transformadores sem ligação à terra ou ligados à terra por meio de impedâncias elevadas, já comentados na introdução deste capítulo, apresentavam inerente proteção contra choques elétricos, visto que o contato com um fio energizado não permitia a circulação, pelo corpo do indivíduo, de corrente elétrica, que, como se sabe, é o agente responsável pela sensação e pelo perigo do choque elétrico.

Quando, portanto, uma falta direta para a terra, acontece, não há a circulação de qualquer corrente elétrica significativa, o que garante a continuidade do funcionamento de instalações elétricas de sistemas isolados. Esta é a denominada “primeira falta”. Isto por que, numa “segunda falta” (estando a primeira ainda vigente), se envolver duas fases diferentes, ocorre um curto-circuito com corrente bem elevada e com prejuízos bem significativos, materiais, e, talvez, humanos. Por esta razão, hoje em dia, sistemas isolados somente com atendimento de critérios normalizados bem definidos.

A Fig. 47 esclarece a configuração de um sistema isolado e o problema da segunda falta.

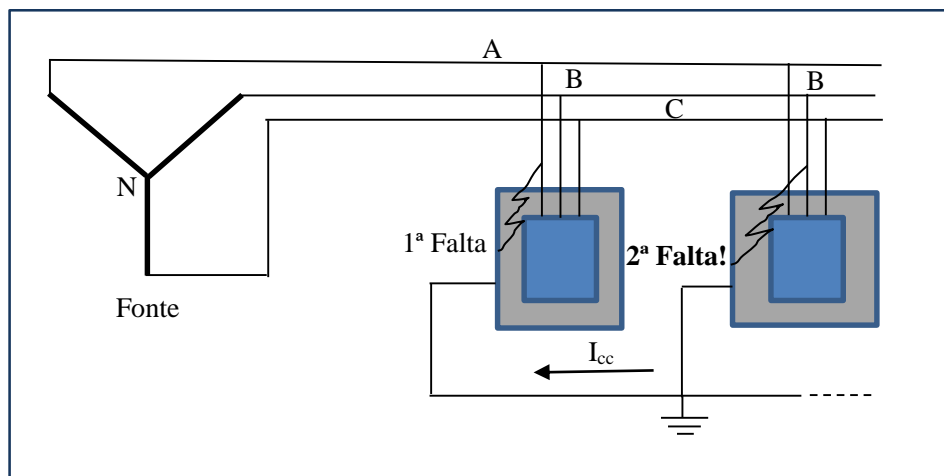


FIG. 47 – SISTEMA ELÉTRICO ISOLADO E O PROBLEMA DA SEGUNDA FALTA

Nesta figura verifica-se que as cargas estão aterradas (por questões de equipotencialização e necessidade de descarga eletrostática) e ocorreu uma primeira falta. Não tendo sido esta corrigida (o que nem sempre é fácil) e ocorrendo a segunda falta, esta tem consequências desastrosas, na medida em que uma corrente de curto-circuito se estabelece entre fases A e B, provocando sérios prejuízos nos dois equipamentos envolvidos. É claro que uma proteção de sobrecorrente estará prevista para a eliminação rápida da falta.

2.2. Sistemas aterrados

Os sistemas aterrados caracterizam-se por uma ligação, direta ou por meio de alguma impedância, do neutro da fonte (gerador ou rede elétrica) para a terra. São classificados conforme o tipo de aterramento realizado tanto do lado da fonte quanto do lado da carga (consumidor). Classificam-se, portanto, de acordo com a Norma NBR 5410/2004, como segue (primeira letra: refere-se à Fonte; segunda letra: refere-se à carga):

- a) TN-C: O neutro da fonte é aterrado e um condutor, partindo daí, é levado à carga, que é aterrada por esse condutor, que combina (C) as funções de neutro (N) e PE (PE = *Protection Earth*).

- b) TN-S: O neutro (N) e o condutor de proteção (PE) partem do neutro aterrado da estrela do secundário da fonte e seguem separadamente (S) até o consumidor.
- c) TT: tanto a fonte quanto a carga ou consumidor estão aterrados por meio de eletrodos de aterramento independentes.
- d) IT: a fonte é isolada ou aterrada por meio de impedância de grande valor, e o consumidor é aterrado por meio de eletrodos de aterramento independentes, ou não.

3. ESQUEMAS NORMALIZADOS DE ATERRAMENTO

A norma NBR 5410 define os seguintes **esquemas** de aterramento, já acima brevemente descritos.

3.1. Esquema TN-C

3.1.1. Descrição

O neutro da fonte é aterrado e um condutor, partindo daí, é levado à carga, que é aterrada por esse condutor. O condutor de aterramento, neste caso, é chamado de PEN: condutor de proteção (PE = *Protection Earth*) e condutor neutro (N), simultaneamente. A letra C, portanto, refere-se à combinação das duas funções (N e PE) em um único condutor.

A Fig. 48 ilustra este esquema de aterramento.

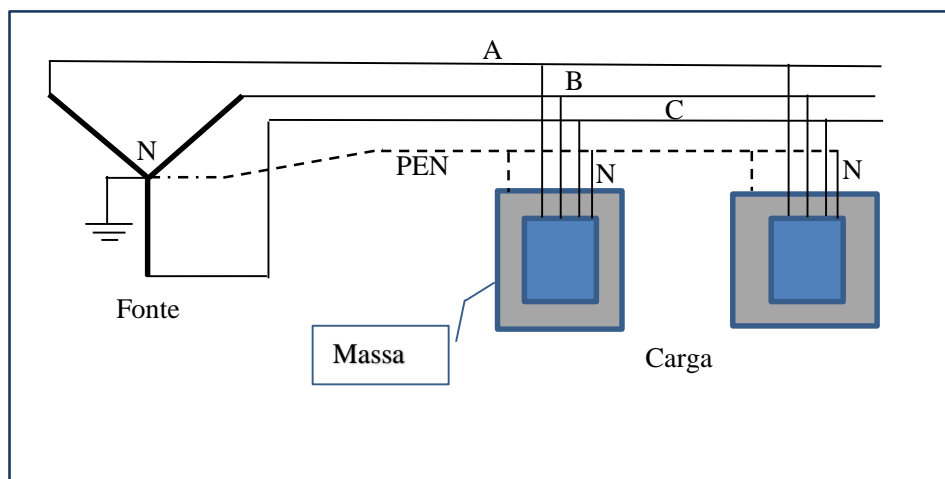


FIG. 48 – ESQUEMA DE ATERRAMENTO TN-C.

