



**FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE
INSTITUTO ENSINAR BRASIL - REDE DOCTUM DE ENSINO**

HARLEN GYRESS ALVES GAMALIEL

ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

**João Monlevade
2019**

HARLEN GYRESS ALVES GAMALIEL

ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade Doctum de João Monlevade, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Professor Orientador: Rubem Geraldo Vasconcelos Machado

João Monlevade

2019

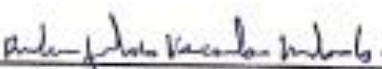
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS, elaborado pelo aluno HARLEN GYRESS ALVES GAMALIEL, foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceito pelo curso de Engenharia Elétrica do Instituto Ensinar Brasil de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de:

BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA

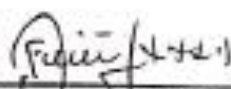
João Monlevade 11 de Dezembro 2019.



Rubem Geraldo Vasconcelos Machado.



Rinaldo Nonato e Silva



José Olímpio dos Santos Filho

Dedico esse trabalho aos meus familiares e principalmente a Deus por me guiar nessa longa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por mais esta oportunidade que me foi concedida, de aprendizado e realização pessoal.

Agradeço aos meus familiares e amigos, por me apoiarem e compreenderem a minha ausência em momentos que não pude estar junto a eles.

A Deus por me guiar, dar força e saúde durante esses anos de uma longa jornada de trabalho e estudo.

Aos Professores pelo conhecimento passado, por orientar e apoiar durante o curso

Ao Curso de Engenharia Elétrica da rede Doctum, e aos colegas que convivi ao longo desses anos.

Ao meu orientador, professor Prof. Msc. Rubem Geraldo Vasconcelos Machado, pelo apoio, pela orientação e profissionalismo, contribuindo positivamente para realização deste trabalho.

A todos muito obrigado!

“O cálculo das correntes de curto-circuito no sistema elétrico industrial de baixa e alta tensões é primordial para a especificação de equipamentos, condutores e elaboração do projeto de proteção (MAMEDE FILHO, 2012).”

RESUMO

Os estudos de curto circuitos em um sistema elétrico tem enorme importância para o planejamento e operação do mesmo. Através dele pode-se antever consequências danosas que podem acontecer durante a ocorrência de um curto circuito. Em instalações industriais, quando ocorre uma falta, alguns equipamentos acabam contribuindo para o aumento da corrente. Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo sobre os curtos circuitos em sistemas elétricos industriais. Este estudo visa demonstrar a contribuição dos motores de indução para a elevação das correntes na ocorrência de um curto circuito. São apresentados aspectos conceituais sobre as correntes de curto circuito, uma breve introdução teórica sobre o funcionamento dos geradores síncronos e motores de indução, explicando objetiva e resumidamente os principais fenômenos físicos pertinentes ao funcionamento da máquina, incluindo aspectos construtivos, equações e a modelagem física e matemática. Para o cálculo das correntes de curto circuito foram tomadas como base as metodologias das normas internacionais "ANSI" e "IEC", nas quais foram demonstradas as equações indicadas para a determinação das correntes. Foi executado o cálculo da corrente de curto circuito de um motor de indução de 125 hp, a fim de demonstrar sua contribuição para a elevação da corrente. Logo após foi realizado uma simulação através do software MATLAB, utilizando os dados do mesmo motor. Por fim, foi feito uma análise comparativa com os valores encontrados.

Palavras-chave: Correntes de curto circuito. Instalações elétricas industriais. Motores de indução. Geradores síncronos.

ABSTRACT

The studies of short circuits in an electrical system is of great importance for its planning and operation. Through it one can foresee harmful consequences that can happen during the occurrence of a short circuit. In industrial installations, when a fault occurs, some equipment ends up contributing to the increase of current. In this context, the present work presents a study about short circuits in industrial electrical systems. This study aims to demonstrate the contribution of induction motors to the elevation of currents in the event of a short circuit. Conceptual aspects of short circuit currents are presented, a brief theoretical introduction on the operation of synchronous generators and induction motors, objectively and briefly explaining the main physical phenomena pertinent to the machine operation, including constructive aspects, equations and physical modeling. mathematics. For the calculation of short circuit currents, the methodologies of the international standards "ANSI" and "IEC" were taken as basis, in which the equations indicated for the determination of currents were demonstrated. The calculation of the short circuit current of a 125 hp induction motor was performed to demonstrate its contribution to the current elevation. Soon after, a simulation was performed using the MATLAB software, using data from the same engine. Finally, a comparative analysis was made with the values found.

Key words: Short circuit currents. Industrial electrical installations. Induction motors. Synchronous generators.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Corrente de curto-circuito	26
Figura 2: Corrente simétrica	28
Figura 3: Onda ac em decaimento	29
Figura 4: Corrente assimétrica	30
Figura 5: Curto-circuito trifásico.....	31
Figura 6: Curto-circuito bifásico.....	32
Figura 7: Curto-circuito monofásico.....	32
Figura 8: Diagrama em corte de um gerador síncrono.....	34
Figura 9: Gráfico fluxo magnético x corrente de campo	35
Figura 10: Circuito equivalente completo de um gerador síncrono	36
Figura 11: Reação de armadura.....	38
Figura 12: Diagrama fasorial simplificado com a resistência de armadura ignorada.....	39
Figura 13: Fluxo de potência de um gerador síncrono	40
Figura 14: Representação de um gerador síncrono	43
Figura 15: Corrente de curto-circuito nos terminais do gerador	44
Figura 16: Variação da impedância da máquina no tempo, durante	47
Figura 17: Motor de indução.....	48
Figura 18: Circuito equivalente de um motor de indução	51
Figura 19: Conjugado motor de indução	52
Figura 20: Conjugado induzido versus velocidade mecânica.....	53
Figura 21: Fluxo de potência de um motor de indução.	53
Figura 22: Circuito equivalente por fase de um motor de indução	54
Figura 23: Diagrama de circuito equivalente (sistema de sequência positiva)	65
Figura 24: Diagrama fasorial de gerador síncrono em condições nominais.....	69
Figura 25: Fatores decréscimo CA e CC para falhas trifásicas e fase-terra com geração remota para disjuntores de 8, 5, 3 e 2 ciclos	78
Figura 26: Fatores decrescentes CA e CC para falhas fase-terra com geração local para disjuntores de 8, 5, 3 e 2 ciclos	79
Figura 27: Fatores decréscimo CA e CC para falhas trifásicas e fase-terra com geração remota para disjuntores de 8, 5, 3 e 2 ciclos	80
Figura 28: Modelo de circuito para assimetria.....	81
Figura 29: Diagrama unifilar	91

Figura 30: Circuito equivalente.....	92
Figura 31: Circuito no domínio da frequência.....	93
Figura 32: Folha de dados motor 90 KW.....	105
Figura 33: Circuito equivalente motor 90 KW.....	106
Figura 34: Folha de dados motor 185 KW.....	107
Figura 35: Circuito equivalente motor 185 KW.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fator de tensão "C"	60
Tabela 2: Fator de assimetria.....	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 0,5 \times 1/60$	96
Gráfico 2: Corrente total no ponto de falta em $t = 0,5 \times 1/60$	97
Gráfico 3: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 1/60$	98
Gráfico 4: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 0,04$	98
Gráfico 5: Corrente total no ponto de falta em $t = 0,04$	99
Gráfico 6: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 0,5 \times 1/60$	100
Gráfico 7: Corrente total no ponto de falta em $t = 0,5 \times 1/60$	100

ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampér

A.C. - Corrente alternada

ac - Componente de corrente alternada

ANSI - American National Standards Institute

B - Vetor densidade de fluxo magnético

$B_{líq}$ - Campo magnético líquido

B_R - Campo magnético do rotor

B_S - Campo magnético pela corrente do estator

B_m - Susceptância ($\frac{1}{X_M}$)

CA - Corrente alternada

CC - Corrente contínua

$cU_n/\sqrt{3}$ - Fonte de tensão equivalente

C_{max} - Fator da corrente de curto circuito máxima

C_{min} - Fator da corrente de curto circuito mínima

dc - Componente da corrente contínua transitória

E - Magnitude em r.m.s da fonte de tensão senoidal

E_A - Tensão interna gerada

$E_{A1,2,3}$ - Tensão interna gerada em cada fase

E_{est} - Tensão de armadura

E''_Y - F.E.M atrás da reatância subtransitória saturada de eixo direto

E'_Y - F.E.M atrás da reatância transitória saturada de eixo direto

E_y - F.E.M atrás da reatância síncrona saturada

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

f - Frequência

F_a - Fator de assimetria;

f_{se} - Frequência em [Hz]

f_{re} - Frequência elétrica do rotor

FIRJAN - Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

f.e.m - Força eletromotriz

G_c - Condutância ($\frac{1}{R_c}$)

H - Henry

Hz - Hertz

I - Corrente

I - Corrente de carga do gerador

i - Corrente instantânea

I_a - Corrente de armadura

I_b - Corrente de base

I_b - Corrente de curto-circuito simétrica

I_{cs} - Corrente de curto circuito simétrica

I_{cp} - Corrente de curto-circuito no ponto de entrega

I_f - Corrente de campo

I''_K - Corrente de curto-circuito subtransitória

I'_K - Corrente de curto-circuito transitória

I_K - Corrente de curto-circuito permanente

I_K - Corrente de curto-circuito em estado estacionário

i_p - Corrente de pico de curto-circuito

I''_K - Valor eficaz da componente simétrica ac

I_L - Corrente de linha

I_S - Magnitude da corrente r.m.s em estado estacionário simétrico

I_1 - Corrente no estator

IEC - International Electrotechnical Commission

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

kV - kilo volt

I_{rm} - Corrente nominal do motor

I_{kmax} - Corrente de regime máxima

I_{rG} - Corrente nominal do gerador

I_T^b - Corrente operacional mais alta antes do curto-circuito

I_{rT} - Corrente nominal do transformador do lado da alta ou da baixa tensão

I_{kmin} - Corrente de regime mínima

I_b - Corrente de interrupção simétrica no tempo t

I''_K - Corrente de curto-circuito inicial

I_{LR}/I_{rm} - Relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal do motor

I_{ca} - Corrente de curto circuito simétrica

I_{cftma} - Corrente de curto circuito fase terra máxima

jX_1 - Reatância do estator

jX_2 - Reatância do estator

$jXsI_A$ - Queda de tensão devido a reação de armadura e a autoindutância da bobina de armadura

K - Constante que depende dos aspectos construtivos da máquina U_s – Tensão de fase (V)

L - Indutância

L - Comprimento do condutor

L_c - Comprimento total do condutor

L_f - Indutância da bobina do rotor

n_m - Velocidade em [r.p.m.]

N_{cp} - Número de condutor por fase

n_{sinc} - Velocidade dos campos magnéticos

n_m - Velocidade mecânica do eixo do motor

N_C - Número de condutores por espira

N_{cp} - Número de condutor por fase

P - Número de polos da máquina

P_{krT} - Perda total nos enrolamentos para corrente nominal

p.u. - Por unidade

$P_{entrada}$ - Potência de entrada

P_{conv} - Potência convertida

P_{max} - Potência máxima

$P_{saída}$ - Potência de saída

pf_R - Fator de potência nominal do gerador

p_G - Faixa de regulação da tensão do gerador

P_{TM} - Potência ativa nominal em MW

p - Número de pares de pólos do motor

P_{cu} - Perdas no cobre

P_{nt} - Potência nominal do transformador

P_b - Potência de base

$Q_{saída}$ - Potência reativa de saída

r.m.s. - Valor eficaz

R - Resistência

R_a - Resistência de armadura
 R_f - Resistência da bobina do rotor
 R_{aj} - Resistor variável
 R_{AI_A} - Queda de tensão devido à resistência de armadura
 R_1 - Resistência dos enrolamentos do estator
 R_{L20} - Resistência a 20°
 R_L - Resistências de linhas aéreas e cabos
 R_{pt} - Resistência percentual
 R_{pt} - Resistência percentual
 R_{us} - Resistência do sistema
 X_{ut} - Reatância unitária
 R_{uc} - Resistência do circuito
 $R_{u\Omega}$ - Resistência do condutor
s - Segundos
s - Escorregamento
 S_{rT} - Potência aparente nominal do transformador
 S_{rTAB} - Potência aparente nominal entre os lados A e B
 S_{rTAC} - Potência aparente nominal entre os lados A e C
 S_{rTBC} - Potência aparente nominal entre os lados B e C
 S_{rm} - Potência aparente do motor
t - Tempo
 T_{ind} - Conjugado induzido
 t'_d - Constante de tempo subtransitória
 t'_d - Constante de tempo transitória
 t''_{do} - Constante de tempo subtransitória a vazio
 t'_{do} - Constante de tempo transitória a vazio
 t_g - Constante de tempo da componente de corrente contínua (da armadura)
 t''_d - Constante de tempo subtransitória
 t'_d - Constante de tempo transitória
 T'_s - Constantes temporais transitórias do estator (s)
 T'_r - Constantes temporais transitórias do rotor (s)
t - Tempo em ciclos na frequência do sistema
 T''_d e T''_a - Constantes de tempo

U_Y - Tensão nos terminais da máquina

U_n - Tensão nominal do sistema

U_{rT} - Tensão nominal do lado da alta ou da baixa tensão

U_{kr} - Tensão de curto-circuito para corrente nominal em %

U_{Rr} - Componente resistiva da tensão de curto-circuito em %

U_{rTA} - Tensão nominal do lado A

U_{RrAB}, U_{XrAB} - Componentes resistivos e reativos nominais da tensão de curto-circuito, dados em porcentagem entre os lados A e B

U_{RrAC}, U_{XrAC} - Componentes resistivos e reativos nominais da tensão de curto-circuito, dados em porcentagem entre os lados A e C

U_{RrBC}, U_{XrBC} - Componentes resistivos e reativos nominais da tensão de curto-circuito, dados em porcentagem entre os lados B e C

U^b - Tensão operacional mais alta antes do curto-circuito

U_m - Tensão nominal do sistema

U_{rG} - Tensão nominal do gerado

U_{rm} - Tensão nominal do motor

V - Velocidade da barra em relação ao campo magnético

V_\emptyset - Tensão nos terminais do gerador

$V_{\emptyset 1,2,3}$ - Tensão nos terminais do gerador em cada fase

V_L - Tensão de linha

V_b - Tensão de base

V_{np} - Tensão nominal primária no ponto de entrega, em Kv

V_\emptyset - Tensão de fase aplicada ao estator

X - Reatância

X_s - Reatância síncrona

X''_d - Reatância subtransitória saturada de eixo direto

X'_d - Reatância transitória saturada de eixo direto

X_d - Reatância síncrona saturada

X'_r - Reatância transitória do estator e do rotor (Ω)

X''_d - Reatância subtransitória rerelativa do gerador

X_{us} - Reatância do sistema de suprimento

X_{us} - Reatância do sistema de suprimento

X_{ut} - Reatância unitária

X_{uc} - Reatância do circuito
 X_{uc} - Reatância do circuito
 $X_{u\Omega}$ - Reatância do condutor
 Z_{utot} - Impedância total da instalação
 Z_{ut} - Impedância do transformador
 Z_{us} - Impedância no ponto de entrega
 Z_m - Impedância do rotor bloqueado
 Z_{ut} - Impedância unitária
 Z_{pt} - Impedância percentual
 Z_{pt} - Resistência percentual
 Z_Q - Impedância da concessionária
 Z_{GK} - Impedância subtransitória do gerador corrigida
 Z_G - Impedância subtransitória de sequência positiva do gerador
 Z_N - Impedância externa ao gerador (até o ponto de falta)
 Z'' - Impedância subtransiente do motor
 Z - Impedância
 Z_{eq} - Impedância equivalente
 Ω - ohms
 \varnothing - Ângulo
 ω - Velocidade angular
 τ - Tempo fictício
 \varnothing - Fluxo magnético
 τ - Torque induzido
 γ - Ângulo entre E_A e I_A
 θ - Ângulo entre tensão e corrente
 τ_{ind} - Torque induzido
 δ - Ângulo entre B_R e B_{liq}
 ω_s - Velocidade de rotação síncrona (s^{-1})
 α - Ângulo de tensão de fase no momento do curto-circuito
 σ - Coeficiente de vazamento total
 θ_e - Temperatura em graus Celsius
 α - Fator igual a 0,004/K
 \varnothing_T^b - ângulo do fator de potência antes do curto-circuito

ϕ_{rg} - Ângulo de fase

λ_{max} - Coeficiente de escala de corrente de regime máxima

μ - Fator de decremento para um tempo t

ΣP_{rm} - Soma das potências ativas nominais dos motores de média e baixa tensão que devem ser considerados

ΣS_{rm} - Soma das potências aparentes de todos os transformadores pelos quais os motores são alimentados

ΣZ_u - Somatório das impedâncias até o circuito

ΣZ_{u0c} - Somatório das impedâncias de sequência 0 até o circuito

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.2 Estrutura do trabalho	22
2 CURTO-CIRCUITO: ASPECTOS CONCEITUAIS	24
2.1 Introdução	24
2.2 Corrente de curto-circuito	25
2.3 Tipos de curto circuito.....	31
3 GERADORES SÍNCRONOS	33
3.1 Curto circuito nos terminais do gerador	42
4 MOTORES ASSÍNCRONOS	48
5 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	58
5.1 Introdução	58
5.2 Método de cálculo conforme a IEC 60909	58
5.2.1 Impedância da concessionária (ZQ)	62
5.2.2 Transformadores	64
5.2.3 Linhas aéreas e cabos	66
5.2.4 Fatores de correção	67
5.2.5 Geradores síncronos.....	68
5.2.6 Motores assíncronos	71
5.2.7 Corrente de curto-circuito de pico e eficaz	73
5.3 Método de cálculo apresentado na norma ANSI	74
5.4 Método apresentado em (IEEE Std 551 TM -2006)	80
5.5 Sequência de cálculo apresentado em MAMEDE FILHO (2012).....	84
5.5.1 Impedância do sistema (concessionária)	84
5.5.2 Impedância do transformador.....	85
5.5.3 Impedância do circuito.....	86
5.5.4 Corrente de curto-circuito	87
6 INFLUÊNCIA DO MOTOR PARA ELEVAÇÃO CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - SIMULAÇÃO	91
6.1 Simulação	95
7 CONCLUSÕES	101
7.1 Propostas para trabalhos futuras	102
REFERÊNCIAS	103

ANEXO A – FOLHA DE DADOS MOTOR DE INDUÇÃO 90 KW	105
ANEXO B – FOLHA DE DADOS MOTOR DE INDUÇÃO 185 KW	107
APÊNDICE A – ALGORÍTIMO	109

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial é responsável pelo maior consumo de energia elétrica do país, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018). Além disso, de acordo com Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN, 2011), a energia elétrica está entre os maiores custos na produção de uma indústria, em virtude de vários fatores, entre eles, o elevado valor das tarifas de energia elétrica impostas pelas concessionárias, que contribui de forma negativa para a competitividade das indústrias nacionais frente ao mercado internacional.

Associado aos custos de demanda de energia, outra adversidade comum nas indústrias são os defeitos no seu sistema elétrico. Tais falhas podem ocasionar em interrupção do processo influenciando no custo final do produto, na segurança das pessoas e estruturas das instalações. Dentre os diversos tipos de falhas que podem ocorrer em sistemas elétricos industriais, tem-se o curto-circuito.

A ocorrência desse fenômeno é algo extremamente indesejado em um sistema elétrico industrial, uma vez que pode gerar grandes transtornos como sobrecorrente, subtensão, variação da frequência, sobretensões transitórias em sistemas não aterrados, efeitos térmicos e dinâmicos nos equipamentos.

Estes problemas podem ocasionar: a interrupção do fornecimento de energia e, conseqüentemente, do processo; danos à instalação, comprometendo suas estruturas e a queima de equipamentos elétricos devido às elevadas correntes que circulam neste período; danos à segurança devido ao risco de incêndios e explosões principalmente em transformadores que contém óleo isolante e prejuízos financeiros gigantescos, algo inaceitável para o nível de competitividade atual do mercado, além de colocar em risco a vida das pessoas.

Em uma instalação elétrica industrial, as principais fontes de curto-circuito são geradores, motores síncronos e assíncronos (indução), banco de capacitores, entre outros. Cada equipamento contribui de certa forma para a elevação das correntes de curto circuito. Os principais elementos que determinam a amplitude de duração dessas correntes de curto-circuito são: o tipo de falta, as fontes presentes e as impedâncias entre as fontes e o local da falta (IEEE Std 551™, 2006). Além disso, os componentes da instalação podem estar expostos a agentes, como a umidade, impurezas e aquecimento excessivo devido à alta intensidade da corrente elétrica que

podem contribuir para a perda de isolamento, que é o principal fator para ocorrência de um curto circuito.

O estudo de curto circuito é algo de extrema importância para o planejamento e operação de um sistema elétrico industrial, pois, possibilita antever consequências danosas deste tipo de falha. A partir deste conhecimento, pode-se tomar decisões mais assertivas para definição de ajustes da proteção, visando a eliminação da falha com menor tempo possível, garantindo a integridade da instalação e a segurança das pessoas.

O cálculo das correntes de curto circuito, geralmente, é bastante complexo. Entretanto, são indispensáveis para os projetos de proteção de sistemas elétricos. Afim de simplificar esses cálculos, através dos anos, foram realizados vários estudos e estes resultaram em normas técnicas como por exemplo as internacionais IEC-60909, IEEE Std 551-2006, IEEE Std C37.010-2005 e a IEEE Std C37.013-2008, além de várias outras metodologias propostas para o cálculo dessas correntes.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo, realização de um estudo bibliográfico explicativo sobre curto-circuito em instalações elétricas industriais. Ademais, analisar o comportamento e a contribuição dos motores assíncronos para elevação das correntes de curto circuito, metodologias de cálculo das correntes de curto-circuito e normas técnicas. Realizar o cálculo manual e uma simulação utilizando o software MATLAB para determinar a contribuição dos motores de indução para elevação das correntes durante um curto circuito.

1.2 Estrutura do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho está estruturado para apresentar uma análise de curto-circuito em instalações elétricas industriais, demonstrando a contribuição dos motores assíncronos e geradores síncronos, desenvolvido em capítulos com a organização descrita a seguir.

No início (capítulo 2), é apresentado o que é curto-circuito e seus aspectos conceituais, abordando os tipos de curto circuitos, correntes de falta e seus efeitos, além das principais fontes de corrente de falha.

Em seguida (capítulo 3), buscou-se tratar dos geradores síncronos exibindo suas características, forma construtiva, funcionamento, circuito equivalente e as equações matemáticas, tendo com o objetivo entender seu comportamento durante uma falta e sua contribuição para o aumento da corrente de curto-circuito.

Na sequência, em motores assíncronos (capítulo 4), procurou-se apresentar os mesmos requisitos do capítulo anterior. Estes requisitos foram a base para a realização dos cálculos e da simulação, apresentados no capítulo 6.

No capítulo 5, são apresentadas metodologia de cálculo da corrente de curto-circuito, através das normas técnicas internacionais IEC e ANSI e outras metodologias.

Em seguida, no capítulo 6, serão realizados os cálculos da corrente de falta e simulações computacionais, utilizando o software MATLAB, para demonstrar a contribuição do motor de indução para a elevação da corrente no ponto de falta.

Por fim, no capítulo 7, são expostos os resultados e as considerações finais relacionados aos objetivos deste trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2 CURTO-CIRCUITO: ASPECTOS CONCEITUAIS

2.1 Introdução

Curto-circuito é a conexão intencional ou acidental de um condutor a uma outra parte do circuito com outro nível de potencial elétrico, através de uma baixa resistência ou impedância. Esta conexão pode ser de forma direta (curto-circuito franco) ou indireta (arco elétrico) (IEEE Std 551™, 2006, IEC 60909, 2001-07).

Os estudos de curto circuito são extremamente importantes para um sistema elétrico industrial e são aplicados para a segurança de pessoas, instalações, equipamentos, dimensionamento de dispositivos de proteção e condutores. Neste capítulo, serão expostos conceitos relevantes para o entendimento do fenômeno curto-circuito e as correntes que percorrem o circuito durante este período.

A corrente de curto-circuito é considerada o maior valor de corrente “disponível” que pode surgir nos circuitos em decorrência de uma falha. Ela está diretamente relacionada à capacidade das fontes (rede elétrica, geradores e motores) que suprem o sistema e, tipicamente, não depende da corrente de carga. Geralmente, quanto maiores as capacidades das fontes de potência que suprem o sistema, maiores serão as correntes de curto-circuito disponíveis (IEEE Std 551™, 2006).

Os principais fatores que determinam a magnitude e duração das correntes de curto-circuito são: o tipo de falta, as fontes presentes e as impedâncias entre as fontes e o local da falta.

Nas instalações industriais, outro fator que contribui de forma significativa para a elevação das correntes de curto circuito são as máquinas girantes. Principalmente, os geradores síncronos que são, geralmente, a fonte de potência da instalação e os motores assíncronos ou de indução que, quando ocorre um curto circuito, passam a atuar como geradores.

A determinação da corrente de curto circuito é de extrema importância, pois, elas assumem grandes valores durante uma falta. Além disso, podem colocar em risco a vida das pessoas e provocar diversos danos nas estruturas das instalações, tais como queima de equipamentos elétricos e eletrônicos, motores, geradores, transformadores e condutores da instalação, além de riscos de incêndios e explosões. Além das avarias nas instalações, as correntes de curto circuito produzem, esforços mecânicos, efeito térmico, efeito químico, efeito magnético e efeito fisiológico, que

atuam sobre condutores, barramentos, entre outros, provocando diversos danos, como por exemplo deterioração dos itens mencionados.

2.2 Corrente de curto-circuito

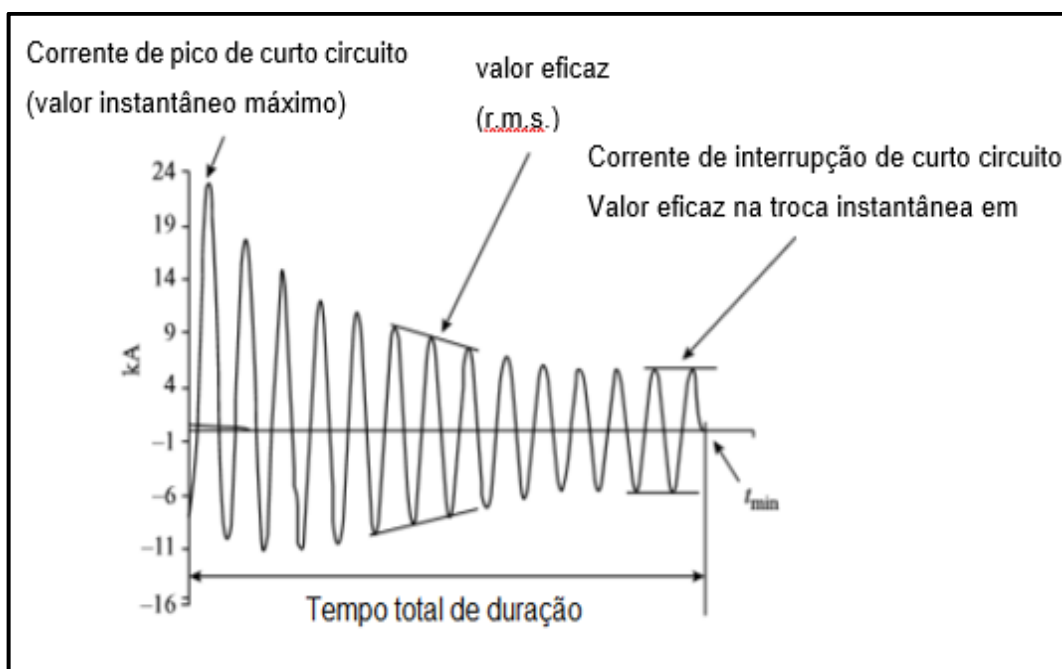
A magnitude da corrente de falta produz uma alta intensidade de calor, proporcional ao quadrado da corrente (I^2R) que pode deteriorar isolamentos e danificar componente conectados ao sistema elétrico. A corrente de curto-circuito é o maior valor de corrente que pode surgir em um circuito elétrico, podendo assumir valores entre 10 e 100 vezes a nominal. Sua magnitude e duração estão diretamente associadas com as fontes presentes no sistema. Ademais, o local, tipo de curto-circuito e a dimensão das fontes geradoras, influenciam tanto na amplitude inicial quanto na forma de onda da corrente de falta. Geralmente essas são ocasionadas devido à falta de isolamento (IEEE Std 551™, 2006).

As correntes de curto-circuito durante o período de falta assumem diferentes formas em relação ao eixo do tempo, que pode ser, simétrica, parcialmente assimétrica, totalmente assimétrica e inicialmente assimétrica e posteriormente simétrica. Essas correntes de falta, podem ser encontradas através das impedâncias a partir do local de falha e das fontes geradoras presentes no circuito (MAMEDE FILHO, 2012).

A figura 1 ilustra a forma de onda de uma corrente de curto-circuito com valores em quilo amperes em um determinado tempo. É no período inicial da falha que se tem a maior amplitude da corrente, cujo valor é essencial para especificações de máquinas. Essa corrente de falta será utilizada para especificar os esforços mecânicos aos quais os equipamentos devem suportar em um evento de curto-circuito. Os efeitos térmicos da corrente de falta são determinados pelo seu valor eficaz (r.m.s.) durante o período de falha.

O valor eficaz da corrente é utilizado para especificar medidas de proteção contra tensões de toque na instalação e proteção do sistema. O instante de tempo próximo ao momento em que se percebe um início de simetria na onda de corrente, é o momento em que os dispositivos seccionamento e proteção do sistema elétrico devem atuar na extinção da falta.

Figura 1: Corrente de curto-circuito



Fonte: Próprio autor

Como mencionado anteriormente, existem diversos fatores que determinam a amplitude e tempo de duração da corrente de curto-circuito. Para calcular as correntes de curto-circuito deve-se considerar a componente de corrente alternada “ac” e a componente da corrente contínua transitória “dc” da corrente de falta. Essa consideração é utilizada para obter o valor máximo total da corrente de pico ou r.m.s na ocorrência de uma falha no sistema elétrico, não deixando de analisar as contribuições dos motores (IEC 60909-0, 2001-07).

Para a modelagem do decremento da componente de corrente alternada é utilizado os conceitos de longe e próximo do gerador. Já para o modelamento do decremento dc, utiliza-se a definição de topologia do circuito, se a corrente de falta provem de um sistema em malha ou radial (IEC 60909-0, 2001-07).

A corrente de pico acontece durante o primeiro meio ciclo do sinal original antes da forma de onda simétrica, com uma relação da reatância dividido pela resistência (X/R) parcialmente baixa.

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 2E \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Em que:

- E – Magnitude em r.m.s da fonte de tensão senoidal;
 i – Corrente instantânea no circuito a qualquer momento depois que a chave é fechada;
 R – Resistência do circuito em ohms;
 L – Indutância do circuito em Henry (= reatância do circuito dividido por ω);
 t – Tempo em segundos;
 ϕ – Ângulo da tensão aplicada em radianos quando a falha ocorre;
 $\omega - \omega = 2\pi f$ em que f é a frequência do sistema em hertz (Hz);

A determinação do maior pico de corrente de falta, pode ser obtida por meio da equação 1 em relação às variáveis independentes t e α , das variáveis E , R , X , e ω , são fixos para qualquer circuito. A corrente de pico máxima é obtida pela manipulação de derivadas parciais da equação 1 que ocorre quando o ângulo da tensão passa por zero (IEEE Std 551™, 2006).

Ainda segundo a IEEE Std 551™ (2006) a corrente máxima, pode ser determinada através de um cálculo alternativo expresso na equação 2, mediante a equação empírica 3, na qual um tempo τ fictício é definido.

$$I_{pico} = \sqrt{2}I_{ac\ rms}(1 + e^{-\frac{2\pi\tau}{X/R}}) \quad (2)$$

$$\tau = 0,49 - 0,1e^{-\frac{X/R}{3}} \quad (3)$$

Já o cálculo da corrente de falta eficaz é obtido por meio da equação 4.

$$I_{rms} = I_{ac\ rms}\sqrt{1 + 2e^{-\frac{4\pi\tau}{X/R}}} \quad (4)$$

Um conjunto semelhante de equações pode ser usado para os cálculos de fatores de corrente eficaz do primeiro ciclo, como mostra a equação 5.

$$I_{rms} = \sqrt{I_{ac\ rms}^2 + I_{dc}^2} \quad (5)$$

$$I_{ac} = \sqrt{2}I_S \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (6)$$

$$I_{dc} = \sqrt{2} I_{ac\ rms} (0,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X/R}}) \quad (7)$$

Em que:

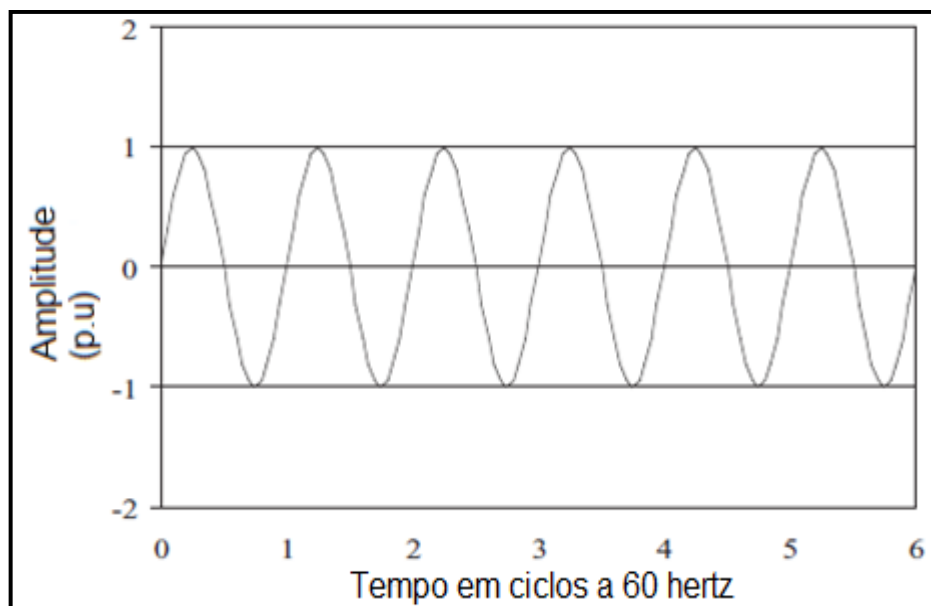
I_S – Magnitude da corrente r.m.s em estado estacionário simétrico;

Dependendo do tipo de falta, as correntes de curto-circuito podem ser assimétricas ou simétricas. Esses termos descrevem a forma de onda ac (corrente alternada) sobre o eixo dos tempos. (IEEE Std 551™, 2006).

A corrente é considerada simétrica, quando apresenta uma simetria em relação ao eixo dos tempos. Esta forma de onda é uma característica da condição em regime permanente da corrente de curto circuito. É utilizada para definir os efeitos térmicos e seu cálculo é utilizado para determinar equipamentos de proteção (MAMEDE FILHO, 2012).

A figura 2 demonstra uma forma de onda em regime permanente após um curto circuito simétrico, neste caso por exemplo as fontes armazenadoras de energia que contribuem para elevação da corrente nos primeiros ciclos do curto circuito já se descarregaram e a corrente se estabilizou em um determinado valor.

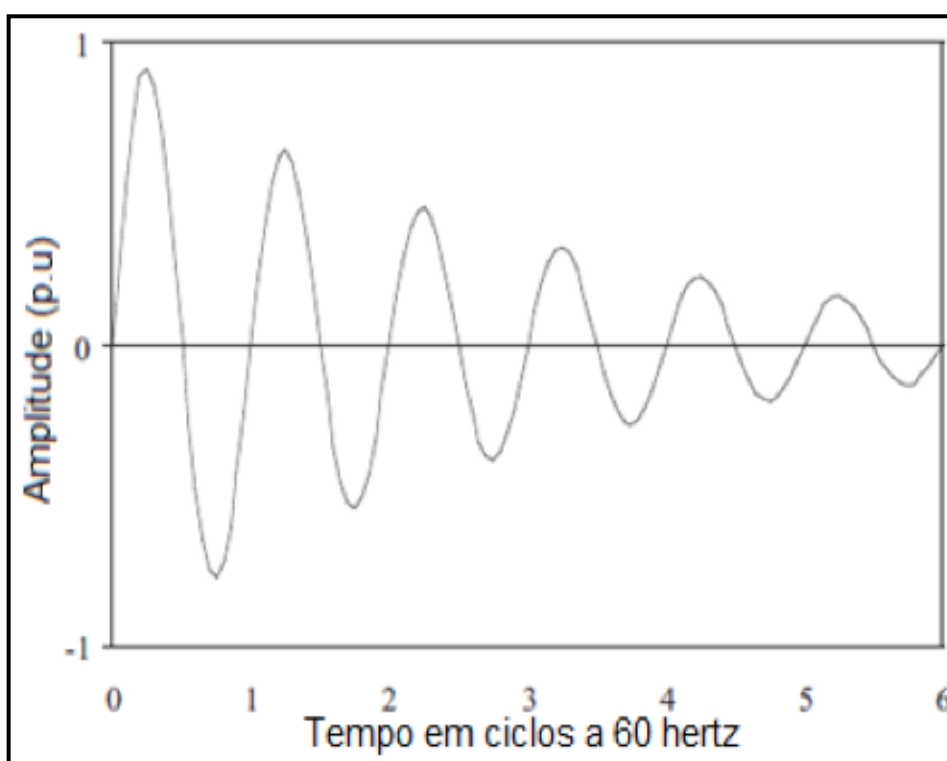
Figura 2: Corrente simétrica



Fonte: IEEE Std 551™, 2006

Já a figura 3 está demonstrando o amortecimento da corrente de curto circuito. Isto ocorre, por exemplo, porque os equipamentos acumuladores de energia estão contribuindo para elevação ou diminuição das correntes, descarregando a energia armazenada ou efetuando a acumulação de energia, respectivamente. Com o passar do tempo, esta energia vai se esgotando, com isso amortecendo até atingir a estabilidade em regime permanente.

Figura 3: Onda ac em decaimento



Fonte: IEEE Std 551™-2006

Já as correntes conhecidas como assimétricas demonstram uma assimetria em relação ao eixo dos tempos. Esta é uma forma de onda característica de períodos transitórios, tendendo à simétrica com o passar do tempo.

As correntes de curto-circuito são quase sempre assimétricas durante os primeiros ciclos após um curto-circuito e contém os componentes dc e ac, devido aos circuitos terem resistência e reatância. A máxima assimetria acontece para qualquer relação X/R e é iniciado próximo da tensão zero no momento de falha.

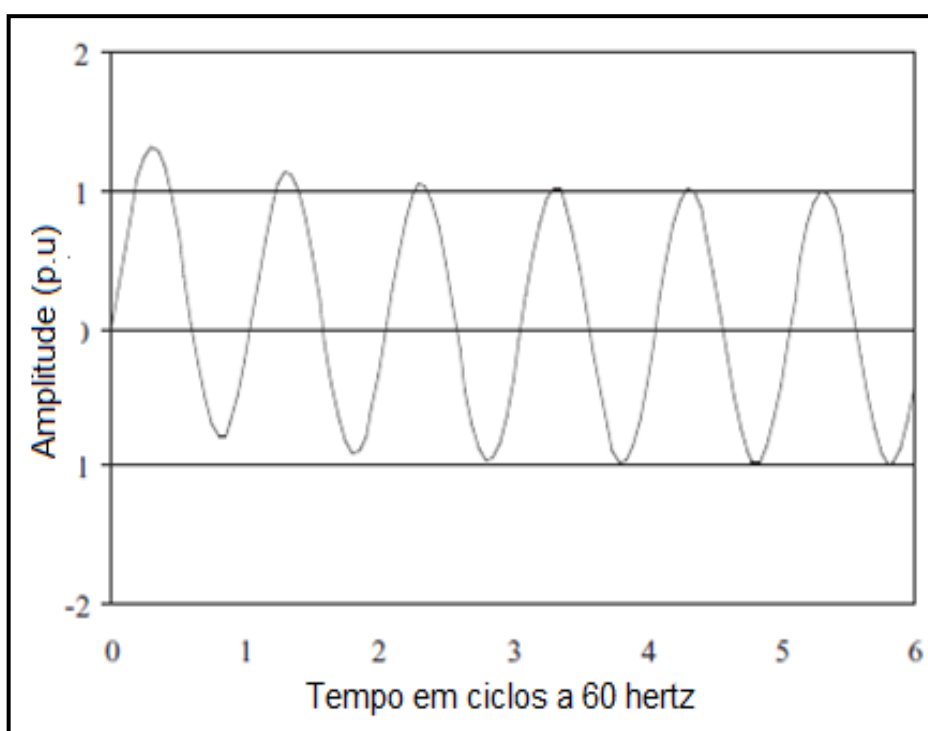
O componente contínuo tem valor decrescente e é formado em virtude da propriedade característica do fluxo magnético que não pode variar bruscamente.