3.1.2. Aplicação

Este esquema é usualmente utilizado em entradas de serviço de instalações elétricas prediais. O PEN é levado, então, do neutro do transformador de distribuição (no poste, tipicamente) até o quadro geral de proteção e medição da instalação.

3.2. Esquema TN-S

3.2.1. Descrição

Neste esquema, o ponto N da estrela da fonte (secundário do transformador, por exemplo) é aterrado e dele partem dois condutores: o neutro (N) e o condutor de proteção ou terra (PE). Neste caso, embora tendo a mesma origem e sendo, ambos aterrados, cada condutor terá sua função própria: o neutro é um condutor de aterramento **funcional**; já o condutor PE é um condutor de aterramento de **proteção**. O neutro será utilizado, portanto, para ligar cargas monofásicas ou que exijam tensão mais baixa do que a disponível entre fases. Já o PE será utilizado para a ligação das massas dos equipamentos e para equipotencialização (ligação de todas as massas metálicas da instalação).

OBS.: O condutor neutro, sendo levado até ao consumidor tem, também, uma função muito importante que é garantir o equilíbrio das tensões para o caso

de cargas desequilibradas entre as fases. E, no caso de correntes trifásicas distorcidas, o neutro permitirá um percurso para as terceiras harmônicas e suas múltiplas e, com isto, garantirá a forma de onda senoidal das tensões de fase do sistema. (Sem o neutro, nesta situação de correntes de fase distorcidas, a tensão fase neutro também resultaria distorcida.)

A Fig. 49 ilustra o esquema de aterramento TN-S.

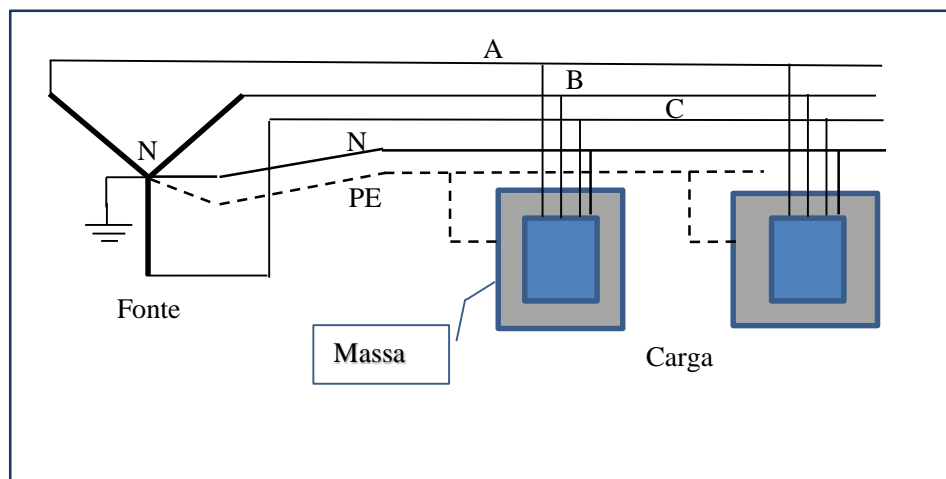


FIG. 49 – ESQUEMA DE ATERRAMENTO TN-S.

3.2.2. Aplicação

A aplicação mais usual deste esquema de aterramento é a ligação final de consumidores residenciais e comerciais. O neutro e o terra (PE) entram na instalação, a partir do quadro geral ou do quadro individual, para atender às suas funções próprias já descritas. No caso do PE, este condutor, de cor verde, alimentará as tomadas tripolares da instalação, disponibilizando o terceiro contato para a introdução dos plugues tripolares: fase – neutro – terra.

3.3. Esquema TT

3.3.1. Descrição

Neste esquema não há nenhum condutor de aterramento (PE) interconectando a fonte e os consumidores. Tanto a fonte quanto a carga são aterrados de forma independente por meio de seus eletrodos de aterramento

próprios. O neutro da fonte, portanto, estará aterrado, diretamente ou por meio de alguma impedância de aterramento. Este neutro poderá ser levado ao consumidor para exercer sua função já discutida acima. Mas, não sendo necessário – caso de circuitos trifásicos equilibrados (motores, por exemplo) – não será levado à carga.

As cargas podem ter um único e geral eletrodo de aterramento ou podem ter cada uma o seu próprio aterramento.

A Fig. 50 ilustra tal esquema de aterramento.