A importância da informação da assimetria se deve às forças eletromagnéticas exercidas nos equipamentos que transportam a corrente elétrica e aos efeitos térmicos que estes equipamentos estarão sujeitos (Dos Santos, 2009).

A assimetria pode ser identificada no instante do curto-circuito e seu valor máximo de corrente assimétrica ocorrerá caso o sinal associado à tensão esteja passando por zero quando da ocorrência do curto circuito. Neste caso, a componente contínua é responsável por este valor de pico, definido no instante $t = 0$ (MAMEDE FILHO, 2012).

A figura 4 está mostrando uma forma de onda da corrente assimétrica tendendo à simetria ao longo do tempo.

Figura 4: Corrente assimétrica



Fonte: IEEE Std 551™-2006

Para determinação dos valores das correntes de curto circuito, existem normas específicas. As duas mais utilizadas são: ANSI (*American National Standards Institute*), e IEC (*International Electrotechnical Commission*) e o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). As equações referentes as modelagens e aos cálculos das correntes de curto circuito baseados nestas normas serão detalhados no capítulo 5.

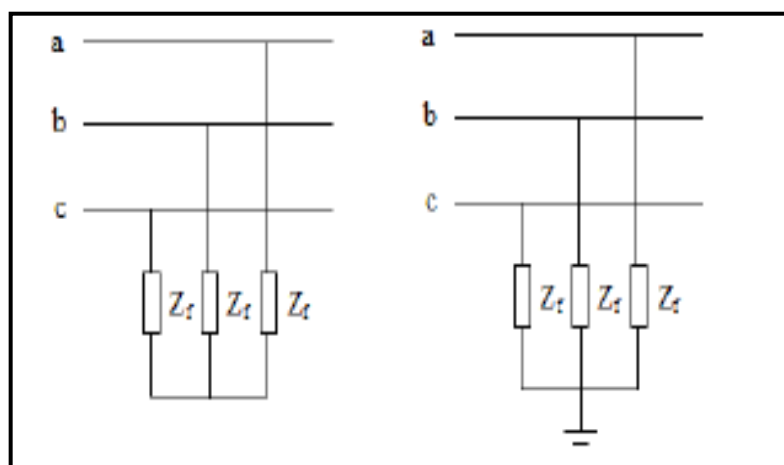
2.3 Tipos de curto circuito

Os curtos circuitos podem ser divididos em dois tipos, equilibrados e desequilibrados. Um curto circuito é dito equilibrado quando as fases apresentam um equilíbrio, ou seja, as grandezas elétricas durante um curto circuito são iguais nas três fases. Isso significa que o sistema pode ser representado como monofásico. Eles ocorrem apenas em curto circuitos trifásicos.

O curto trifásico pode ocorrer de duas formas como mostra a figura 5: quando há o contato entre as três fases ou as três fases e a terra. Ele se caracteriza pelo cancelamento das tensões no ponto de falha e os condutores conduzem o mesmo valor de corrente, isso acontece porque a impedância será a mesma nas fases. Por isso, é chamado de curto-circuito equilibrado e seu cálculo pode ser obtido por fase levando em consideração o circuito equivalente de sequência positiva (MAMEDE FILHO, 2012).

O curto-circuito trifásico (equilibrado) é considerado o mais severo dentre os tipos, mas, também, é o mais raro. Apesar disso, é o mais analisado por ser considerado o mais agressivo (SATO, FREITAS, 2015).

Figura 5: Curto-circuito trifásico

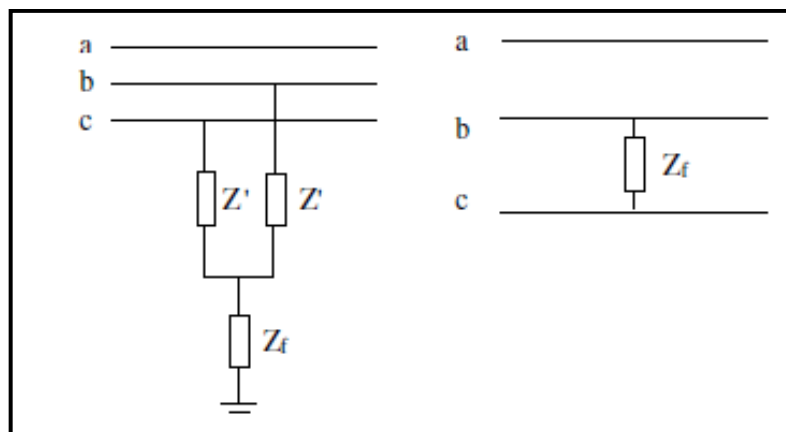


Fonte: Dos Santos (2009)

Já o curto circuito desequilibrado se caracteriza pelos valores das grandezas elétricas como impedância, tensão e corrente serem diferentes nas três fases e, por isso cada circuito deve ser representado de forma individual. Este tipo de falha ocorre em curto circuitos monofásicos e bifásicos.

A figura 6 apresenta um curto-circuito bifásico. Este defeito pode se originar por diversos fatores e de maneiras diferentes. Através do contato entre duas fases ou a conexão direta de dois condutores com a terra. Neste caso, o circuito é percorrido por correntes assimétricas (SATO, FREITAS, 2015).

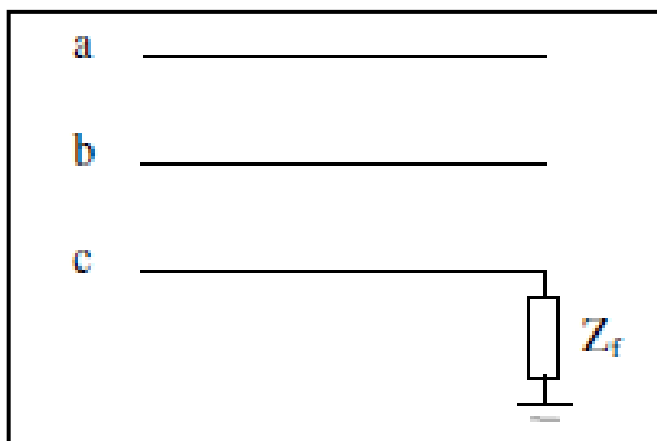
Figura 6: Curto-circuito bifásico



Fonte: Dos Santos (2009)

A figura 7 ilustra o curto-circuito monofásico, sendo este, normalmente, o de ocorrência mais comum. Ocorre quando há um contato entre um condutor fase e a terra. Essa falha pode gerar uma corrente maior que a falta trifásica quando a reatância de sequência zero no local de falha for menor que a reatância de sequência positiva (BREAKERS, 2016), (MAMEDE FILHO, 2012), (SATO, FREITAS, 2015).

Figura 7: Curto-circuito monofásico



Fonte: Dos Santos (2009)

3 GERADORES SÍNCRONOS

Os Geradores síncronos, também conhecidos como alternadores, são máquinas síncronas utilizadas para converter potência mecânica em potência elétrica CA. Estes são os equipamentos mais utilizados para a geração de energia elétrica (CHAPMAN, 2013).

Essas máquinas demandam, para funcionamento, que um campo magnético seja produzido no rotor. Este pode ser obtido através de ímãs permanentes ou de um eletroímã, quando uma tensão CC é aplicada ao enrolamento desse rotor e, com isso, gera-se um campo magnético estático no rotor. Quando o rotor é acionado por uma máquina primária, o campo magnético passará a girar e atravessará o conjunto de enrolamentos do estator fazendo surgir uma diferença de potencial nos terminais do estator.

O estator é a parte fixa da máquina. Os estatores das máquinas CA normais consistem em um conjunto de bobinas em cada fase, distribuídas em ranhuras ao redor da superfície interna da estrutura do estator. Seus enrolamentos são conhecidos como enrolamentos de armadura, pois, neles são induzidos a tensão principal da máquina (RODRIGUES, 2013).

Já o rotor é a parte móvel da máquina. Ele é construído com lâminas de material ferromagnético para mitigar as perdas por correntes parasitas. Seus enrolamentos, são conhecidos como enrolamentos de campo e nele é produzido o fluxo principal da máquina. Os polos do rotor podem ser salientes quando estes sobressaem radialmente ao rotor ou não salientes (lisos), quando são encaixados e nivelados ao rotor.

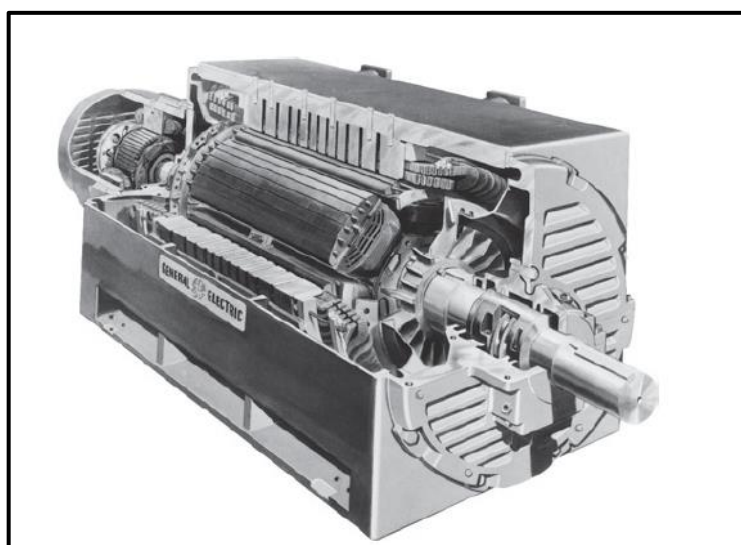
Quando o rotor é construído como eletroímãs, há necessidade de aplicar uma alimentação de corrente CC no circuito de campo da máquina. Existem duas formas de se aplicar esta alimentação. A primeira é através de uma fonte externa CC, utilizando anéis coletores e escovas. A outra é através de aplicação de corrente CC, através de excitatriz, que é um pequeno gerador CA com um circuito retificador montado no próprio eixo do rotor, (CHAPMAN, 2013).

Geralmente, em geradores de grande porte, a alimentação do eletroímã é feita através de excitatrizes. Para eliminar a necessidade de utilização de qualquer fonte externa é utilizado uma excitatriz piloto, na qual utiliza-se ímãs permanentes no circuito de campo, sendo este montado no rotor e o circuito de armadura é montado

no estator. Os ímãs permanentes da excitatriz piloto produzem a corrente de campo da excitatriz, a qual por sua vez produz a corrente de campo da máquina principal, esta corrente passará pelo processo de retificação e controle que é realizado através de um circuito eletrônico montado na própria excitatriz (CHAPMAN, 2013).

A figura 8 mostra um diagrama em corte de uma máquina síncrona de grande porte em que seu rotor foi construído com polos salientes e seu sistema de alimentação CC baseia-se em uma excitatriz montada na própria máquina.

Figura 8: Diagrama em corte de um gerador síncrono



Fonte: Chapman, 2013

Em máquinas síncronas e em condições de regime permanente, o rotor, juntamente com o campo magnético criado pela corrente CC, gira na mesma velocidade ou em sincronismo com o campo magnético girante produzido pelas correntes de armadura. A relação entre a velocidade de rotação da máquina com a frequência elétrica produzida pode ser expressa pela equação 8, (Fitzgerald, 2014).

$$f_{se} = \frac{n_m P}{120} \quad (8)$$

Em que:

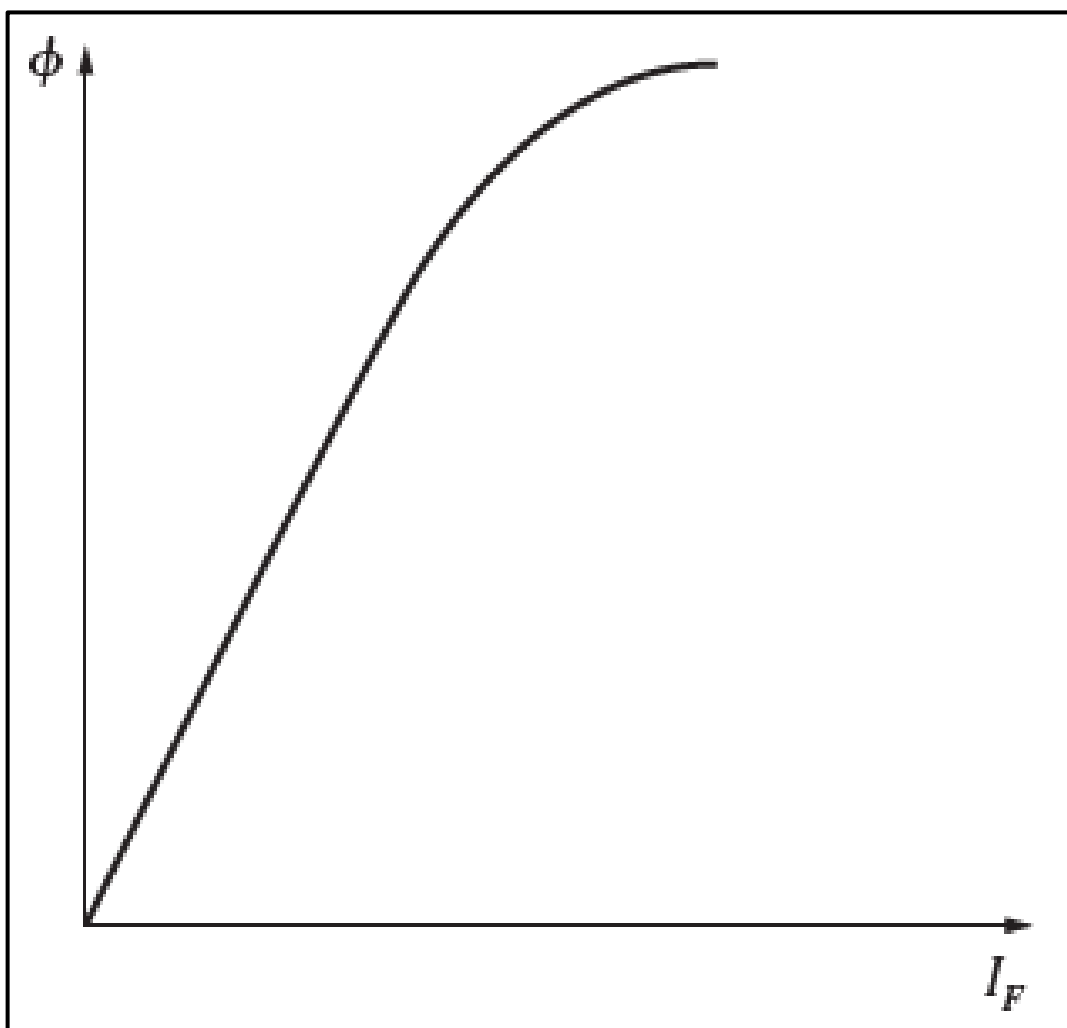
P – Número de polos da máquina;

f_{se} – Frequência em [Hz];

n_m – Velocidade em [rpm];

A tensão induzida nos enrolamentos do estator depende do fluxo magnético produzido no rotor da máquina, da velocidade de rotação e dos aspectos construtivos. Esta tensão será a tensão nos terminais caso não haja carga conectada no circuito. O fluxo magnético por sua vez, depende da corrente de campo que flui no circuito de campo. Esta relação está sendo mostrada no gráfico da figura 9.

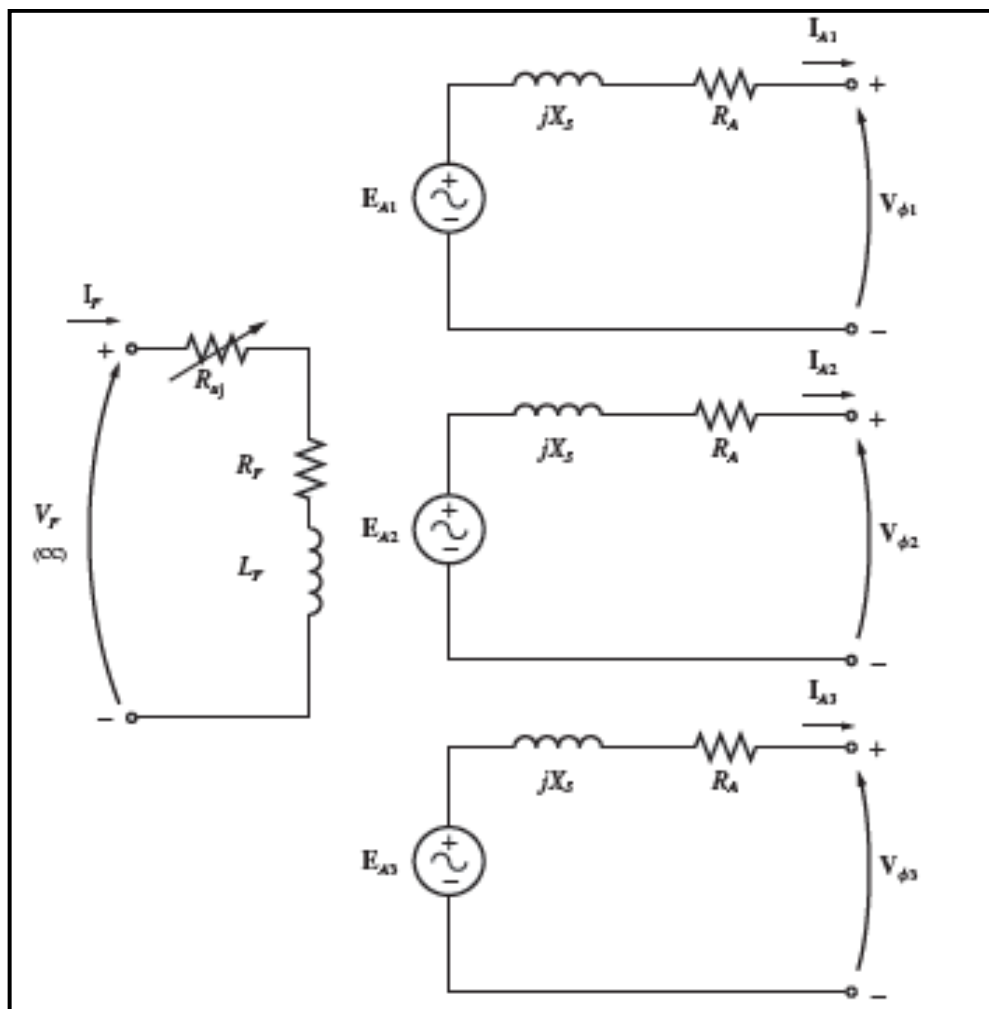
Figura 9: Gráfico fluxo magnético x corrente de campo



Fonte: Chapman, 2013

A figura 10 mostra o circuito equivalente de um gerador síncrono, no qual, são exibidas as modelagens do rotor e estator. Através dessas modelagens é possível compreender o princípio de funcionamento da máquina, deduzir equações relacionadas à tensão gerada nos terminais e entender o comportamento do gerador caso haja uma falha no circuito.

Figura 10: Circuito equivalente completo de um gerador síncrono



Fonte: Chapman, 2013

Em que:

V_f – Fonte de tensão CC;

I_f – Corrente de campo;

R_{aj} – Resistor variável;

R_f – Resistência da bobina do rotor;

L_f – Indutância da bobina do rotor;

$E_{A1,2,3}$ – Tensão interna gerada em cada fase;

X_s – Reatância síncrona;

R_a – Resistência de armadura;

$V_{\phi 1,2,3}$ – Tensão nos terminais do gerador;

Na figura 10 pode-se observar que o rotor está modelado com uma fonte de tensão CC, alimentando o circuito de campo que está representado por uma resistência e indutância da bobina em série com um resistor variável, utilizado para controlar a corrente de campo. Já o estator, está representado por uma fonte de tensão em série com uma reatância e uma resistência de armadura em cada fase. A reatância no modelo representa uma reatância síncrona que é a combinação da reatância de armadura com a reação de armadura.

Quando o rotor excitado for animado com movimento, haverá uma variação senoidal de fluxo num ponto qualquer do estator. Em outras palavras, o rotor quando excitado e girado, produz o campo girante que induz uma tensão E_A , nos enrolamentos do estator essa voltagem pode ser expressa pela equação 9 (CHAPMAN, 2013).

$$E_A = \sqrt{2\pi N_C \Phi f} \quad (9)$$

Em que:

N_C – Número de condutores por espira;

Φ – Fluxo magnético;

f – Frequência;

E_A – Tensão interna gerada;

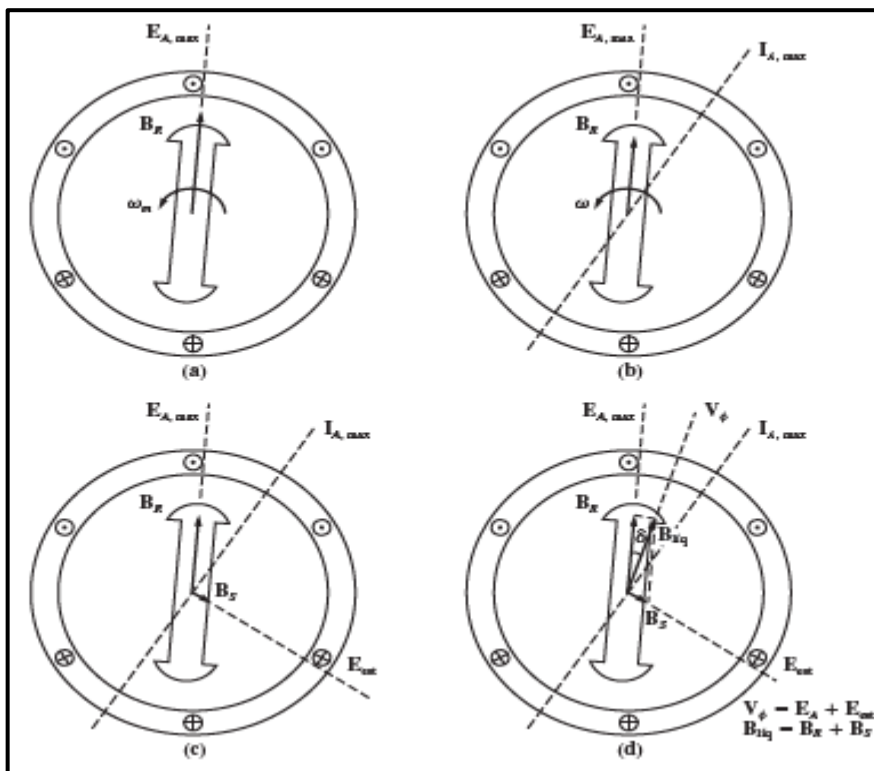
Esta tensão E_A , só será a tensão nos terminais caso não haja uma carga ligada em seus terminais, pois, neste caso não ocorrerá circulação de corrente nos enrolamentos do estator.

Quando uma carga é conectada nos terminais de um gerador, a tensão que aparece neles está sujeita a variações devido a fatores como, a reação de armadura, a resistência das bobinas da armadura, autoindutância das bobinas da armadura. Dos fatores citados acima, a reação de armadura normalmente é o efeito mais significativo para a variação da tensão em um gerador.

A figura 11 apresenta um modelo de reação de armadura. Inicialmente não há carga conectada ao circuito. Em 11.a, tem-se a situação quando o rotor excitado está girando e o campo magnético girante induz uma tensão E_A , nos terminais do estator. Em 11.b, a tensão resultante produz um fluxo de corrente atrasado quando é ligada a uma carga de exemplo reativa atrasada é adotada. Em 11.c, esta corrente fará surgir

um campo magnético no estator e este produzirá uma tensão de armadura E_{est} . Em 11.d, a tensão resultante nos terminais do estator, será a tensão E_A somada a tensão de armadura E_{est} .

Figura 11: Reação de armadura



Chapman Fonte, 2013

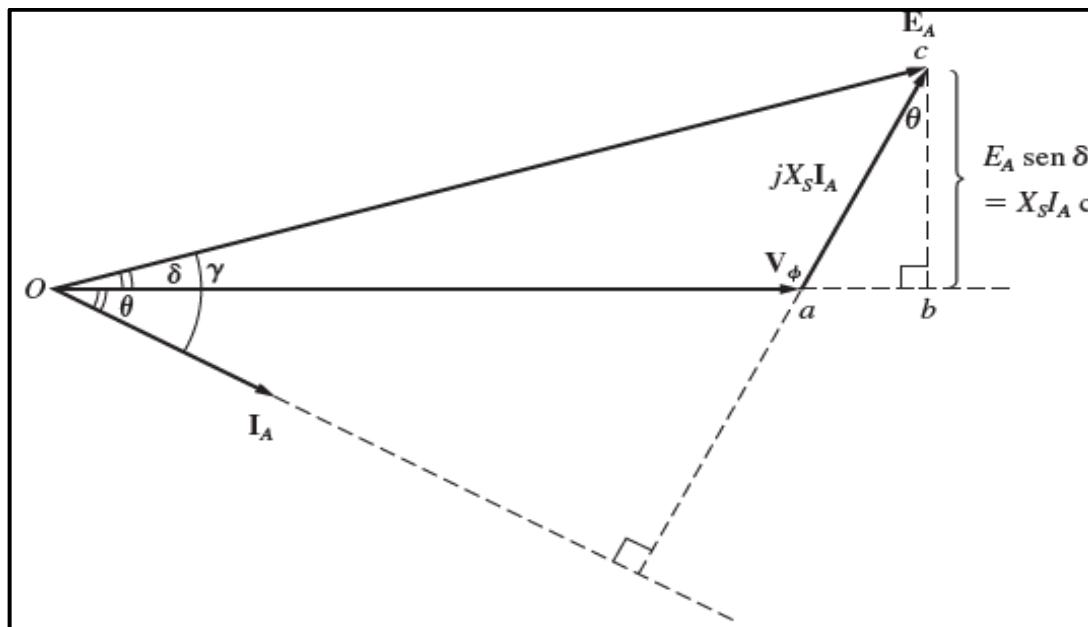
Em que:

- V_{ϕ} – Tensão nos terminais do gerador;
- E_A – Tensão interna gerada;
- E_{est} – Tensão de armadura;
- $B_{líq}$ – Campo magnético líquido;
- B_R – Campo magnético do rotor;
- B_S – Campo magnético pela corrente do estator;
- I_a – Corrente de armadura;

Além da reação de armadura, a resistência das bobinas do estator e a autoindutância das bobinas da armadura também influenciam no valor da tensão que aparecerá nos terminais do gerador.

A figura 12 apresenta o diagrama fasorial do gerador síncrono desprezando a resistência de armadura.

Figura 12: Diagrama fasorial simplificado com a resistência de armadura ignorada.



Fonte: Chapman, 2013

A tensão nos terminais do gerador, será a tensão E_A somada das quedas de tensão na reatância síncrona e na resistência de armadura e pode ser expressa por:

$$V_{\phi} = E_A - jX_s I_A - R_A I_A \quad (10)$$

Nesta equação:

V_{ϕ} – Tensão nos terminais do gerador;

E_A – Tensão interna gerada;

$jX_s I_A$ – Queda de tensão devido a reação de armadura e a autoindutância da bobina de armadura;

$R_A I_A$ – Queda de tensão devido à resistência de armadura;

Em geradores síncronos, a potência de entrada está relacionada à máquina primária que deverá manter uma velocidade de rotação estável, pois isto está diretamente relacionado às grandezas elétricas nos terminais do gerador. A potência de entrada é dada por:

$$P_{\text{entrada}} = \tau_{ap} \omega_m \quad (11)$$

Em que:

τ – Torque induzido;

ω_m – Velocidade angular;

A diferença da potência de entrada com a potência convertida em energia elétrica são as perdas mecânicas, do núcleo e suplementares da máquina. A potência mecânica convertida em elétrica dependerá da tensão interna gerada da corrente de armadura e do ângulo entre elas, é dada por:

$$P_{\text{conv}} = \tau_{\text{ind}} \omega_m = 3E_A I_A \cos \gamma \quad (12)$$

Em que:

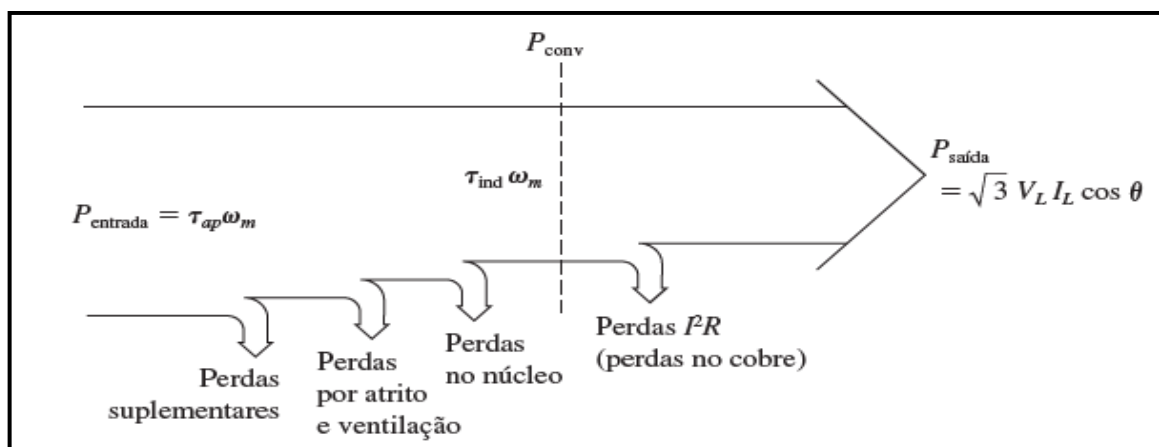
γ – Ângulo entre E_A e I_A ;

E_A – Tensão interna gerada;

I_A – Corrente de armadura;

A figura 13 apresenta o fluxo de potência do gerador, no qual são demonstradas as relações entre a potência mecânica de entrada e a potência elétrica de saída no gerador.

Figura 13: Fluxo de potência de um gerador síncrono



Fonte: Chapman, 2013

As potências elétricas de saída do gerador podem ser expressas em grandezas de linha e de fase conforme as equações 13 e 14. Já as equações 15 e 16 expressam em grandezas de linha e fase a potência de saída reativa do gerador.

$$P_{\text{Saída}} = \sqrt{3}V_L I_L \cos\theta \quad (13)$$

$$P_{\text{Saída}} = 3V_\phi I_A \cos\theta \quad (14)$$

$$Q_{\text{Saída}} = \sqrt{3}V_L I_L \sin\theta \quad (15)$$

$$Q_{\text{Saída}} = 3V_\phi I_A \sin\theta \quad (16)$$

Em que:

- V_L – Tensão de linha;
- I_L – Corrente de linha;
- θ – Ângulo entre tensão e corrente;
- V_ϕ – Tensão nos terminais;
- I_A – Corrente de armadura;

Para se calcular um valor aproximado da potência, geralmente, a resistência de armadura é ignorada por ser muito menor que a reatância síncrona, conforme a figura 12, observamos que, $E_A \sin\delta = X_s I_A \cos\theta$. Desta forma:

Em que:

- E_A – Tensão interna gerada;
- I_A – Corrente de armadura;
- δ – Ângulo entre a tensão nos terminais e a tensão interna do gerador;
- X_s – Reatância síncrona;
- θ – Ângulo entre tensão e corrente;

$$I_a \cos\theta = \frac{E_A \sin\delta}{X_s} \quad (17)$$

Substituindo na equação 13 temos.

$$P_{conv} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \text{sen}\delta \quad (18)$$

δ é o ângulo entre a tensão nos terminais e a tensão interna do gerador, portanto se este ângulo for de 90° teremos a potência máxima convertida, pois o seno 90° é $= 1$. Então, podemos representar a potência máxima pela equação:

$$P_{max} = \frac{3V_{\phi}E_A}{X_S} \quad (19)$$

Assim como na potência convertida, o torque induzido de um gerador síncrono depende do ângulo δ , conhecido como ângulo de torque. O valor máximo da potência e do conjugado será atingido quando este ângulo for de 90° . O torque induzido em grandeza elétrica pode ser definido pela equação:

$$\tau_{ind} = \frac{3V_{\phi}E_A}{\omega_m X_S} \text{sen}\delta \quad (20)$$

Em que:

τ_{ind} – Torque induzido;

ω_m – velocidade angular;

3.1 Curto circuito nos terminais do gerador

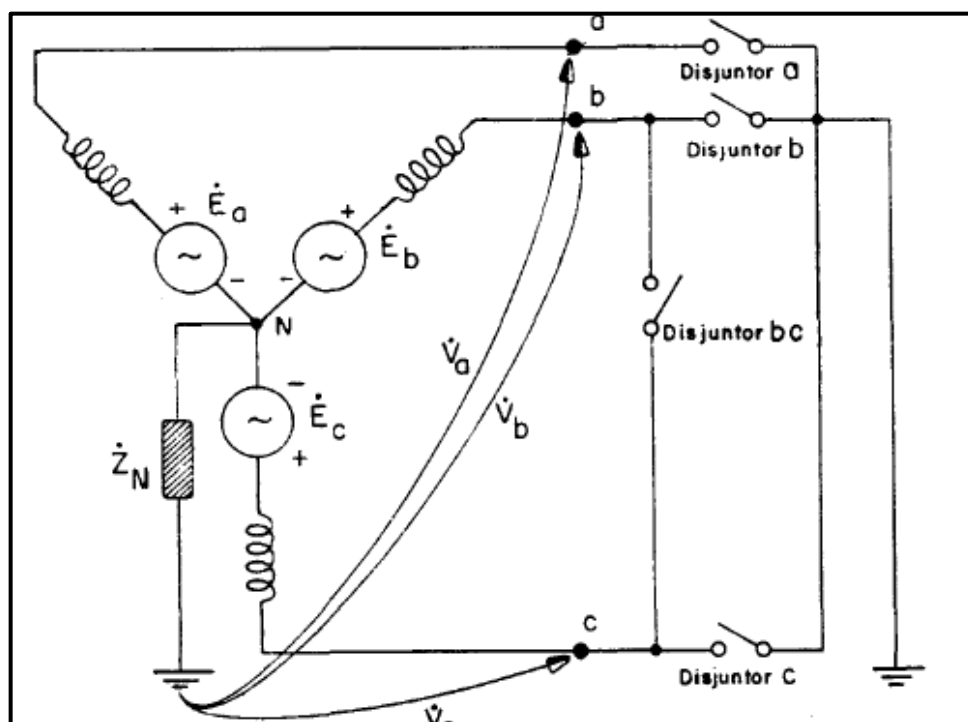
O gerador síncrono é o elemento mais importante de todo sistema de energia elétrica. Ele é responsável por suprir, as energias solicitadas pelas cargas, mantendo os níveis de tensão em uma faixa estreita, garantindo desta forma a continuidade e estabilidade do sistema (Kindermann, 1997).

Quando da ocorrência de um curto circuito, a impedância vista pelo gerador cai drasticamente. Em consequência, o gerador injeta uma corrente de curto circuito elevada no sistema. Esta corrente apresenta uma componente oscilatória que depende do instante de ocorrência do curto. Portanto, o gerador síncrono é o elemento ativo do suprimento das correntes de curto circuito.

A figura 14 mostra um circuito equivalente de um gerador síncrono. As três fases estão referenciadas à terra e, com isso, existe a possibilidade do fechamento

de um curto circuito monofásico, bifásico ou trifásico de acordo com o fechamento dos disjuntores a, b e c, indicados na figura 14. No circuito, cada enrolamento está representado por uma fonte de tensão em série com uma impedância.

Figura 14: Representação de um gerador síncrono



Fonte: Kindermann, 1997

Quando ocorre um curto-circuito em um sistema alimentado por geradores, a corrente de curto-circuito apresenta um valor pico inicial. Esse período é conhecido como subtransitório, neste instante, a intensidade da corrente na armadura aumenta devido à baixa impedância e são induzidas correntes nos amortecedores de forma a equilibrar os fluxos concatenados ali. Como há correntes elevadas nos amortecedores, eles também funcionam como uma excitação no rotor. Correntes também são induzidas no enrolamento de campo com o mesmo objetivo. Toda essa variação se reflete no enrolamento de armadura através da elevação da corrente. Neste período temos o maior valor da corrente de curto circuito.

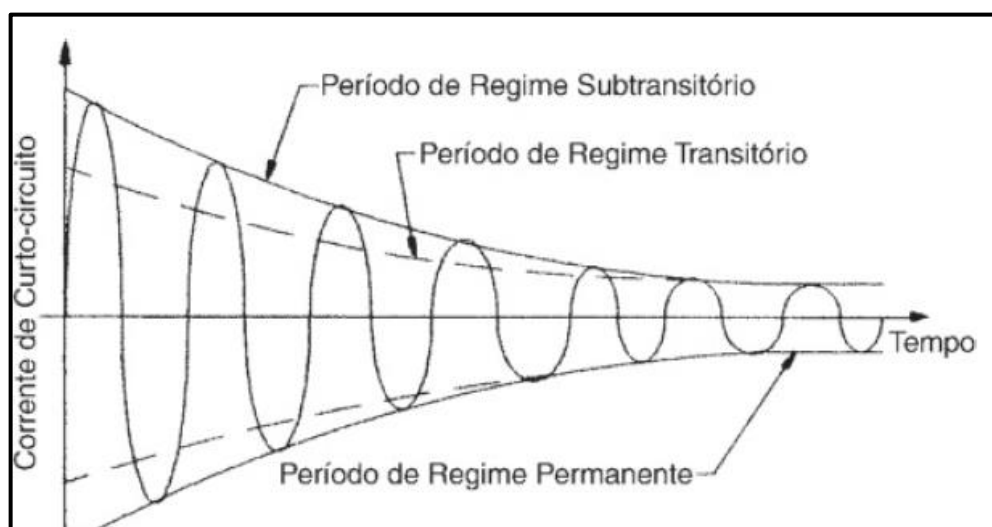
Com o passar do tempo surge no sistema o período transitório, neste instante, já ocorreu uma dissipação das correntes nos amortecedores. Este período é caracterizado por um amortecimento suave e com maior duração que no período subtransitório.

O principal responsável pela manutenção deste período é o enrolamento de campo do rotor. Ele é energizado por uma fonte de corrente contínua, da qual é criado um campo magnético. Este campo magnético gira em velocidade síncrona acompanhando o rotor acionado por uma máquina primária. Durante o curto circuito, a repentina mudança na topologia do sistema provoca oscilações, isso faz com que seja induzida uma corrente alternada no enrolamento de campo.

Com a diminuição das oscilações a corrente continua decai. O regime permanente é alcançado quando não há mais variação de fluxo nos enrolamentos amortecedores e de campo. Neste instante, o comportamento do gerador em curto circuito será o mesmo que em carga.

A forma de onda da corrente de curto circuito nos períodos, subtransitário, transitório e permanente, está sendo mostrada na figura 15.