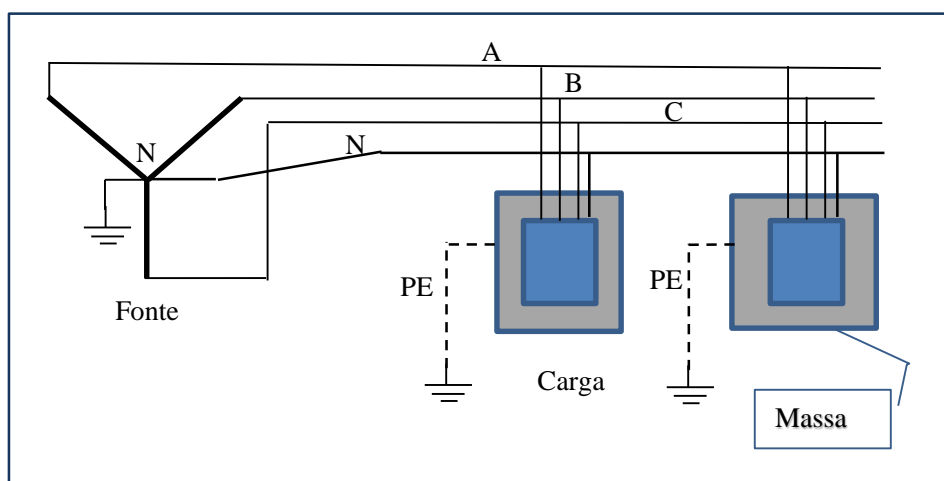


FIG. 50 – ESQUEMA DE ATERRAMENTO TT.

3.3.2. Aplicação

A aplicação deste esquema de aterramento se dá comumente em instalações industriais, por questões econômicas, particularmente. Vê-se que não haverá necessidade de se levar um condutor de proteção da fonte à carga, às vezes por distâncias bem consideráveis.

Em comparação com os esquemas anteriores, pode-se afirmar, também, que as correntes de curto-circuito serão menores, visto que neste esquema TT as resistências de aterramento dos eletrodos limitarão de forma significativa seus valores. Nos esquemas anteriores (TN-C e TN-S) o aterramento era condutivo, isto é: apenas a baixíssima impedância do condutor PE limitará a corrente de curto-circuito, além, é claro, das impedâncias da fonte e dos condutores fase.

3.4. Esquema IT

3.4.1. Descrição

Este esquema corresponde a um sistema elétrico isolado, conforme discutido na introdução deste capítulo e no seu item 2.

Neste esquema de aterramento, o neutro da fonte é completamente isolado da terra ou ligado a esta por meio de uma impedância de valor considerável (centenas de ohms). Já o consumidor terá o seu próprio sistema de aterramento, isto é, seus eletrodos de aterramento individuais ou geral.

A Fig. 51 ilustra o esquema de aterramento IT.

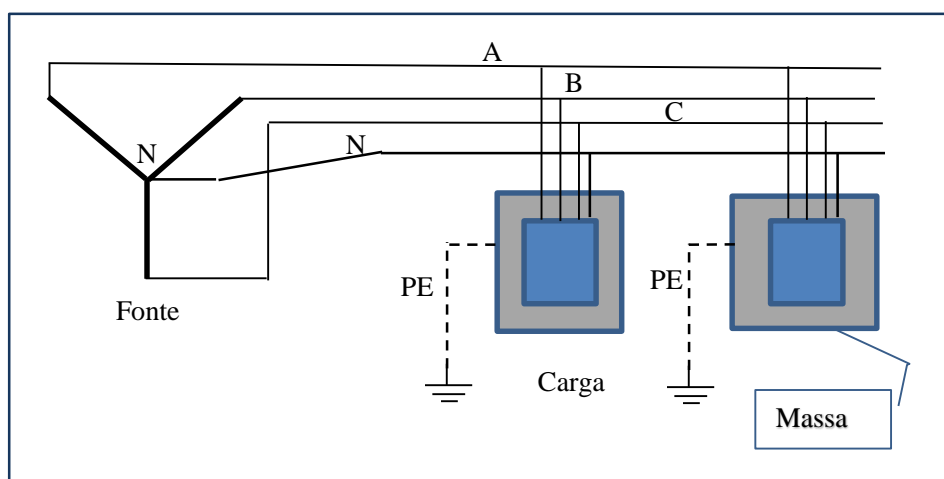


FIG. 51 – ESQUEMA DE ATERRAMENTO IT.

O condutor neutro (N) poderá ou não ser levado às cargas, dependendo da necessidade ou não, conforme já discutido na observação do item 3.2.1 (p. 85).

3.4.2. Aplicação

A aplicação usual deste esquema de aterramento é em indústrias e em hospitais, locais em que a continuidade do funcionamento das instalações elétricas é, obviamente, fundamental. A primeira falta não deverá desligar o circuito. Sistemas eletrônicos de alarme, sinalização e identificação da primeira falta são essenciais e a sua correção deverá ser feita o mais rapidamente possível para evitar os problemas relativos à segunda falta (ver item 2.1, Fig. 47, p. 83).

4. ATERRAMENTO E PREVENÇÃO CONTRA CHOQUE ELÉTRICO

Os esquemas de aterramento existem para adaptarem-se às circunstâncias da instalação, como visto acima. No entanto, o aterramento, em si, possibilita a ocorrência de choques elétricos em humanos e animais. Os conceitos mais importantes relativos ao estudo da prevenção contra tais choques estão a seguir.

4.1. Conceitos básicos

Conceitos como equipotencialização, eletrodos ou malhas de aterramento, resistência de aterramento, referencial de tensão nula, tensão de toque e tensão de passo, dentre outros devem ser bem entendidos.

Equipotencialização é o ato de interconectarem-se todos as massas (carcaças) metálicas de equipamentos e estruturas da edificação. Isto visa a evitar o aparecimento de diferenças de potencial perigosas em casos de curtos-circuitos e descargas atmosféricas ocorrentes na instalação.

Eletrodos ou malhas de aterramento são hastes enterradas verticalmente, cabos nus e fitas nuas enterrados horizontalmente, todos de cobre (ou, pelo menos, revestidos de cobre) em configuração (disposição circuital) apropriada destinada a prover baixos níveis de resistência de aterramento e pontos de dissipação de descargas atmosféricas ou estáticas.

O conceito de resistência de aterramento está ligado ao valor da resistência do eletrodo ou de algum ponto da malha de aterramento até um ponto suficientemente distante, de potencial nulo, denominado de referencial de tensão nula (o terra verdadeiro). (Vide Fig. 52.)