Figura 15: Corrente de curto-circuito nos terminais do gerador



Fonte: Mamede, 2011

Conforme a figura 15, observa-se que a corrente não se mantém no estágio inicial. O amortecimento da corrente de curto-circuito do gerador no tempo é conhecido como curva de decremento do gerador. O amortecimento da componente AC da corrente de curto-circuito é obtido através da equação:

$$i_{AC}(t) = (I''_k - I'_k) x e^{\frac{-t}{t''_d}} + (I'_k - I_k) x e^{\frac{-t}{t'_d}} + I_k \quad (21)$$

Em que:

I''_k = Corrente de curto-circuito subtransitória

I'_k = Corrente de curto-circuito transitória

I_k = Corrente de curto-circuito permanente

t''_d = Constante de tempo subtransitória

t'_d = Constante de tempo transitória

As correntes são calculadas a partir das seguintes equações:

$$I''_k = \frac{E''_Y}{X''_d + Z_N} \quad (22)$$

$$I'_k = \frac{E'_Y}{X'_d + Z_N} \quad (23)$$

$$I_k = \frac{E_y}{X_d + Z_N} \quad (24)$$

$$E''_y = U_{Y+JX''_d I} \quad (25)$$

$$E'_y = U_{Y+JX'_d I} \quad (26)$$

$$E_y = U_{Y+X_d I} \quad (27)$$

Em que:

E''_Y = F.E.M atrás da reatância subtransitória saturada de eixo direto

E'_Y = F.E.M atrás da reatância transitória saturada de eixo direto

E_y = F.E.M atrás da reatância síncrona saturada

X''_d = Reatância subtransitória saturada de eixo direto

X'_d = Reatância transitória saturada de eixo direto

X_d = Reatância síncrona saturada

Z_N = Impedância externa ao gerador (até o ponto de falta)

U_Y = Tensão nos terminais da máquina

I = Corrente de carga do gerador

As constantes de tempo podem ser calculadas através das equações:

$$t''_d = \frac{X''_d + X_N}{X'_d + X_N} t''_{do} \quad (28)$$

$$t'_d = \frac{X'_d + X_N}{X_d + X_N} t'_{do} \quad (29)$$

$$t_g = \frac{X''_d + X_N}{\omega(R_a + R_N)} \quad (30)$$

Em que:

t''_{do} = Constante de tempo subtransitória a vazio

t'_{do} = Constante de tempo transitória a vazio

t_g = Constante de tempo da componente de corrente contínua (da armadura)

t''_d = Constante de tempo subtransitória

t'_d = Constante de tempo transitória

R_a = Resistência da armadura

A componente da corrente contínua é calculada a partir da equação 31. Ela tem valor decrescente e é formado em virtude da propriedade característica do fluxo magnético que não pode variar bruscamente.

$$i_{DC}(t) = \sqrt{2} \times I''_K \times e^{\frac{-t}{t_g}} \quad (31)$$

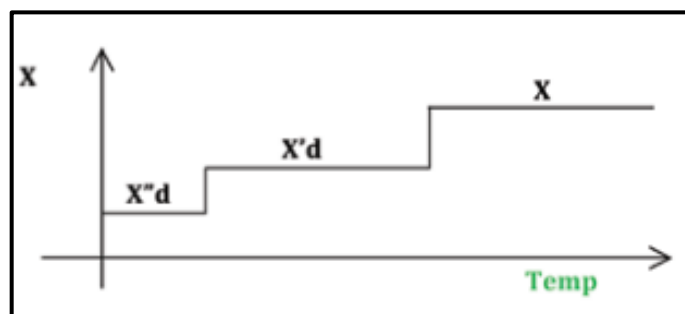
A partir da definição das correntes relacionadas às componentes contínua e alternada da corrente de curto circuito, então, podemos determinar a corrente eficaz total assimétrica através da equação:

$$i_{total}(RMS) = \sqrt{i_{AC}(t)^2 + i_{DC}(t)^2} \quad (32)$$

A variação da frequência no gerador irá depender dos sistemas que eles estão conectados. Em grandes sistemas de energia elétrica, praticamente não haverá variação na frequência, neste caso a frequência do sistema prevalecerá. Já em pequenos geradores em caso de curto circuito haverá variação de frequência. A tendência é que ela se eleve, pois, os geradores deixam de fornecer potência ativa e pelo princípio de conservação de energia, transformam esta energia em energia cinética (Cláudio Modergan, 2016).

As reatâncias limitadoras de corrente variam ao longo do tempo, essa variação pode ser observada na figura x, no qual nos primeiros ciclos do curto circuito, a reatância subtransitória X''_d , é muito baixa e aumenta com o tempo até atingir o valor de reatância de regime permanente X . neste momento a corrente de curto circuito já está estável. A resistência do gerador, por representar um valor muito inferior a reatância, não é considerada na modelagem do curto circuito

Figura 16: Variação da impedância da máquina no tempo, durante

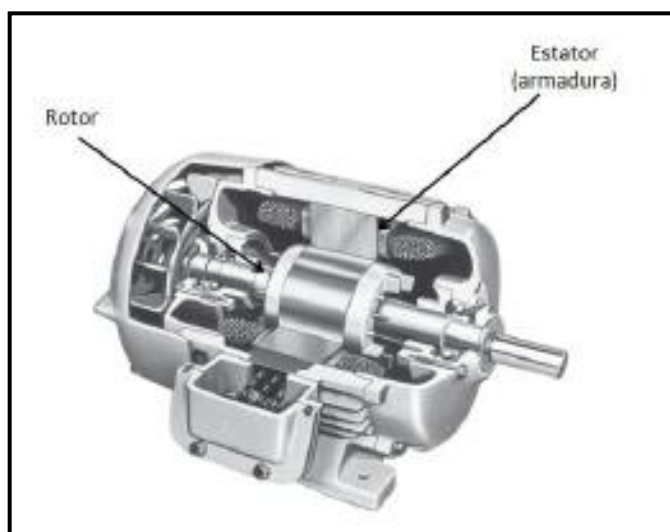


Fonte: Cláudio Modergan, 2016

4 MOTORES ASSÍNCRONOS

Os motores de assíncronos (indução) possuem dois tipos de rotores, rotor gaiola de esquilo ou rotor bobinado. Este último, pode ser encontrado em poucas instalações devido ao seu alto custo, em relação aos motores indução de rotor gaiola de esquilo e, além disso, devido à utilização de escovas para alimentação do rotor, possui demanda mais rotineira de procedimentos de manutenção. Na máquina com rotor bobinado, as escovas no enrolamento do rotor possibilitam a ligação em série de uma resistência variável, externa ao rotor. A resistência ajustável permite elevar a resistência do circuito do rotor, proporcionando uma condição de partida mais favorável e, também, permite controlar a corrente no rotor e a velocidade da máquina. Neste trabalho serão referenciados apenas motores de indução com rotor gaiola de esquilo, ilustrado na figura 17, pois, nas indústrias, são os mais utilizados (UMANS, 2014).

Figura 17: Motor de indução



Fonte: Chapman, 2013

Os motores indução trifásico tem a armadura (estator) formada por três bobinas fisicamente afastadas em $2\pi/3$ radianos. O rotor do tipo gaiola de esquilo possui uma série de barras condutoras isoladas entre si, postas dentro de ranhuras no rotor e curto-circuitadas nas extremidades por anéis de curto-circuito (UMANS, 2014).

Uma tensão alternada é utilizada para alimentar o estator do motor, onde começa a circular corrente alternada nos condutores da armadura, produzindo assim

um campo magnético girante. O rotor não está ligado a nenhuma fonte de alimentação e, nele, é induzida uma tensão gerada pelas correntes nos enrolamentos do estator. Segundo a lei de Faraday-Lenz, todo fluxo magnético variável gera uma tensão induzida que produz uma corrente (induzida) que tende a reagir com as variações do campo que a gerou. As correntes no rotor, por sua vez, interagem com o campo da armadura para gerar um torque eletromagnético que age em seus condutores. Como o rotor é a peça móvel desta máquina ele se movimenta na direção imposta por esta força contrária eletromotriz (BIM, 2012; CHAPMAN, 2013; GUEDES, 1994).

A velocidade do rotor é sempre menor que a do campo magnético girante gerado pelo estator. Caso ambas fossem iguais, não ocorreria o movimento relativo nos mesmos e não seria induzido uma tensão no rotor. Tal diferença entre velocidades está expressada na equação 33, que é conhecida como escorregamento e que pode ser expressado em uma base por unidade ou em porcentagem, conforme essa equação 33. Quanto menor essa diferença, mais próximo serão a velocidade do rotor e a do campo magnético girante (UMANS, 2014).

$$s = n_{sinc} - n_m \quad (33)$$

Em que:

s – Escorregamento;

n_{sinc} – Velocidade dos campos magnéticos;

n_m – Velocidade mecânica do eixo do motor;

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} \quad (34)$$

A velocidade mecânica do eixo do rotor, em r.p.m, pode ser expressada pela equação 35, em termos do escorregamento s e a velocidade síncrona n_{sinc} (CHAPMAN, 2013).

$$n_m = (1 - s) n_{sinc} \quad (35)$$

As correntes que circulam no estator produzem um campo magnético (B_s). A velocidade de rotação do campo B_s pode ser determinada pela equação 36, que pode

ser expressada em termos da frequência elétrica em hertz aplicada do sistema de alimentação. Quanto maior a frequência maior sua velocidade de rotação por minuto (r.p.m) (CHAPMAN, 2013).

$$n_{sinc} = \frac{120f_{se}}{P} \quad (36)$$

Em que:

n_{sinc} – Velocidade dos campos magnéticos;

f_{se} – Frequência elétrica do sistema;

P – Número de polos do motor;

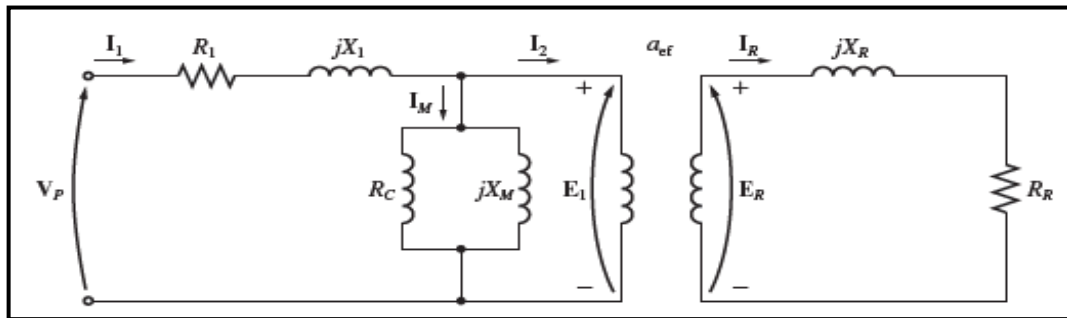
A frequência elétrica do rotor f_{re} pode ser obtida pela equação 37, que depende do escorregamento (s) e da frequência elétrica (f_{se}). Analisando a equação 37, caso o escorregamento seja igual à unidade, a frequência elétrica do rotor é igual a frequência elétrica do sistema. Mas, se a velocidade mecânica do eixo do rotor (n_m) for igual à velocidade dos campos magnéticos (n_{sinc}), tanto o escorregamento expressado na equação 33 quanto a frequência elétrica do rotor serão iguais a zero. Para qualquer velocidade intermediária a frequência elétrica do rotor é diretamente proporcional a n_{sinc} e a n_m (CHAPMAN, 2013).

$$f_{re} = sf_{se} \quad (37)$$

A figura 18 apresenta o circuito equivalente de um motor de indução que pode auxiliar na determinação de equações utilizadas para análise dos motores. Analisando a figura 18, na parte à esquerda tem-se o circuito de armadura e, à direita, tem-se o circuito do rotor, “divididos” pelo entreferro a_{ef} . O estator está representado pela resistência R_1 , reatância jX_1 do estator, resistência R_c e reatância jX_m do núcleo da armadura. Quando aplicada uma tensão de fase V_ϕ ao circuito de armadura, começa a percorrer uma corrente I_1 , limitada pela impedância de armadura representada por R_1 e jX_1 . Após I_1 circular na resistência e reatância do estator irá dividir em I_M corrente de magnetização, limitada por R_c e jX_M que é a corrente de armadura responsável por gerar o fluxo de entreferro, resultando na tensão induzida E_1 e I_2 corrente de carga. À direita tem-se o circuito do rotor representado pela resistência R_R e reatância jX_R . A

tensão E_1 do circuito de armadura corresponde à tensão induzida no rotor (E_R). A tensão E_R é responsável por gerar a corrente no rotor (I_R), limitada por R_R e jX_R . A corrente I_R interage com o campo do estator gerado por I_M que cria um torque eletromagnético que age no rotor. Como o rotor é a peça móvel do motor de indução, ele se movimenta na direção imposta por esta força contrária eletromotriz (CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014).

Figura 18: Circuito equivalente de um motor de indução



Fonte: Chapman, 2013

Pela figura 18, a corrente de magnetização (I_M) é responsável por gerar o fluxo magnético B_s . Tal campo magnético girante percorre no rotor que induz uma tensão em suas barras, que pode ser calculada em cada barra pela equação 38 (CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014).

$$e_{ind} = (V \times B)L \quad (38)$$

Em que:

V – Velocidade da barra em relação ao campo magnético;

B – Vetor densidade de fluxo magnético;

L – Comprimento do condutor dentro do campo magnético;

A diferença de velocidade do campo magnético girante B_s produzido no estator e o campo B_R do rotor pode ser visualizado na figura 19. O vetor campo magnético B_{liq} , ilustrado na mesma imagem é resultado da soma dos campos B_R e B_s . Pela equação 39 pode-se perceber que o conjugado induzido é proporcional a soma envolve B_R e B_s (CHAPMAN, 2013).

$$T_{ind} = KB_R B_{liq} \text{sen} \delta \quad (39)$$

Nesta equação:

T_{ind} – Conjugado induzido;

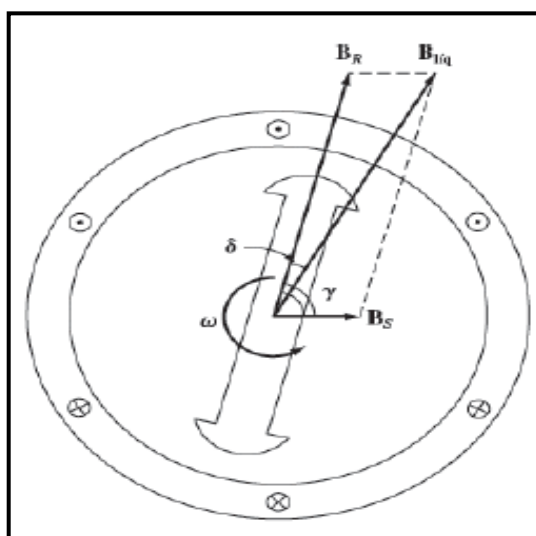
B_R – Campo magnético do rotor;

B_{liq} – Vetor resultante da soma de B_R e B_S ;

δ – Ângulo entre B_R e B_{liq} ;

K – Constante que depende dos aspectos construtivos da máquina;

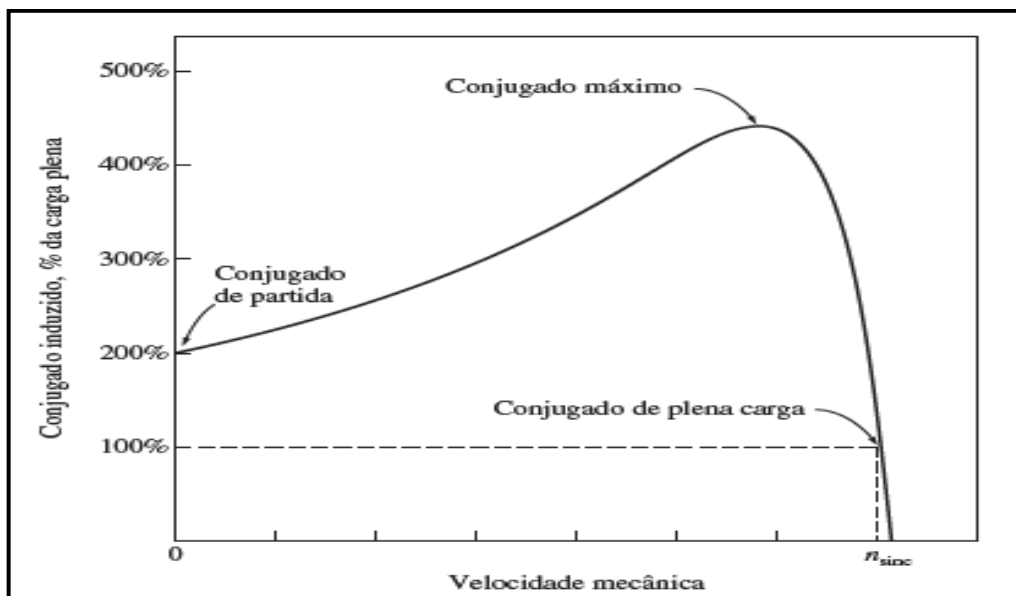
Figura 19: Conjugado motor de indução



Fonte: Chapman, 2013

A figura 20 ilustra a curva característica do conjugado versus velocidade no motor de indução que demonstra importantes informações. Analisando-a, percebe-se que a velocidade mecânica vai de zero, motor parado, até a velocidade síncrona, associada a um conjugado induzido nulo. O conjugado de partida é maior que o conjugado nominal, de maneira que essa máquina conduzirá movimento toda carga que ele puder acionar a plena potência (CHAPMAN, 2013). Após a partida, temos um aumento na corrente, no campo magnético no rotor e no escorregamento, que proporciona um conjugado máximo que é 2 a 3 vezes o conjugado nominal de plena carga do motor. À direita, o conjugado a plena carga condiz a situação normal de operação do motor de indução, em que a velocidade do rotor é bem próxima à velocidade síncrona, ou seja, o escorregamento é bem pequeno (CHAPMAN, 2013).

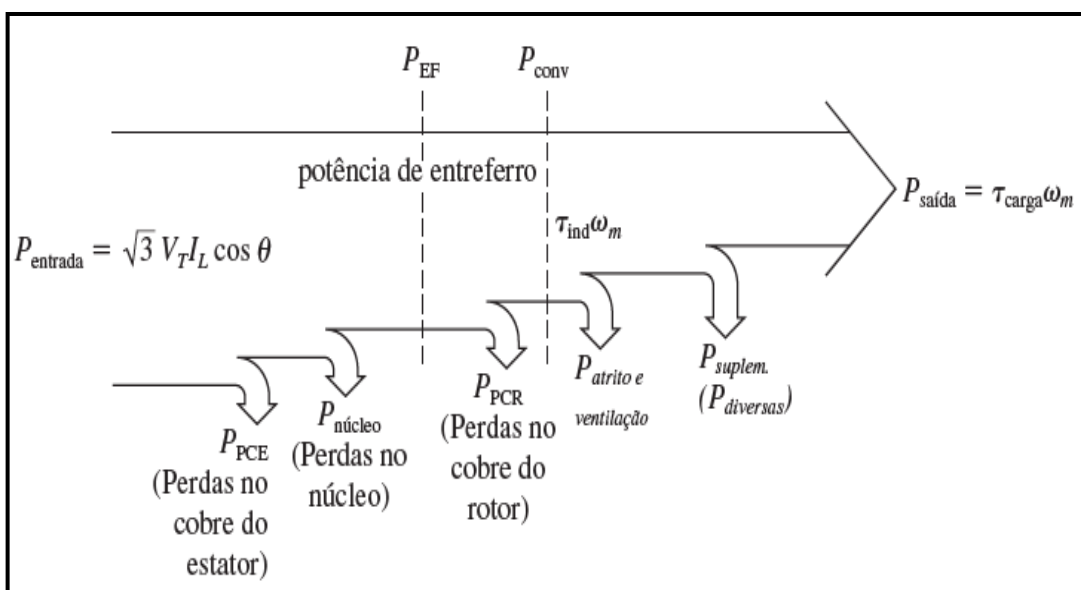
Figura 20: Conjugado induzido versus velocidade mecânica



Fonte: Chapman, 2013

O fluxo de potência ilustrado na figura 21, demonstra as relações entre a potência elétrica de entrada e a potência mecânica de saída no motor. Tal relação representa as perdas presentes no equipamento durante a alimentação ao conjugado de saída. As perdas no motor são divididas por cada elemento da máquina (CHAPMAN, 2013).

Figura 21: Fluxo de potência de um motor de indução.

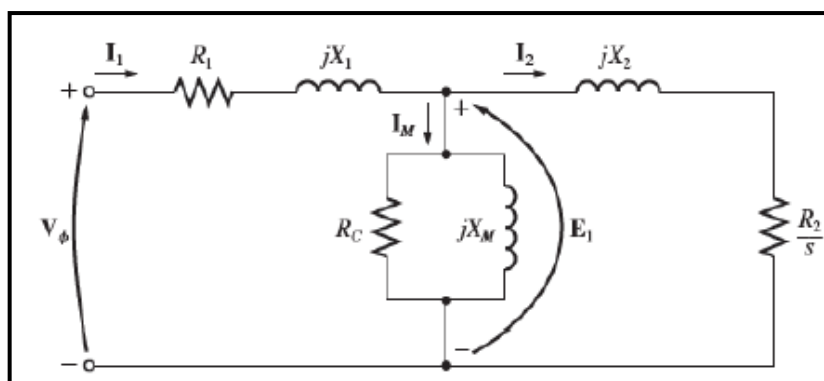


Fonte: Chapman, 2013

A potência de entrada ($P_{Entrada}$) é fornecida na forma de tensões e correntes trifásicas. As primeiras perdas no motor de indução ocorrem no cobre do estator ($P_{PCE} = 3I_1^2R_1$) devido ao efeito Joule nos condutores de armadura. Outra perda de energia acontece no núcleo do entreferro ($P_{núcleo} = 3E_1^2G_C$), pela histerese e correntes parasitas. Após essas perdas mencionadas, tem-se a potência de entreferro da máquina ($P_{EF} = P_{Entrada} - P_{PCE} - P_{núcleo}$) que é transferida ao rotor do equipamento através do entreferro entre o estator e o rotor. No circuito do rotor as primeiras perdas ($P_{PCR} = 3I_R^2R_2$) ocorrem devido ao efeito joule em seus condutores R_2 . A corrente I_R depende da impedância R_R e jX_R que varia com a frequência do rotor. A seguir temos a potência convertido da forma elétrica para a forma mecânica P_{CONV} . Finalmente, após as perdas por ventilação e suplementares temos a potência de saída para o motor ($P_{Saída} = P_{CONV} - P_{AeV} - P_{Suplem}$) (CHAPMAN, 2013).

Em um sistema equilibrado, utiliza-se a análise do motor de indução trifásico apenas por uma fase. A figura 22 representa o circuito equivalente por fase do motor assíncrono (CHAPMAN, 2013; UMANS, 2014).

Figura 22: Circuito equivalente por fase de um motor de indução



Fonte: Chapman, 2013

Quando da ocorrência de um curto-circuito trifásico no circuito de alimentação de um motor de indução, a tensão no ponto de falta tende a cair até zero (ou próximo). O fluxo no rotor não decai até zero no mesmo momento, devido à energia armazenada no campo magnético nas bobinas do rotor (circuito equivalente com características indutivas). Após a retirada da alimentação dos enrolamentos do motor (indutores), estes, enquanto houver energia armazenada em seu campo magnético, se

comportarão como uma fonte de corrente. O indutor (fonte de corrente) fornecerá corrente ao circuito do rotor que juntamente com a velocidade do eixo do rotor, irá produzir um campo magnético, induzindo nas bobinas de armadura uma tensão. Como o estator está conectado ao sistema, e dependendo do nível de corrente liberado pela fonte (o indutor), pode contribuir ou não para o aumento da corrente de falta (MOTA, 2014).

Uma expressão analítica usada para o cálculo dessa contribuição é a equação 40 (MALJKOVIC, 1999; MALJKOVIC, 2001).

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}U_s}{X'_s} [e^{-\frac{t}{T'_s}} \sin(\omega_s t - \alpha) + (1 - \sigma)e^{\frac{t}{T'_r}} \sin \alpha] \quad (40)$$

Em que:

U_s – Tensão de fase (V);

$X'_s = \sigma X_s$, $X'_r = \sigma X_r$ – Reatância transitória do estator e do rotor (Ω);

$T'_s = \frac{X'_s}{\omega R_s}$ – Constantes temporais transitórias do estator (s);

$T'_r = \frac{X'_r}{\omega R_r}$ – Constantes temporais transitórias do rotor (s);

ω_s – Velocidade de rotação síncrona (s^{-1});

α – Ângulo de tensão de fase no momento do curto-circuito;

$\sigma = 1 - K_s K_r$ – Coeficiente de vazamento total;

$$K_s = \frac{X_m}{X_s} \quad (41)$$

$$K_r = \frac{X_m}{X_r} \quad (42)$$

No caso de motores assíncronos de grandes potências e alta velocidade, o fluxo no rotor demora um tempo maior para decair. A frequência do motor está diretamente associada à sua velocidade. Este se torna uma variável para a determinação do decaimento e duração da contribuição (MOTA, 2014; CHAPMAN, 2013).

A contribuição do motor para a corrente de curto-circuito é devida à tensão induzida na armadura, gerada pelo fluxo do rotor. Tal voltagem, proporciona a

circulação de corrente que é limitada pela impedância do estator. Supondo que corrente nas três fases ou em duas apenas seja assimétrica inicialmente, o estudo deduz que cada deslocamento compreende de uma componente da corrente alternada e uma de corrente contínua. A componente ac decai, pois não é conservado a tensão do sistema. Da mesma forma, a componente transitória dc decai porque não é sustentada por nenhuma tensão. A frequência da máquina inicialmente é diferente da frequência do sistema elétrico por escorregamento do motor (HUENING, 1982).

Após os primeiros ciclos de um curto-circuito a alteração da frequência em geral é considerada conservadora. A magnitude inicial do componente ac é determinada utilizando a impedância subtransiente do motor Z'' . O cálculo da magnitude da componente dc é idêntico ao valor inicial da componente ac (HUENING, 1982).

$$I_{ac} = \left(\frac{E}{Z''}\right)e^{-\frac{2\pi t}{T''_d}} \quad (43)$$

$$I_{dc} = \sqrt{2}\left(\frac{E}{Z''}\right)e^{-\frac{2\pi t}{T_a}} \quad (44)$$

Em que:

t – Tempo em ciclos na frequência do sistema;

T''_d e T_a – Constantes de tempo da relação $\frac{X}{R}$ (A constante de tempo em radianos para o decaimento do componente CA T''_d é $\frac{X}{R_R}$, sendo R_R é a resistência do rotor e a constante de tempo em radianos para o decaimento do componente dc T_a é $\frac{X}{R_S}$, onde R_S é a resistência do estator;

A equação 45, extraída do circuito equivalente, traduz o comportamento da corrente do circuito de armadura. Essa depende da tensão aplicada no motor e da impedância equivalente do circuito do estator, que pode ser calculada através da equação 46 (CHAPMAN, 2013).

$$I_1 = \frac{V_\phi}{Z_{eq}} \quad (45)$$

Em que:

I_1 – Corrente no estator;

V_ϕ – Tensão de fase aplicada ao estator;

Z_{eq} – Impedância equivalente;

$$Z_{eq} = R_1 + jX_1 + \frac{1}{G_c + jB_m + \frac{1}{\frac{R_2}{s} + jX_2}} \quad (46)$$

Em que:

Z_{eq} – Impedância equivalente;

R_1 – Resistência dos enrolamentos do estator;

jX_1 – Reatância do estator;

G_c – Condutância ($\frac{1}{R_c}$);

B_m – Susceptância ($\frac{1}{X_M}$);

jX_2 – Reatância do estator;

5 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

5.1 Introdução

Para minimizar ou eliminar as consequências de um curto-circuito, é fundamental a realização de um projeto de proteção confiável. Para isso é necessário entender o comportamento dos equipamentos e dos circuitos, além de conhecer as correntes que circulam durante esse período.

Os cálculos das correntes de curto circuito geralmente são baseados em normas. As metodologias mais utilizadas para a determinação dos valores dessas correntes são padrões internacionais, elaborados pelos institutos ANSI (*American National Standards Institute*), IEC (*International Electrotechnical Commission*) e o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*).

As metodologias utilizadas por estas instituições para o cálculo de curto circuito estão demonstradas abaixo.

5.2 Método de cálculo conforme a IEC 60909

A IEC é uma instituição europeia que, através de normas e guias técnicos, regulamenta diversos setores da eletricidade e eletrônica. A IEC 60909 (*Short-circuit Currents in Three-phase A.C. Systems*) é a norma utilizada para cálculos de correntes de curto-circuito em sistemas trifásicos A.C. (corrente alternada) de baixa tensão e em sistemas trifásicos A.C. de alta tensão até 230 kV em frequências nominais de operação de 50 ou 60 Hz (GRIGOLETO, 2013).

A IEC-609009 usa conceitos de próximo e longe do gerador para modelar a queda da componente ac da corrente de falta. Já a diminuição da componente dc é utilizada para calcular a corrente de curto-circuito de pico, no qual a norma observa se a falha provém de um sistema elétrico em malha ou radial. Para o cálculo da corrente de curto em regime, faz-se necessário considerar os sistemas de excitação das máquinas girantes (IEC 60909-0, 2001-07).

Para um melhor entendimento da norma IEC 60909 aplica-se alguns conceitos, termos e nomenclatura (IEC 60909-0, 2001-07):

- Curto circuito: contato acidental ou intencional entre partes condutoras, ocasionando em diferenças de potencial elétrico.

- Curto-circuito linha a linha: falta por meio de dois ou mais condutores com ou sem contato com a terra
- Curto-circuito linha-terra: curto-circuito monofásico em um sistema neutro aterrado ou aterrado por impedância.
- Corrente de curto-circuito: sobrecorrente decorrente a um curto-circuito.
- Corrente simétrica inicial de curto-circuito I''_K : Valor eficaz da componente simétrica ac, aplicável no momento da falta se a impedância ficar no valor inicial.
- Componente aperiódica decrescente da corrente de curto-circuito i_{dc} : valor médio entre o invólucro superior e inferior de uma corrente de curto-circuito.
- Corrente de pico de curto-circuito i_p : maior valor instantâneo possível da corrente de falta disponível.
- Corrente de curto-circuito simétrica I_b : Valor eficaz da componente simétrica ac de curto-circuito no instante da separação por contato de dispositivo de seccionamento.
- Corrente de curto-circuito em estado estacionário I_K : Valor eficaz da corrente de falta que permanece após o decaimento dos fenômenos transitórios
- Tensão nominal do sistema U_n : tensão (linha a linha) pela qual um sistema elétrico é designado.
- Fonte de tensão equivalente $cU_n/\sqrt{3}$: tensão de uma fonte ideal aplicada no local de curto-circuito no sistema de sequência positiva para o cálculo da corrente de curto-circuito, na qual essa é a única fonte ativa da rede.

A norma IEC 60909 utiliza uma técnica da “fonte equivalente”, que se baseia no princípio de Thévenin no qual é introduzida uma fonte de tensão equivalente no ponto de defeito. Esta fonte de tensão será a única a alimentar o circuito enquanto as outras estarão inativas e serão substituídos pelas suas impedâncias específicas (GRIGOLETO, 2013).

A técnica da fonte equivalente sugere a utilização de um fator de tensão “C” à tensão pré-falta nominal do sistema, no qual pode-se utilizar o fator da corrente de curto circuito máxima C_{max} ou corrente de curto circuito mínimas C_{min} , ilustrados na

tabela 1. O fator de tensão “C” tem o intuito de obter o módulo da tensão da fonte equivalente no local da falta (IEC 60909-0, 2001-07).

Tabela 1: Fator de tensão "C"

Tensão nominal U_n	Fator de correção de tensão “c” para cálculo de:	
	Correntes de curto-circuito Máximas $C_{max}^{(1)}$	Correntes de curto-circuito Mínimas C_{min}
Baixa tensão 100V a 1000V (IEC 60038, Tabela-I)	1,05 ⁽³⁾ 1,10 ⁽⁴⁾	0,95
230/400V (sistema a quatro fios)	1,00 ⁽⁵⁾	
Média tensão > 1,0 kV até 35 kV (IEC 60038, Tabela III)	1,10	1,00
Alta tensão ⁽²⁾ > 35 kV (IEC 60038, Tabela IV)		
(1) $C_{max} U_n$ não deve exceder a tensão mais alta U_m dos equipamentos do sistema de potência (2) Se nenhuma tensão nominal é definida então $C_{max} U_n = U_m$ ou $C_{min} U_n = 0,9 \times U_m$ (3) Para sistemas de baixa tensão com tolerância de +6%, exemplo sistema de 380V operando em 400V (4) Para sistemas de baixa tensão com tolerância de +10%, exemplo sistema de 440V operando em 480V (5) Conforme Tabela 12-1 IEEE Std 551-2006 [2] U_m máxima tensão fase-fase rms do equipamento U_n tensão nominal fase-fase rms do sistema		

Fonte: IEC 60909-0, 2001-07

Segundo a IEC 60909-0 (2001-07) para realizar os cálculos dos valores máximos das correntes de curto circuito é preciso a incorporação das condições a seguir:

- Na ausência de normas regionais deve-se utilizar o fator de tensão C_{max} ilustrado na tabela 1.
- Através do ponto escolhido para análise de curto-circuito, escolher a o arranjo do sistema elétrico, no qual corresponde a máxima parcela atribuída pela geração e concessionária.
- No caso das indústrias a impedância equivalente (Z_Q) a ser utilizada para demonstrar o sistema elétrico interno, deve-se utilizar o valor mínimo da impedância equivalente dentre as fornecidas, a qual corresponderá à máxima contribuição do sistema externo (concessionária)

- Já a contribuição dos motores deve-se utilizar a forma apropriada, conforme será descrito nesta metodologia de cálculo.
- Às resistências de linhas aéreas e cabos (R_L), deve-se introduzir uma correção para 20°C através da equação 47.

Já para os cálculos dos valores mínimos das correntes de curto-circuito torna-se indispensável as condições seguintes (IEC 60909-0, 2001-07):

- Através da tabela deve-se aplicar o fator de tensão C_{min} para obtenção dos valores das correntes de curto-circuito mínimas.
- Escolher a configuração do sistema, no qual representa o mínimo de contribuição no valor corrente de curto-circuito no ponto de interesse.
- Excluir as contribuições dos motores.
- Utiliza-se a equação 47 para correção da temperatura esperada no final da falta das resistências de linhas aéreas e cabos (R_L).

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ C)] \times R_{L20} \quad (47)$$

Em que:

R_{L20} – Resistência a 20°;

θ_e – Temperatura em graus Celcius no final do curto-circuito;

α – fator igual a 0,004/K, válido com suficiente precisão na maioria das aplicações para cobre, alumínio, e ligas de alumínio;

A constante de temperatura K é calculada para condutores de cobre com ou sem revestimento metálico por meio da equação 48, que leva em consideração a temperatura em graus Celsius no final do curto-circuito θ_e , que pode ser observadas nas normas , IEC 60865-1, IEC 60949 e IEC 60986.

$$K = \frac{254,5}{234,5 + \theta_e} = \frac{1}{1 + 0,00393(\theta_e - 20)} \quad (48)$$

Para condutores de alumínio ou liga de alumínio é utilizada a equação 49.

$$K = \frac{248}{228 + \theta_e} = \frac{1}{1 + 0,00403(\theta_e - 20)} \quad (49)$$

As impedâncias que serão apresentadas a seguir são necessárias para realização dos cálculos das correntes de curto-circuito posterior. As impedâncias de sequência positiva $Z_{(1)}$ e negativa $Z_{(2)}$ são iguais, considerando transformadores, condutores, redes aéreas, alimentadores e equipamentos similares. Já a impedância de sequência zero $Z_{(0)}$ é obtida assumindo uma tensão a.c. por meio de três condutores e o retorno pela terra (IEC 60909-0, 2001-07).

Para os cálculos das correntes de falta com a fonte equivalente no local de curto-circuito, deve-se utilizar os fatores de correção de impedâncias K_G , K_T e K_{SO} (IEC 60909-0, 2001-07).

5.2.1 Impedância da concessionária (Z_Q)

Em caso de um curto-circuito trifásico alimentado por um sistema (concessionária), no qual I''_{KQ} (corrente simétrica inicial) no ponto Q é conhecida, Z_Q é obtido através da equação 50.

$$Z_Q = \frac{U_{nQ}}{I''_{KQ}} \times \frac{c}{\sqrt{3}} \quad (50)$$

Em que:

I''_{KQ} – Corrente simétrica inicial de curto-circuito, valor eficaz da componente simétrica ac de uma corrente de curto-circuito disponível que é aplicável no instante de curto-circuito, caso a impedância mantenha no valor de tempo zero;

U_{nQ} – Fonte de tensão da concessionária;

Caso seja conhecida a impedância Z_Q , X_Q pode ser calculado utilizando a equação 51.

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+(R_Q/X_Q)}} \quad (51)$$

Para cálculo utilizando por unidade (p.u.) na equação 52 deve-se usar o fator C , ilustrado na tabela 1. Já para os cálculos das tensões de base diferentes que não tem as mesmas unidades, estas são tratadas por meio da equação 53.

$$Z_{BaseComum} = \frac{C*(Z_{Base\ do\ Equipamento})(MVA_{BaseComum})}{MVA_{Base\ do\ Equipamento}} \quad (52)$$

Em que:

$Z_{BaseComum}$ – Impedância em p.u.

$Z_{Base\ do\ Equipamento}$ – Impedância do equipamento em p.u.;

$MVA_{BaseComum}$ – Potência base em p.u.;

$MVA_{Base\ do\ Equipamento}$ – Potência do equipamento em p.u.;

$$Z_{BaseComum} = Z_{Equipamento} \frac{KV^2_{Equipamento}}{KV^2_{BaseComum}} \quad (53)$$

Em que:

$Z_{BaseComum}$ – Impedância em p.u.

$Z_{Equipamento}$ – Impedância do equipamento;

$KV_{Equipamento}$ – Tensão do equipamento;

$KV^2_{BaseComum}$ – Tensão base em p.u.;

Caso a falta trifásica seja alimentada por um transformador interligado no sistema elétrico da concessionária, em que I''_{KQ} no local Q é conhecida, Z_{Qt} impedância equivalente na sequência positiva do secundário do transformador (baixa tensão) é calculado através da equação 54.

$$Z_{Qt} = \frac{CU_{nQ}}{I''_{KQ}\sqrt{3}} \times \frac{1}{t_r^2} \quad (54)$$

Em que:

U_{nQ} – tensão nominal do sistema no ponto de conexão Q;

I''_{KQ} – corrente de curto-circuito inicial simétrica no ponto de conexão Q;

t_r – relação de transformação nominal com o “OLTC” ou Comutador de Taps sob Carga, na posição principal (posição na qual as características nominais do transformador foram definidas);

5.2.2 Transformadores

A partir dos dados de placa do transformador bifásico pode-se calcular Z_T (Impedância do transformador) de curto-circuito de sequência positiva, de acordo com a equação 55 e 56 a seguir.

$$Z_T = \frac{U_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \quad (55)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (56)$$

$$R_T = \frac{U_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = P_{krT} / 3I_{rT}^2 \quad (57)$$

Em que:

U_{rT} – Tensão nominal do lado da alta ou da baixa tensão;

I_{rT} – Corrente nominal do transformador do lado da alta ou da baixa tensão;

S_{rT} – Potência aparente nominal do transformador;

P_{krT} – Perda total nos enrolamentos para corrente nominal;

U_{kr} – Tensão de curto-circuito para corrente nominal em %;

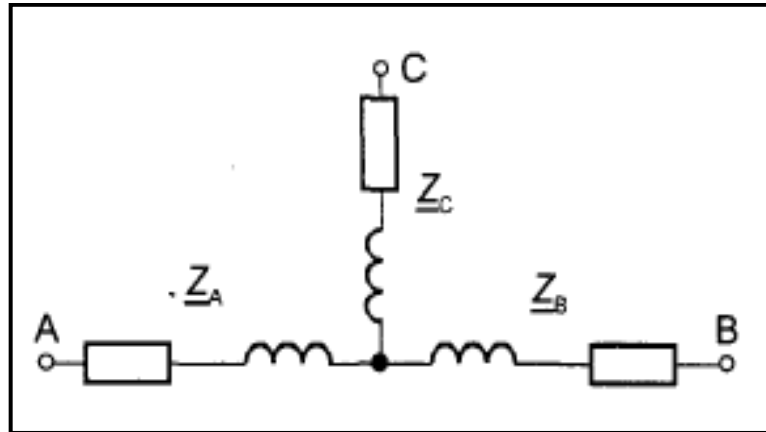
U_{Rr} – Componente resistiva da tensão de curto-circuito em %;

A componente resistiva da tensão de curto-circuito pode ser obtida através das perdas totais nos enrolamentos para corrente nominal do transformador do lado da alta ou da baixa tensão. Utiliza-se a equação 58 tanto para unidade de perda em KW ou KVA, a partir das perdas com carga e sem carga fornecidos pelo fabricante, obtidas através de testes.

$$\%R = \frac{(PerdasemCarga - PerdasemVazio) * 100}{PotênciaNominal} \quad (58)$$

No caso de transformadores de trifásico, as impedâncias de curto-circuito de sequência positiva, podem ser calculadas pelas três seguintes equações, referenciando-se pelo lado A do transformador da figura 23.