4.1.1. Referencial de tensão nula

É um ponto suficientemente distante de um eletroduto de aterramento, de potencial considerado nulo. Este ponto deve ser considerado, nos circuitos elétricos equivalentes, o terra verdadeiro, de tensão nula. A Fig. 52 esclarece tal conceito.

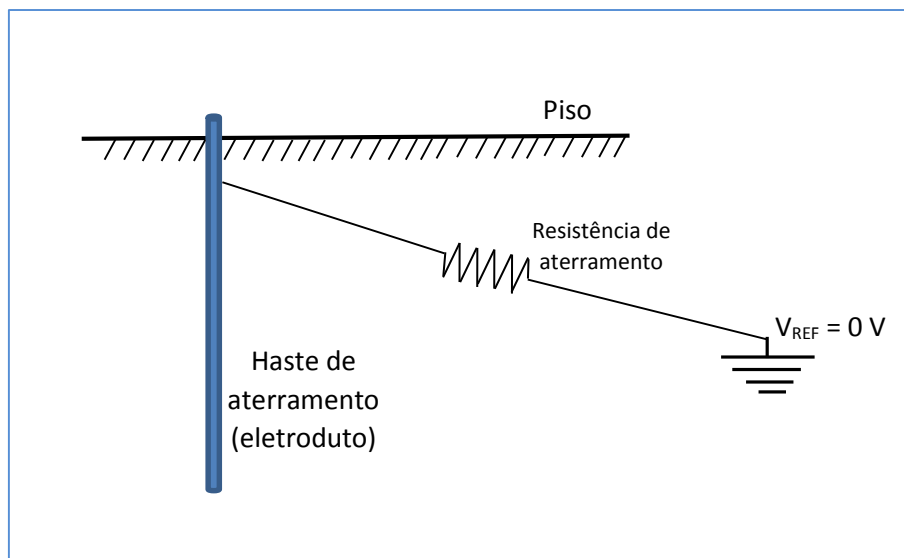


FIG. 52 – ELETRODO E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO, E REFERENCIAL DE TERRA.

4.1.2. Tensão de toque

O conceito de tensão de toque ou tensão de contato (V_c) pode ser ilustrado e esclarecido pela Fig. 53

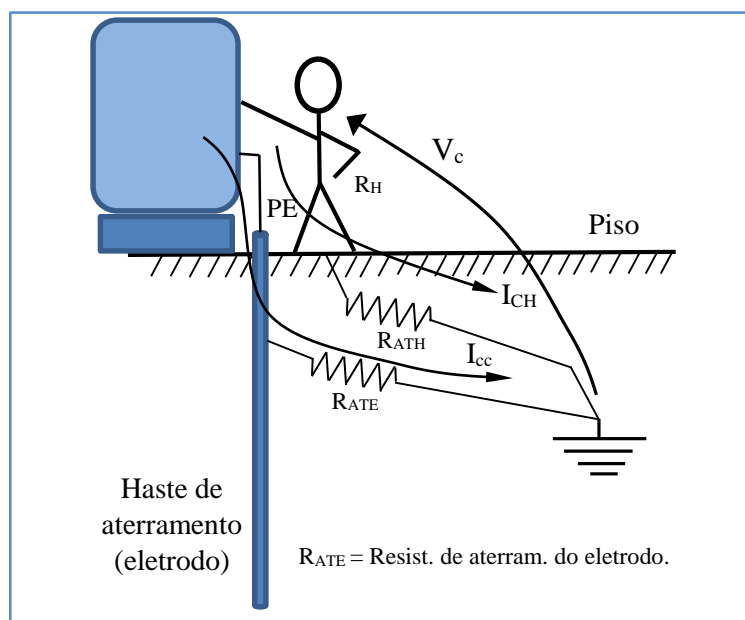


FIG. 53 – CONCEITO DE TENSÃO DE TOQUE.

Verifica-se, nesta figura, que a tensão de toque ou de contato (V_c) é estabelecida mediante a circulação de uma corrente de curto-circuito (ou de descarga atmosférica) no momento em que um indivíduo toca a carcaça do equipamento. A corrente de choque elétrico (I_{ch}) será dada por:

$$I_{CH} = \frac{V_c}{R_H + R_{ATH}}$$

Onde:

R_H = Resistência do corpo humano (1000 a 3000 ohms);

R_{ATH} = Resistência de aterramento do corpo humano.

Esta tensão de contato tem limites bem definidos pela Norma NBR 5410/2004. Por exemplo, para “situação 1” (= seca), a tensão de contato deve ser, no máximo, igual a 50 V. Outra referência é conhecer o valor máximo da corrente de choque elétrico, que não deve passar de 30 mA e não deve durar mais que 800 ms (milissegundos), conforme Norma NBR 5410 (Tabela 25).

4.1.3. Tensão de passo

A tensão de passo é um conceito que está ligado à tensão que surge quando um indivíduo dá um passo sobre um piso sob o qual está sendo percorrido por uma corrente de curto-circuito ou uma corrente de descarga atmosférica. A tensão entre um pé e o outro é resultante da diferença de potencial que surge pela passagem de parte daquela corrente através de uma resistência de terra existente entre os pés do indivíduo.

A Fig. 54 ilustra o conceito de tensão de passo (V_p).

Verifica-se, nesta figura, que a corrente de choque elétrico pode ser dada:

$$I_{CH} = \frac{V_p}{R_H + R_{ATH1} + R_{ATH2}}$$

Onde:

R_{ATH1} e R_{ATH2} = Resistências de aterramento do corpo humano.