Figura 23: Diagrama de circuito equivalente (sistema de seqüência positiva)



Fonte: IEC 60909-0, 2001-07

$$Z_{AB} = \left(\frac{U_{RrAB}}{100\%} \times j \frac{U_{XrAB}}{100\%} \right) * \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} \quad (\text{Lado C aberto}) \quad (59)$$

$$Z_{AC} = \left(\frac{U_{RrAC}}{100\%} \times j \frac{U_{XrAC}}{100\%} \right) * \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} \quad (\text{Lado B aberto}) \quad (60)$$

$$Z_{BC} = \left(\frac{U_{RrBC}}{100\%} \times j \frac{U_{XrBC}}{100\%} \right) * \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} \quad (\text{Lado A aberto}) \quad (61)$$

Com:

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{Kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (62)$$

Pelas equações:

$$Z_A = \frac{1}{2} (Z_{AB} + Z_{AC} - Z_{BC}) \quad (63)$$

$$Z_B = \frac{1}{2} (Z_{BC} + Z_{AB} - Z_{AC}) \quad (64)$$

$$Z_C = \frac{1}{2} (Z_{AC} + Z_{BC} - Z_{AB}) \quad (65)$$

Em que:

 U_{rTA} – Tensão nominal do lado A; S_{rTAB} – Potência aparente nominal entre os lados A e B; S_{rTAC} – Potência aparente nominal entre os lados A e C;

S_{rTBC} – Potência aparente nominal entre os lados B e C;

U_{RrAB}, U_{XrAB} – Componentes resistivos e reativos nominais da tensão de curto-circuito, dados em porcentagem entre os lados A e B;

U_{RrAC}, U_{XrAC} – Componentes resistivos e reativos nominais da tensão de curto-circuito, dados em porcentagem entre os lados A e C;

U_{RrBC}, U_{XrBC} – Componentes resistivos e reativos nominais da tensão de curto-circuito, dados em porcentagem entre os lados B e C;

5.2.3 Linhas aéreas e cabos

A partir das informações do condutor, como seção transversal e distância centrais do condutor é possível calcular a impedância de curto-circuito de sequência positiva $Z_L = R_L + jX_L$. Para medir a impedância de sequência positiva $Z_{(1)} = R_{(1)} + jX_{(1)}$ e a de sequência zero $Z_{(0)} = R_{(0)} + jX_{(0)}$ consulte IEC 60909-4.

Com a temperatura de 20°C, é possível realizar o cálculo da resistência efetiva por unidade de comprimento R'_L das linhas com base na seção nominal q_n e na resistividade ρ .

$$R'_L = \frac{\rho}{q_n} \quad (66)$$

Em que a resistividade:

Cobre $\rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega mm^2}{m}$

Alumínio $\rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega mm^2}{m}$

Liga de alumínio $\rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega mm^2}{m}$

Para linhas aéreas a reatância por unidade de comprimento X'_L , é obtida através da equação 67.

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f\mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) \quad (67)$$

Em que:

$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} + d_{L2L3} + d_{L3L1}}$ distância média geométrica entre condutores ou o centro dos feixes;

r – Raio de um único condutor. No caso de feixes de condutores, r deve ser substituído $r_B \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, onde R é o raio do pacote;

n – Número de condutores agrupados; para condutores únicos $n = 1$;

$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} H/m$;

5.2.4 Fatores de correção

Deve-se utilizar K_T (fator de correção de impedância) de acordo com a equação 86 e 87 em transformadores de dois enrolamentos com ou sem “OLTC”, devido que o equipamento possa causar uma queda de tensão acima de 10%, mesmo já utilizando o fator de correção C_{max} .

$$K_T = 0,95 \frac{C_{max}}{1+0,6X_T} \quad (68)$$

Em que:

$$X_T = \frac{X_T}{U^2_{rT}/S_{rT}} \quad (69)$$

Desta forma a impedância será de acordo com a equação 88.

$$Z_{TK} = K_T Z_T = K_T (R_T + jX_T) \quad (70)$$

Caso seja conhecida condições operacionais dos transformadores de rede antes do curto-circuito, a seguinte equação 71 pode ser utilizado no lugar da equação 68.

$$K_T = \frac{U_n}{U^b} * \frac{C_{max}}{1+X_T(I_T^b/I_{rT})\text{sen}\phi_T^b} \quad (71)$$

Em que:

C_{max} – Fator de tensão da tabela 1, relacionado à tensão nominal da rede conectada ao lado de baixa tensão do transformador de rede;

U^b – Tensão operacional mais alta antes do curto-circuito;

I_T^b – Corrente operacional mais alta antes do curto-circuito;

ϕ_T^b – ângulo do fator de potência antes do curto-circuito;

Na sequência negativa e zero também deve-se utilizar o fator de correção da impedância do transformador para cálculos das correntes de falta desbalanceadas. As impedâncias Z_N , dos transformadores entre o ponto estrela e a terra, necessitam introduzir como $3Z_N$ em um sistema de sequência zero, sem um fator de correção.

Para transformadores de três enrolamentos com e sem comutador de derivação em carga, três fatores de correção de impedância podem ser encontrados usando os valores relativos das reatâncias do transformador mostrados anteriormente

5.2.5 Geradores síncronos

Os geradores síncronos são uma das principais fontes contribuintes para corrente de curto-circuito. Em sistemas elétricos alimentados por geradores, sem transformadores, como em indústrias, a impedância é calculada por meio da equação 90 utilizando a sequência positiva, observado o diagrama fasorial como ilustra a imagem. Também deve-se utilizar o fator de decremento " μ " e o coeficiente λ_{max} e λ_{min} da escala de corrente.

$$Z_{GK} = K_G Z_G = K_G (R_G + jX''_d) \quad (72)$$

Mediante ao fator de correção conseguido por meio da equação 73 e 74.

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} * \frac{C_{max}}{1 + X''_d \text{sen} \phi_{rG}} \quad (73)$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} * \frac{C_{max}}{1 + X_d \text{sen}(\text{arcos}(pf_R))} \quad (74)$$

Em que:

- C_{max} – Fator de correção de tensão, conforme tabela 1;
 U_m – Tensão nominal do sistema;
 U_{rG} – Tensão nominal do gerador;
 Z_{GK} – Impedância subtransitória do gerador corrigida;
 Z_G – Impedância subtransitória de sequência positiva do gerador $Z_G = R_G + jX''_d$;
 ϕ_{rG} – Ângulo de fase entre I_{rG} e $U_{rG}/\sqrt{3}$;
 pf_R – Fator de potência nominal do gerador;
 X''_d – Reatância subtransitória rereativa do gerador referente a impedância nominal $X''_d = X''_d/Z_{rG}$ em que $Z_{rG} = U^2_{rG}/S_{rG}$;

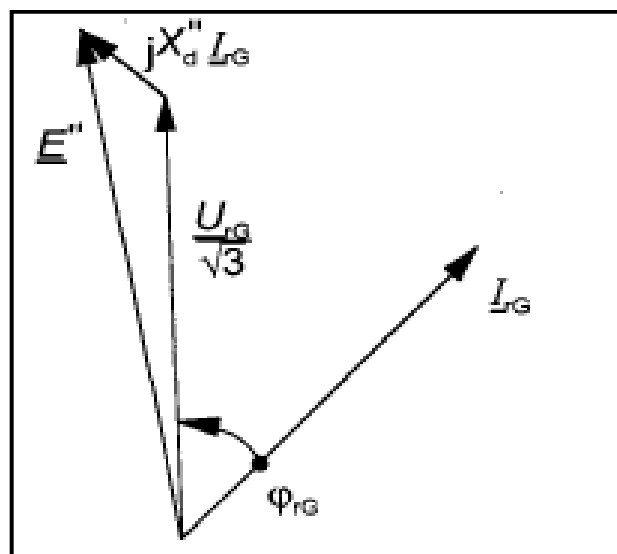
Caso a tensão nominal do gerador U_{rG} seja diferente, é preciso utilizar U_G na equação 75 no lugar da equação 73 e aplicar K_G na impedância do gerador síncrono em sequência negativa. No caso do fechamento do gerador em estrela, a impedância de terra não deve utilizar o fator K_G .

$$U_G = U_{rG}(1 + p_G) \quad (75)$$

Em que:

p_G – Faixa de regulação da tensão do gerador;

Figura 24: Diagrama fasorial de gerador síncrono em condições nominais



Fonte: IEC 60909-0, 2001-07

O fator K_G viabiliza um valor elevado de tensão diante do abaixamento das tensões internas do gerador síncrono, no qual permite usar 1,0 p.u. de fonte de tensão. O fator K_G é utilizado para a correção da impedância subtransitória Z_{GK} , devido a fonte de tensão equivalente fator $cU_n/3$.

Para calcular a corrente de pico de curto-circuito os valores fictícios da resistência R_{Gf} podem ser utilizados, com precisão suficiente.

$$R_{Gf} = 0,05 X''_d \text{ para geradores com } U_{rG} > 1000V \text{ e } S_{rG} \geq 100MVA;$$

$$R_{Gf} = 0,07 X''_d \text{ para geradores com } U_{rG} > 1000V \text{ e } S_{rG} < 100MVA;$$

$$R_{Gf} = 0,15 X''_d \text{ para geradores com } U_{rG} \leq 1000V;$$

A temperatura de enrolamento em R_{Gf} não é considerada para estes fatores 0,05, 0,07 e 0,15.

A contribuições de geradores síncronos para as correntes de curto-circuito inicial é obtida através de cálculos, nos quais deve ser utilizar os fatores de correção mostrados anteriormente para geradores e subestações geradoras unitárias na condição de corrente longe da geração. Da mesma forma, será feito para o cálculo da corrente de curto-circuito de pico, em que é preciso inserir os fatores de correção para a impedância do gerador bem como da subestação gerador/transformador, além de considerar se o caminho da falta é em malha ou radial.

A IEC 60909-0 (2001-07) determina o cálculo de máxima e mínima corrente de falta e regime. Caso ocorra uma falha a corrente de curto-circuito de regime de um gerador necessita da reatância síncrona, influência da saturação, desempenho do regulador de tensão e da máxima tensão de excitação do equipamento. Na condição de excitação máxima, é a qual o gerador proporciona a máxima corrente, como mostra a equação 76.

$$I_{kmax} = \lambda_{max} I_{rG} \tag{76}$$

Em que:

I_{kmax} – Corrente de regime máxima;

I_{rG} – Corrente nominal do gerador;

λ_{max} – Coeficiente de escala de corrente de regime máxima;

Já para a obtenção da corrente mínima de curto-circuito em regime o gerador deve estar operando com excitação a vazio e constante, conforme a equação 77.

$$I_{kmin} = \lambda_{min} I_{rG} \quad (77)$$

Em que:

I_{kmin} – Corrente de regime mínima;

I_{rG} – Corrente nominal do gerador;

λ_{min} – Coeficiente de escala de corrente de regime mínima;

Nos terminais do gerador a corrente simétrica de curto-circuito diminui na ocorrência de uma falha, a qual é quantificado em função do fator μ , conforme equação 78.

$$I_b = \mu I''_K \quad (78)$$

Em que:

I_b – Corrente de interrupção simétrica no tempo t;

I''_K – Corrente de curto-circuito inicial;

μ – Fator de decremento para um tempo t, definido pelo conjunto de equações 79 abaixo;

$$\begin{aligned} \mu &= 0,84 + 0,26e^{-0,26r}, \text{ para } t_{min} = 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51e^{-0,30r}, \text{ para } t_{min} = 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72e^{-0,32r}, \text{ para } t_{min} = 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94e^{-0,38r}, \text{ para } t_{min} \geq 0,25 \text{ s} \end{aligned} \quad (79)$$

5.2.6 Motores assíncronos

Os motores de indução de baixa tensão que tiverem uma contribuição inferior a 5% da corrente de curto-circuito I''_K precisam ser ignoradas. No caso dos motores com de média e baixa tensão com contribuição acima, no qual contribuem para a corrente de curto-circuito inicial I''_K , corrente de curto-circuito de pico i_p e corrente de curto-circuito simétrica de interrupção I_b , necessitam de ser analisados aos cálculos de corrente de curto-circuito máxima.

As impedâncias de rotor bloqueado, $Z_m = R_m + jX_m$, dos motores de indução de sequência negativa e positiva, consegue ser obtidas através da equação 80.

$$Z_m = \frac{1}{I_{LR}/I_{rm}} * \frac{U_{rm}}{\sqrt{3}I_{rm}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rm}} * \frac{U_{rm}^2}{S_{rm}} \quad (80)$$

Em que:

U_{rm} – Tensão nominal do motor;

I_{rm} – Corrente nominal do motor;

S_{rm} – Potência aparente do motor $S_{rm} = P_{rM}/(\eta_{rm}\cos\phi_{rm})$;

I_{LR}/I_{rm} – Relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal do motor;

Caso R_M/X_m seja conhecido, X_m pode ser determinado pela equação 81.

$$X_m = \frac{U_m}{\sqrt{1+(R_M/X_m)^2}} \quad (81)$$

O fator μ aplicado aos geradores aplica-se também aos motores de indução. Para calcular as correntes de interrupção, utiliza-se o fator q apresentado no conjunto de equações 83 juntamente com o fator μ aplicados as correntes simétricas de contribuição para os primeiros ciclos obtidos dos motores, de acordo com a equação 82.

$$I_{bm} = \mu * q * I''_{kM} \quad (82)$$

$$q = 1,03 + 0,12 I_n(P_{rM}/p) \text{ para } t_{min} = 0,02 \text{ s}$$

$$q = 0,79 + 0,12 I_n(P_{rM}/p) \text{ para } t_{min} = 0,05 \text{ s} \quad (83)$$

$$q = 0,57 + 0,12 I_n(P_{rM}/p) \text{ para } t_{min} = 0,10 \text{ s}$$

$$q = 0,26 + 0,12 I_n(P_{rM}/p) \text{ para } t_{min} \geq 0,25 \text{ s}$$

Em que:

P_{rM} – Potência ativa nominal em MW;

p – Número de pares de pólos do motor;

Se o requisito da equação 84 for satisfeita, quando os motores de indução conectados ao sistema elétrico na decorrência de um curto-circuito anterior a transformadores de dois enrolamentos, estes podem ser desprezados do cálculo das corrente de falta neste no ponto.

$$\frac{\sum P_{rm}}{\sum S_{rm}} \leq \frac{0,8}{\left| \frac{c100 \cdot \sum S_{rT}}{\sqrt{3} U_{nQ} I''_{KQ}} - 0,3 \right|} \quad (84)$$

Em que:

$\sum P_{rm}$ – Soma das potências ativas nominais dos motores de média e baixa tensão que devem ser considerados;

$\sum S_{rm}$ – Soma das potências aparentes de todos os transformadores pelos quais os motores são alimentados;

I''_{KQ} – Corrente de curto-circuito simétrica inicial no ponto Q sem a contribuição dos motores;

U_{nQ} – Tensão nominal do sistema no ponto;

C – Fator de correção da tensão da Tabela 2;

5.2.7 Corrente de curto-circuito de pico e eficaz

Levando em consideração as máquinas elétricas, a corrente de curto-circuito submeti os equipamentos a grandes forças magnéticas, além da energia térmica apresentada na corrente de falta. A corrente de pico é fase em que estes componentes sofreram o maior esforço. Normalmente, a corrente de falta de pico se dá no 1º ciclo, no início da falha e no ponto em que a tensão passa por zero, definida como “Condição de máxima assimetria”.

Para obtenção da corrente de falta deve-se levar em consideração a componente “ac” e a componente transitória “dc” da corrente de curto-circuito, a qual pode ser calculada pela equação 85. Essas componentes são utilizadas para calcular o valor eficaz e de pico da corrente que pode surgir no sistema elétrico, não desconsiderando as contribuições das máquinas girantes. Caso $\frac{X}{R}$ da falha seja maior que $\frac{X}{R}$ da norma do equipamento, deve-se utilizar fatores de correção apropriados.

$$I_{dc} = \sqrt{2}I_{ac\ rms}(0,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X/R}}) \quad (85)$$

Por meio da equação 86 pode-se calcular corrente de curto-circuito máxima, no qual o fator k é obtido empiricamente através da equação 106. Já a corrente de falta eficaz é obtida pela equação 88.

$$I_{pico} = k\sqrt{2}I_{ac\ rms} \quad (86)$$

$$k = 1,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X/R}} \quad (87)$$

$$I_{rms} = I_{ac\ rms}\sqrt{1 + 2(0,02 + 0,98e^{-\frac{3}{X/R}})^2} \quad (88)$$

5.3 Método de cálculo apresentado na norma ANSI

A ANSI é uma instituição privada dos Estados Unidos que tem a finalidade de facilitar a padronização. Para isso, o instituto cria, decreta e aplica normas e guias técnicos em diversos setores. As normas referenciadas aplicáveis para os cálculos de curto circuito são; a ANSI/IEEE C37.010-2005 - *application guide for AC high voltage circuit breakers rated a symmetrical currents basis*, que aborda métodos de cálculo de faltas em média e alta tensão para sistemas trifásicos e a ANSI/IEEE C37.013 – *Standard for low voltage AC power circuit breakers used in enclosures*, que aborda métodos de cálculo de faltas em sistemas de baixa tensão.

A norma ANSI/IEEE C37-010 tem como objetivo orientar a aplicação de disjuntores de alta tensão, no qual, são considerados conforme o padrão IEEE C37.04 e IEEE Std C37.06 e experimentado conforme a IEEE Std C37.09 e outros padrões. Segundo a norma ANSI/IEEE C37-010, é indispensável o cálculo das correntes de curto-circuito para a especificação dos disjuntores, pois, este é o valor mais elevado de corrente que o dispositivo devera suportar, por isso, é orientado o leitor a IEEE Std 551 para orientação sobre como calcular as correntes de curto-circuito (BREAKERS, 2016).

A corrente de curto-circuito é considerada como o maior valor de corrente “disponível” que pode surgir nos circuitos em ocorrência da falha (IEEE Std 551™-2006). Este valor de corrente é um dos principais requisitos na aplicação do disjuntor (BREAKERS, 2016).

Segundo a ANSI para realização dos cálculos das correntes de curto-circuito em sistemas elétricos de corrente alternada, deve-se obedecer aos requisitos a seguir:

- Conserva-se o sistema elétrico equilibrado sob frequência nominal e constante;
- No decorrer da falta não existe variação de tensão da fonte que deu origem à corrente de curto-circuito;
- As correntes de carga pré-falta são desprezadas, uma vez que se presume serem muito menores que as correntes de curto-circuito.
- Em sistemas com vários níveis de tensão, consideram-se as relações de transformação para todos os transformadores como sendo, 1,00 p.u. e as tensões nominais dos transformadores são consideradas como sendo as tensões nominais das barras do sistema;
- Não tem nenhum efeito limitador de corrente, pois, a impedância de falta considerada nula;
- Não podem ser desprezados as contribuições de motores em magnitude desde o início da falta.