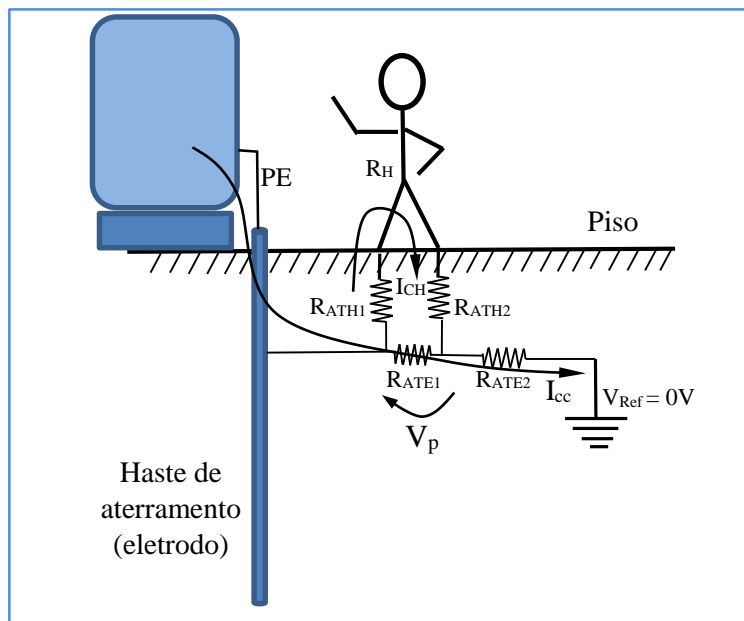


FIG. 54 – CONCEITO DE TENSÃO DE PASSO.

Mais uma vez, a tensão de passo deve ser limitada para que a corrente de choque elétrico não ultrapasse valores de 30 mA.

4.2. Cuidados na proteção contra choque elétrico

A Norma NBR 5410/2004 define com princípio fundamental na proteção contra choques elétricos o seguinte: partes vivas não devem ser acessíveis; e as massas metálicas não devem oferecer perigo, seja em condições normais seja em situações de falha de isolamento do equipamento.

4.2.1. Proteção por equipotencialização

Como já visto, a equipotencialização é o princípio que estabelece a ligação equipotencial de todas as massas metálicas da instalação. E que toda instalação elétrica deva dispor de um condutor de proteção (PE), em toda a sua extensão.

A equipotencialização exige, portanto, que, inclusive, as antenas (suas hastes metálicas) de rádio e de televisão sejam ligadas à rede de aterramento, isto é, aos condutores de descida dos sistemas de proteção contra descarga

atmosférica (SPDA), que, em última análise, ligam-se aos eletrodos de aterramento (ou à malha de aterramento) da instalação.

4.2.2. Proteção por seccionamento automático

A Norma trata detalhadamente os procedimentos para a implementação da denominada “proteção por seccionamento automático”. Mas como um resumo do que é mais essencial, pode-se dizer o seguinte.

Para o esquema TN-S, podem ser usados:

- Dispositivos de proteção a sobrecorrente (disjuntores termomagnéticos, por exemplo);
- Dispositivos DR (diferencial-residual) de alta sensibilidade (30 mA).

O esquema TN-C não admite o uso do DR, uma vez que os condutores N e PE constituem um único condutor PEN. O DR exige que N e PE sejam condutores distintos. Inclusive, chame-se a atenção, para o fato de que o DR é atravessado pelo condutor neutro (N) que, depois do DR torna-se isolado das massas; já o PE, ao contrário, não atravessa o DR e continua ligado às massas.

Para o esquema TT, o mecanismo adequado para implementar o seccionamento automático é a utilização do DR de alta sensibilidade.

CAPÍTULO VIII

PROBLEMAS DO CAPÍTULO I – CONCEITOS GERAIS

- 1.1) Quais são os objetivos das normas de instalações elétricas?
- 1.2) Quais são as duas normas NBR, mais atuais, para instalações elétricas em BT e MT, respectivamente?

1.3) O que é a NR -10? Trata de quê?

1.4) Para que serve a blindagem metálica de um cabo isolado de MT? E a capa externa?

1.5) Desenhar os esquemas de condutores elétricos: cabo isolado, cabo unipolar, e cabo multipolar (ou multiplexado).

- 1.6) Faça um esquemático de um circuito unifilar em que uma chave seccionadora seja usada para manobra.
- 1.7) Como pode ser bem definido o termo PROTEÇÃO, aplicado a sistemas elétricos industriais?

- 1.8) Estabeleça a diferença entre os termos “comando” e “manobra”.
- 1.9) Justificar a necessidade de se utilizar um fator de agrupamento, no dimensionamento de condutores fase, quando o circuito em foco estiver associado a outros circuitos no mesmo eletroduto ou canaleta ou outro meio de passagem real.

- 1.10) Explicar o significado das três temperaturas normalizadas de um condutor: serviço contínuo, sobrecarga e curto-circuito. Relacione o significado da temperatura ao tipo de corrente e tempo de duração possível.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO II – DIMENSIONAMENTO DE CONDUTORES

- 2.1) Explicar por que são necessários os fatores de correção de temperatura e de agrupamento no dimensionamento de condutores elétricos.
- 2.2) Explicar o significado das três temperaturas normalizadas de um condutor: serviço contínuo, sobrecarga e curto-circuito. E em que ponto do condutor isolado são medidas tais temperaturas?

- 2.3) Como se explica a “transformada fatores de correção” no dimensionamento dos condutores por capacidade de corrente (ou ampacidade ou limite térmico)?
- 2.4) Definir, da forma mais exata possível, uma corrente de curto-circuito elétrico.
- 2.5) Um circuito trifásico, de 8000VA, constituído por um cabo tripolar, com isolamento de EPR, passa no interior de uma canaleta ventilada embutida no piso, com outros dois cabos bipolares, correspondentes a dois circuitos monofásicos (FN), com todos os condutores em cobre. A temperatura ambiente é de 40°C e a tensão é de 127/220V. Pede-se determinar a bitola do condutor e a corrente nominal do disjuntor termomagnético (DTM) apropriado para esse circuito trifásico. (*Sabe-se que o método de instalação real, de número 43, “cabo unipolar ou cabo multipolar em canaleta ventilada embutida no piso” corresponde ao método de referência B1.*) Os DTM comerciais têm valores de correntes nominais na sequência: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40A.

- 2.6) O que são “condutores carregados” nas tabelas de dimensionamento de condutores da Norma NBR 5410? Por que somente duas opções: 2 e 3 condutores carregados?
- 2.7) Quando houver 6 condutores carregados em um método de instalação real, explique duas possibilidades de utilização das tabelas em termos de condutores carregados.
- 2.8) No caso de um circuito trifásico desequilibrado, com neutro, há dois procedimentos possíveis na consulta às tabelas, em termos de condutores carregados. Explicá-los.

- 2.9) Se os três condutores fase de um circuito trifásico, equilibrado, estiverem conduzindo correntes com conteúdo harmônico (correntes distorcidas), pergunta-se:
- a) Como se comportam as correntes de ordem ímpares, não múltiplas de três quando atingem a carga trifásica ligada em estrela com neutro? Isto é, o que acontece com elas?
 - b) Como se comportam as correntes múltiplas de três quando atingem a carga trifásica ligada em estrela com neutro? Explicar com clareza.
- 2.10) Desenhe um circuito equivalente monofásico, com fontes e cargas, que represente um circuito trifásico equilibrado, mas com significativo conteúdo harmônico de 3ª, 5ª e 7ª ordens. Mostre a relação desse circuito com as potências ativa (P), reativa (Q) e de distorção harmônica (D).

- 2.11) Quais são as três condições simultâneas exigidas por Norma, para que o condutor neutro possa ter sua bitola reduzida, em relação à das fases, quando estas tiverem bitola superior a 25mm^2 ?
- 2.12) Um circuito trifásico (3F+N) de tensão de linha 440 V alimenta uma carga desequilibrada constituída por: $P_{AB} = 4000\text{W}$, $\text{fp} = 0,9$; $P_{BC} = 3000\text{W}$, $\text{fp} = 0,65$; $P_{CA} = 5000\text{W}$, $\text{fp} = 0,8$; $P_{BN} = 2000\text{W}$, $\text{fp} = 0,7$; $P_{CN} = 2500\text{W}$, $\text{fp} = 0,5$ (fatores de potência indutivos). Pede-se provar que, no cálculo das correntes para dimensionamento da bitola do cabo mais carregado, a diferença entre o cálculo exato e o cálculo aproximado pode ser significativo (bem maior que 5%). Desenhar o esquema do circuito e utilizar a sequência ABC, com a tensão V_{AN} na referência (0°).

- 2.13) Por que a corrente no condutor neutro de um circuito trifásico equilibrado, mas com correntes com conteúdo harmônico de ordem 3 e seus múltiplos, maior que 33%, terá valor maior do que a corrente das fases?
- 2.14) Considerando-se um condutor de proteção que siga um caminho individual, sem acompanhar os condutores fase e sem proteção mecânica, qual deverá ser sua seção transversal mínima?

2.15) Dimensionar a bitola de um condutor de proteção de um circuito de distribuição que liga um QGF a um CCM, sabendo-se que os condutores fase são de 70 mm^2 , isolados em PVC/70°C.

2.16) Explicar a diferença entre queda de tensão e variação de tensão.

- 2.17) Conhecendo-se, antecipadamente, a bitola do condutor, a queda de tensão correspondente (em %), para um circuito monofásico, pode ser calculada, de forma aproximada, a partir da expressão abaixo. Explicar o significado de cada elemento da expressão.

$$\Delta V_c = \frac{2.L_c.I_c.(R.\cos \phi + X.\sin \phi)}{10.V_{FN}} (\%)$$

- 2.18) Se um condutor de seção transversal de 25mm² tem capacidade de 117 A, na Tabela de capacidade de corrente (isolação EPR), e sua corrente de projeto é afetada por um fator de agrupamento de 0,56, pede-se determinar, com justificativa, a corrente nominal do disjuntor para este circuito, sabendo-se que os disjuntores comerciais disponíveis são: 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 90 e 100 A. Determinar, ainda, o valor máximo da corrente de projeto possível, neste caso.

- 2.19) Determinar a seção dos condutores fase e neutro de um circuito 3 ϕ , equilibrado, que alimenta um CCM ao qual estão conectadas várias máquinas de controle numérico que demandam uma potência de 100kVA em 380V. Nas medidas efetuadas no circuito, foram identificados componentes harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens, com valores eficazes iguais a 45, 32, 21 e 15 A, respectivamente. Os condutores são do tipo isolado em PVC/750V e estão instalados em eletroduto de PVC, a 30°C, contido em canaleta ventilada construída no piso (método de referência B1). Calcular, ainda, o valor da corrente que circulará pelo neutro.
- 2.20) Explicar, por meio de diagrama fasorial apropriado, por que a queda de tensão de condutores elétricos de um circuito, monofásico ou trifásico, pode ser dada, de forma aproximada, em função da expressão “ $R \cdot \cos\phi + X \cdot \sin\phi$ ”, onde R e X são parâmetros dos condutores e ϕ é o ângulo do fator de potência da carga.

2.21) Explique, com clareza, a que corresponde a expressão abaixo e tente demonstrar, basicamente, a sua origem.

$$S_c = \frac{\sqrt{T_e} \cdot I_{cs}}{0,34 \times \sqrt{\log \left(\frac{234 + T_f}{234 + T_i} \right)}}$$

2.22) Onde: I_{cs} = corrente de curto-circuito; T_e = tempo de eliminação da falta; T = temperaturas final e inicial; S_c = seção transversal do condutor.

2.23) Por que a corrente no condutor neutro de um circuito trifásico equilibrado, mas com correntes com conteúdo harmônico de ordem 3 e seus múltiplos, maior que 33%, terá valor maior do que a corrente das fases?

PROBLEMAS DO CAPÍTULO III – MOTORES ELÉTRICOS

- 3.1) Definir “potência nominal” de um motor elétrico de indução.
- 3.2) Determinar a potência nominal (kW) e especificar a potência nominal (em cv) de um motor trifásico de indução de 380 V, 4 polos, que deva acionar um ventilador destinado a produzir uma vazão de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ sob uma pressão de 120 mmHg.

- 3.3) Calcular a potência nominal (em kW e cv) de um motor de indução trifásico que será acoplado a uma bomba centrífuga, cuja vazão (Q) é de 0,50 m³/s e cujo rendimento é 0,6. A altura de recalque mais a de elevação é de 25 m e destina-se à captação de água potável.
- 3.4) Dado um motor trifásico de indução de 100 cv, 380V/4 polos, fator de potência de 0,87, com corrente de rotor bloqueado igual a 6,7 vezes a corrente nominal e rendimento de 92%, pede-se calcular a queda de tensão percentual provocada pela partida do motor, supondo CCM alimentado com tensão vinda do QGF, com cabo tripolar de bitola 95 mm²/PVC ($R = 0,2352 \text{ m}\Omega/\text{m}$; $X = 0,1090 \text{ m}\Omega/\text{m}$), com comprimento total de 130 metros (QGF ao motor). Comparar com a queda de tensão percentual máxima permitida por Norma. A queda de tensão é aceitável para as condições dadas? Justificar.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO IV – FATOR DE POTÊNCIA

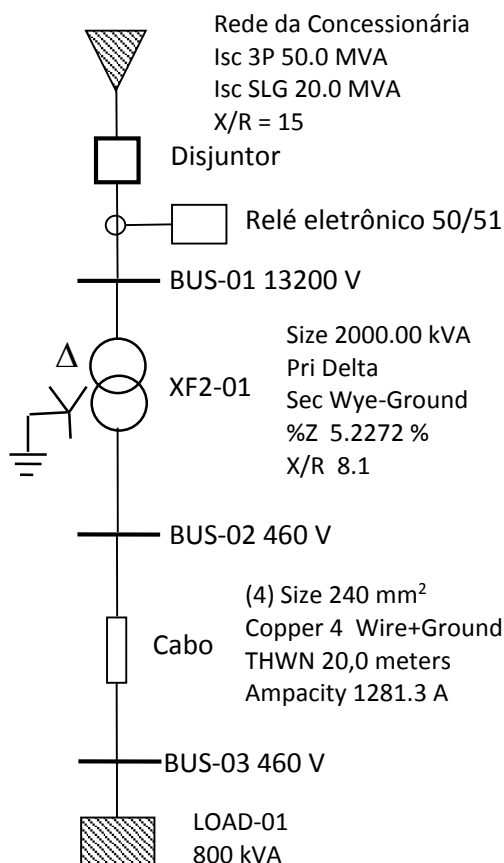
- 4.1) Qual é o maior valor de queda de tensão percentual aceito pela Norma para o caso de partida de motores de indução? E qual é o fator de potência sugerido pela Norma para cálculos nesta situação?
- 4.2) Considerar uma instalação industrial na qual o expediente se encerra às 18h. Existe um transformador de força de 1000 kVA-380/220V que opera em vazio ao término do expediente. Determinar a potência nominal do banco de capacitores que será necessário para corrigir o fator de potência do transformador para o valor unitário, sabendo-se que sua corrente de magnetização é de 1,5% da sua corrente nominal.

- 4.3) Determinar o fator de potência (fp), na demanda máxima prevista, de uma instalação industrial cuja carga seja composta de: * 25 motores 3φs de 3cv/380V/4 polos, com $fp = 0,73$; * 15 motores 3φs de 30cv/380V/4 polos, com $fp = 0,83$; * 500 lâmpadas fluorescentes de 220V/40W, com reator de baixo fator de potência (0,4 ind.) com perda de 15,3 W. *Sugestão: utilizar triângulos de potência na análise (método analítico).*
- 4.4) Liberação de potência instalada em transformador. Um projeto industrial tem uma potência instalada de 1500 kVA, com dois transformadores de 750 kVA, em paralelo. O fator de potência medido é de 0,87, para uma demanda máxima de 1480 kVA. Desejando-se fazer um aumento de carga com a instalação de um motor de 150 cv, com fator de potência de 0,87, calcular a potência necessária de um banco de capacitores, a fim de evitar alteração nas unidades de transformação. *Utilizar o método analítico.*

- 4.5) Desejando-se instalar num determinado CCM um motor de 100 cv/380V, com fator de potência 0,87 e rendimento de 0,92, sabendo-se que a demanda medida no seu circuito terminal é de 400 A e que o condutor tem seção de 300 mm² (limite de corrente de 435 A, considerando-se o condutor do tipo XLPE, instalado no interior de eletroduto de seção circular, embutido em parede termicamente isolante – A1), determinar a quantidade de capacitores e a potência nominal necessária para evitar a troca de condutores. O fator de potência medido no barramento do CCM é de 0,71 indutivo. O Circuito mede 150m. *Sugestão: utilizar análise por triângulo de correntes.*

PROBLEMAS DO CAPÍTULO V – CURTO-CIRCUITO

- 5.1) No sistema mostrado no unifilar abaixo, pede-se a corrente de curto-circuito fase-terra na barra da carga. Faça análise por componentes simétricos e utilize o simulador PTW – SKM, ou algum equivalente, para verificações. (Obs: THWN = *Thermoplastic Heat and Water Resistant Nylon Coated*.)



- 5.2) Se o transformador do unifilar acima fosse ligado em Y-Yaterrado, tente mostrar que não haveria circulação de qualquer corrente durante uma falta à terra na mesma barra. Use os circuitos de sequência zero para a demonstração.
- 5.3) Considere que α seja o ângulo medido a partir do zero da tensão senoidal da rede elétrica e que esse ângulo indique o instante em que ocorra um curto-circuito. Considere, ainda, que o ângulo da impedância de curto-circuito seja o ângulo ϕ e que a relação X/R dessa impedância seja 10. Pede-se:
- Explicar qual é a pior situação de um curto-circuito (trifásico ou monofásico). Utilizar texto explicativo e um gráfico da forma da corrente para ilustrar a explicação;
 - Calcular o instante (em milissegundo, a partir do zero da tensão senoidal) em que, ocorrendo o curto-circuito, a corrente resulte com fator de assimetria unitário.

- 5.4) Considere uma parte de um sistema elétrico de potência constituído por: a) um gerador síncrono de polos lisos, aterrado por meio de uma reatância de 0,10 pu, com reatância, reatância transitória de 0,20 pu, reatância de sequência negativa de 0,20 pu e reatância de sequência zero igual a 0,08 pu; b) um transformador elevador (Δ -Y aterrada) com reatância igual a 0,10 pu (considerar $x_1 = x_2 = x_0$). Pede-se:
- a) A corrente de curto-circuito bifásico (fases B e C) nos terminais do secundário do transformador (em pu); por meio dos circuitos de sequência apropriados;
 - b) A corrente de curto-circuito monopolar (fase A) nos terminais do secundário do transformador (em pu) por meio dos circuitos de sequência apropriados.
- 5.5) Descreva duas situações em que uma corrente de curto-circuito qualquer não apresente assimetria significativa nos primeiros ciclos. Considere que α seja o ângulo medido a partir do instante zero da tensão senoidal da rede elétrica.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO VI – COMPONENTES SIMÉTRICOS

- 6.1) O que afirma o Teorema de Fortescue sobre um conjunto n-fásico de fasores desequilibrados? Faça algum desenho/esquema para explicar.
- 6.2) Quais são as características particulares dos componentes de sequência zero de um circuito elétrico de potência? Como se comparam esses componentes com as correntes harmônicas de terceira ordem e suas múltiplas de uma corrente distorcida de uma instalação elétrica?

- 6.3) Dadas as seguintes tensões de fase desequilibradas pede-se calcular seus componentes de sequência zero, positiva e negativa (V_{a0} , V_{a1} e V_{a2}). $V_A = 100 \angle 10^\circ$ V, $V_B = 200 \angle 120^\circ$ V e $V_C = 190 \angle -100^\circ$ V. Prove que $V_B = V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2}$.
- 6.4) Considere uma parte de um sistema elétrico de potência constituído por: a) um gerador síncrono de polos salientes, aterrado por meio de uma reatância de 0,09 pu, com reatância subtransitória igual a 0,20 pu, reatância de sequência negativa igual a 0,25 pu e reatância de sequência zero igual a 0,08 pu; b) um transformador elevador com reatância igual a 10% ($x_0 = x_1 = x_2$). Desenhe os circuitos monofásicos equivalentes (separados) de sequência positiva, negativa e zero desse subsistema, para cálculos de curto circuito nos terminais do transformador.

6.5) Continuando o exercício anterior, pede-se desenhar os circuitos para os cálculos dos seguintes curtos-circuitos: a) trifásico; b) bifásico; c) fase-terra.

6.6) Por que, no circuito monofásico equivalente de impedâncias de sequência zero, uma impedância de aterramento de neutro de gerador deve ser multiplicada por três (3)? Explicar por meio de algum circuito elétrico adequado.

- 6.7) Considere uma parte de um sistema elétrico de potência constituído por: a) um gerador síncrono de polos salientes (35MVA, 13,8kV), aterrado por meio de uma reatância de 10%, com reatância subtransitória de 18%, reatância transitória de 27%, reatância de sequência negativa de 20% e reatância de sequência zero 15%; b) um transformador elevador (35MVA, 13,8kV Y– 115kV Y aterrada) com reatância igual a 10% e reatância de sequência zero igual a 85% da sua reatância. Pede-se:

A corrente de curto-circuito monopolar (fase A) nos terminais do primário do transformador (em pu e em A) por meio dos circuitos de sequência apropriados.

PROBLEMAS DO CAPÍTULO VII – ATERRAMENTO

- 7.1) O que teria levado os engenheiros do início das instalações elétricas industriais a optarem por um sistema elétrico isolado?
- 7.2) Quais são algumas importantes vantagens de um sistema elétrico aterrado em relação a um não aterrado?
- 7.3) O que é que caracteriza um sistema elétrico dito isolado?

7.4) O que é que caracteriza uma sistema elétrico dito aterrado?

7.5) Onde costuma ser aplicado o esquema de aterramento TN-S? Desenhar o esquema de aterramento e explicar por que ele pode ser definido como um sistema de aterramento condutivo.

7.6) O que é e para que serve a equipotencialização em um sistema de aterramento?

7.7) Explicar o conceito de terra verdadeiro ou ponto de aterramento de tensão nula.

BIBLIOGRAFIA

1. MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2010.
 2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instalações elétricas de média tensão. NBR 14039, 2005.
 3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instalações elétricas de baixa tensão. NBR 5410, 2004.
 4. COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações elétricas**. 5.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.
 5. HEMANT, Joshi. **Residential, industrial and commercial electrical systems – network and installation**. Nova Delhi: Tata McGraw Hill, 2008, Vol.2.
 6. ARAGÃO FILHO, W. C. P. de. **Eletrônica de potência I – Retificadores monofásicos e trifásicos**. Ed. do Autor, Vitória – ES, 1.ed, 2012.
 7. KINDERMAN, G. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3.ed. Florianópolis – SC: Edição do Autor, 2012. Vol. 1.
 8. SKM Systems Analysis, Inc. Disponível em: < <http://www.skm.com>>. Acesso em: 20 de outubro de 2014.
-