O primeiro passo para os cálculos conforme a “ANSI” é a determinação dos valores das reatâncias de máquinas a serem utilizadas. No sistema elétrico em que há motores de indução, a componente simétrica CA da corrente de curto-circuito varia com base no tempo após a falta. A assimetria decorre da razão X/R do local de falha e do ponto na onda senoidal no momento inicial do curto-circuito. A corrente de falta pode ser assimétricas e ter componente CA e CC, no qual componente dc é um valor transitório e abaixa com o tempo. As equações 89 e 90, podem ser utilizadas para obter o valor da assimetria máxima durante o primeiro ciclo, enquanto a equação 91 pode ser usada para tempos de interrupção superiores a 1 ciclo, em que t está em ciclos a 60 Hz.

$$I_{pico} = I_{ac\ pico} \left(1 + e^{-\frac{4\pi\tau R}{X}}\right) \quad (89)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{ac\ rms}^2 + I_{dc}^2} = I_{ac\ rms} \sqrt{1 + 2e^{-\frac{4\pi\tau R}{X}}} \quad (90)$$

$$I_{rms} = I_{ac\ rms} \sqrt{\left(1 + 2e^{-\frac{4\pi\tau R}{2X}}\right)} \quad (91)$$

Para uma precisão do valor da corrente total de curto-circuito em um barramento, é melhor o cálculo da corrente do motor em momentos específicos de interesse após o início da falta. Assumindo decaimentos das magnitudes iniciais são exponenciais da corrente de falha, as componentes CA e CC da corrente do motor (I_{ac} e I_{dc}) são avaliados como variáveis de tempo.

$$I_{ac} = \left(\frac{E}{Z''}\right)e^{-\frac{2\pi t}{T''_d}} \quad (92)$$

$$I_{dc} = \sqrt{2}\left(\frac{E}{Z''}\right)e^{-\frac{2\pi t}{T_a}} \quad (93)$$

Em que:

t – Tempo em ciclos na frequência do sistema;

T''_d e T_a – Constantes de tempo da relação $\frac{X}{R}$ (A constante de tempo em radianos para o decaimento do componente CA T''_d é $\frac{X}{R_R}$ onde R_R é a resistência do rotor e a constante de tempo em radianos para o decaimento do componente dc T_a é $\frac{X}{R_S}$, onde R_S é a resistência do estator);

Existem diferentes métodos para a determinação de correntes de curto-circuito e, também, vários softwares que calculam essas correntes. Cabe ao engenheiro escolher o método de acordo com a precisão exigida. A norma ANSI/IEEE aborda o método simplificado $\frac{E}{X}$, no qual em vários casos a corrente de curto circuito pode ser calculada através $\frac{E}{X_1}$ para faltas trifásicas ou $\frac{3E}{2X_1+X_0}$ para faltas de linha única à terra (BREAKERS, 2016).

Em que:

E – Tensão;

X_1 – Reatância de sequência positiva;

X_0 – Reatância de sequência zero que pode ser obtida a partir de dados de projeto;

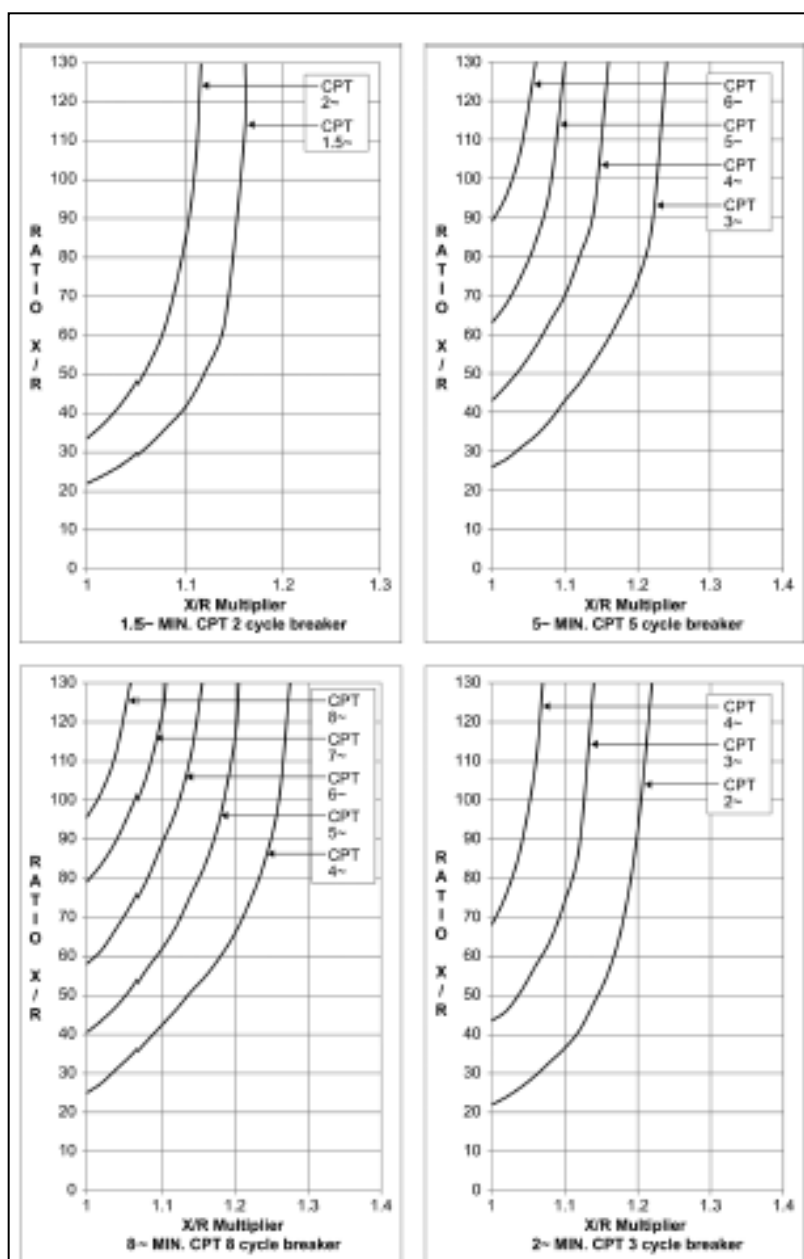
Caso necessite de uma melhor precisão dos valores de corrente é necessário o método $\frac{E}{X}$ com ajuste para decréscimos CA e CC, pois, dessa maneira é aplicado fatores de correção, tais, necessitam do local de ocorrência da falha sobre a relação de $\frac{X}{R}$ (BREAKERS, 2016).

Para determinar a relação $\frac{X}{R}$ dos vários circuitos presentes em um sistema elétrico será a soma de vários termos exponencias, geralmente, com diferentes expoentes. Quando realizado um cálculo de $\frac{E}{Z}$, pode-se substituir $\frac{Z}{R}$ por $\frac{X}{R}$ desde que o R seja a redução separada da resistência, desconsiderando as reatâncias (BREAKERS, 2016).

Para aplicar os fatores de correção o processo a seguir é normalmente conservador (BREAKERS, 2016).

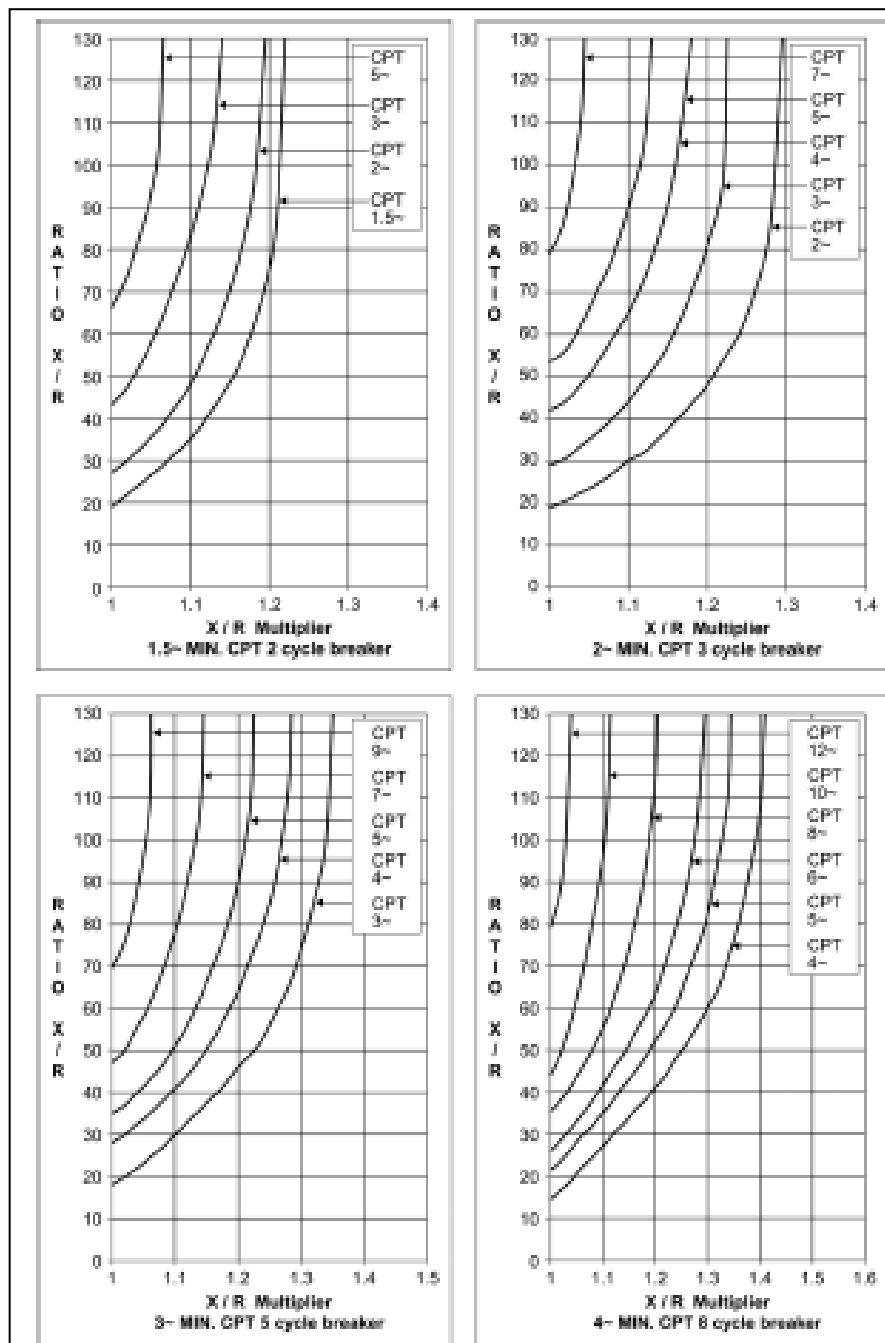
- Identificar e classificar a corrente como “local” ou “remoto”, em termos de corrente de falta do gerador, “local” é definido por contribuições que excedam 40% da corrente de falha do terminal do gerador e “remoto” é definido como uma corrente de falha do gerador que fornece 40% ou menos do que uma falha nos terminais do gerador.
- A figura 25 e a figura 26 mostram os fatores relativos incluindo os efeitos de ambos os decaimentos ac e dc. A corrente $\frac{E}{X}$ deve ser multiplicada por um fator da figura 25 para uma falta trifásica e por um fator de Figura 26 para uma falta linha-terra se a corrente de curto-circuito for alimentada predominantemente de geradores através de uma reatância por unidade externa ao gerador que é inferior a 1,5 vezes o gerador por unidade reatância subtransiente em um sistema comum mega volt-ampere base.
- Os fatores da figura 27 incluem apenas os efeitos do decaimento dc. A corrente $\frac{E}{X}$ deve ser multiplicada por um fator desta figura para uma falha trifásica ou linha-terra se a corrente de curto-circuito for alimentada predominantemente de geradores através de uma reatância por unidade externa ao gerador que é igual ou excede 1,5 vezes a reatância subtransiente do gerador por unidade em um sistema comum mega volt ampere base.

Figura 25: Fatores de redução CA e CC para falhas trifásicas e fase-terra com geração remota para disjuntores de 8, 5, 3 e 2 ciclos



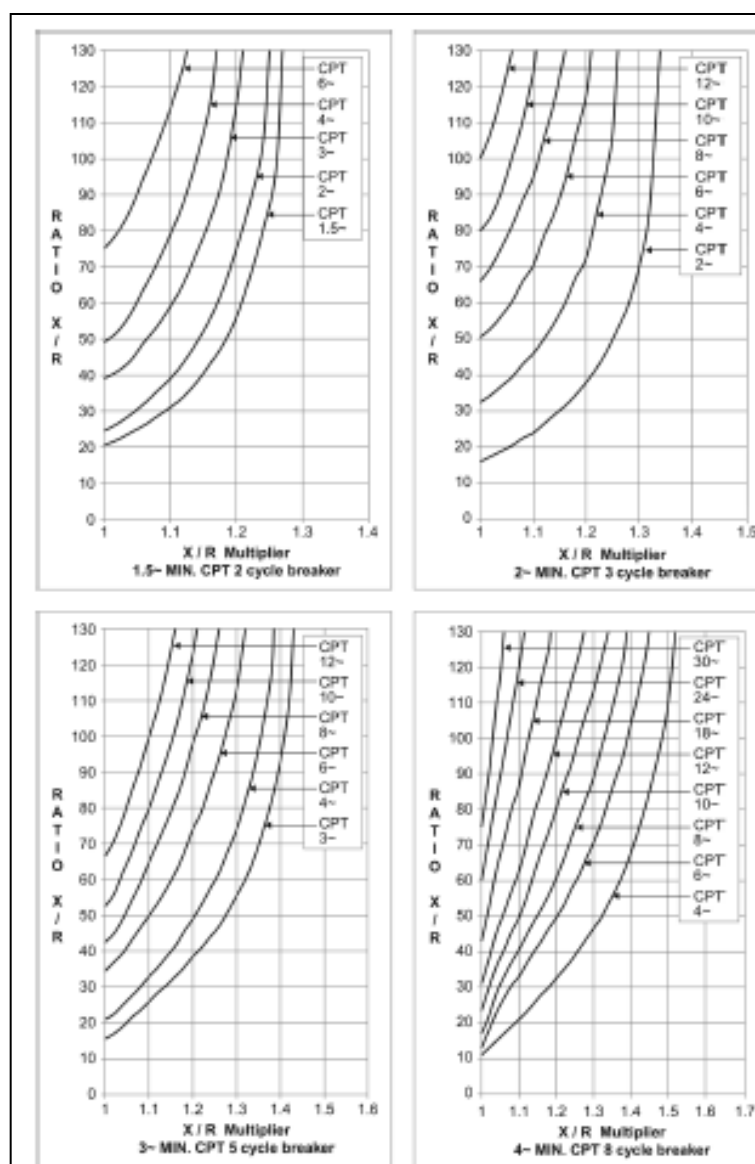
Fonte: Breakers, 2016

Figura 26: Fatores decrescentes CA e CC para falhas fase-terra com geração local para disjuntores de 8, 5, 3 e 2 ciclos



Fonte: Breakers, 2016

Figura 27: Fatores de redução CA e CC para falhas trifásicas e fase-terra com geração remota para disjuntores de 8, 5, 3 e 2 ciclos



Fonte: Breakers, 2016

5.4 Método apresentado em (IEEE Std 551™-2006)

O padrão IEEE Std 551-2006 (*IEEE Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems*) é metodologia bastante aplicada em sistemas elétricos para determinação das correntes de curto.

O circuito elétrico é um meio de compreender as correntes de curto-circuito decorrente de uma falta, e conseqüentemente, descobrir, em qualquer ponto no tempo, a amplitude da corrente de falta. O circuito ilustrado na figura 28 corresponde

à combinação em série de uma resistência, uma indutância e um interruptor alimentado por uma fonte de tensão ideal. Após fechar o interruptor surge a falta, no qual determina-se o valor da corrente assimétrica através da equação abaixo (IEEE Std 551™-2006).

$$I = \frac{E}{Z} \quad (94)$$

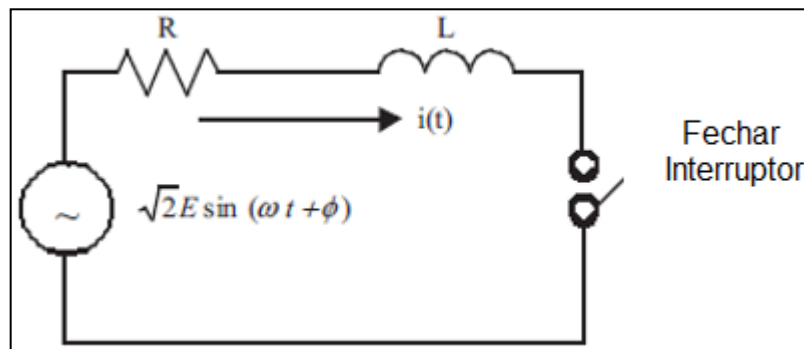
Em que:

I – Corrente em rms (A);

E – Tensão em rms (V);

Z – Impedância (ou reatância) equivalente de Thevenin, incluído a fonte ou fontes de corrente de curto circuito (Ω);

Figura 28: Modelo de circuito para assimetria



Fonte: IEEE Std 5510™-2006

Neste método consideram-se as tensões internas das máquinas elétricas, no qual cada equipamento possui uma tensão diferente, baseando-se no carregamento e impedância e o valor da resistência e reatância das máquinas e baseado em sua característica construtiva. No decorrer de uma falta, o decaimento da tensão interna não pode ser substituído pela energia fornecida pelo campo da máquina.

A determinação de como a corrente de falta se comporta em função do tempo envolve a equação anterior e a solução da seguinte equação diferencial para a atual corrente instantânea (i) no circuito a qualquer momento depois que a chave é fechada.

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 2E \sin(\omega t + \phi) \quad (95)$$

Em que:

E – Magnitude em rms da fonte de tensão senoidal;

i – Corrente instantânea no circuito a qualquer momento depois que a chave é fechada;

R – Resistência do circuito em ohms;

L – Indutância do circuito em Henry (= reatância do circuito dividido por ω);

t – Tempo em segundos;

ϕ – Ângulo da tensão aplicada em radianos quando a falha ocorre;

ω – $\omega = 2\pi f$ onde f é a frequência do sistema em hertz (Hz);

Supondo que a corrente pré-falta através do circuito seja zero (isto é, carga corrente = 0), então a solução instantânea é.

$$i = -\frac{\sqrt{2E}}{Z} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{\omega t R}{X}} + \frac{\sqrt{2E}}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (96)$$

$$i = -I_{dc} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{\omega t R}{X}} + \sqrt{2} I_{ac}(rms) \sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (97)$$

Em que:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \quad (98)$$

$$X = \omega L \quad (99)$$

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad (100)$$

Se o tempo t é em ciclos, a equação 97 passa a ser expressa de acordo com a equação:

$$i = -I_{dc} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{2\omega t R}{X}} + \sqrt{2} I_{ac}(rms) \sin(2\pi t + \alpha - \phi) \quad (101)$$

Um melhor entendimento dos componentes transitórios e estáveis da corrente de curto-circuito pode ser obtido através de um exemplo real. A Figura 29 mostra a

resposta de um determinado circuito, no qual quando o interruptor fecha em $\alpha = 58$ graus, frequência 60 Hz ($\omega = 377$) e com uma impedância $\frac{X}{R}$ de 7,5, a corrente é obtida a partir da solução geral da equação 94.

Segundo a IEEE Std 5510™ (2006) a corrente de curto-circuito total disponível em um sistema elétrico normalmente é fornecida através de várias fontes, divididas em três categorias principais. A primeira é o sistema de transmissão, a qual alimenta a instalação, agindo como um grande gerador remoto; segundo geradores locais e a terceira fonte é motores síncronos e assíncronos (indução), tais estão presentes em várias instalações elétricas. Estes equipamentos rotativos mencionado durante o curto-circuito tem um decaimento de corrente significativo ao longo do tempo, devido à redução de fluxo na máquina durante uma falta.

Os sistemas que tem um número grande de motores de indução possui decaimentos dos componentes de corrente de curto-circuito C.A mais rápidos, o qual na falta em seus terminais a corrente simétrica some após um a dez ciclos. A corrente total de curto-circuito que possui componentes de corrente alternada e de corrente contínua, pode ser expressa como mostrado na equação 102.

$$i_{dc} = i_{dc\ decair} + i_{ac\ curso\ estável} + i_{ac\ decair} \quad (102)$$

$$i_{dc\ decair} = (i_{ac\ curso\ estável})\sin(\alpha - \phi)e^{-\frac{\omega t R}{X}} \quad (103)$$

$$i_{ac\ curso\ estável} = \sqrt{2}I_S\sin(\omega t + \alpha - \phi) \quad (104)$$

$$i_{ac\ decair} = \sqrt{2}I_S\sin(\omega t + \alpha - \phi)e^{-kt} \quad (105)$$

Em que:

I_S – Magnitude da corrente rms em estado estacionário simétrico;

I_{ds} – Magnitude da corrente rms simétrica em decaimento;

k – Variável dependendo da mistura e tamanho das cargas rotacionais

t – Tempo em segundos

A magnitude e a duração da corrente assimétrica dependem dos dois seguintes parâmetros:

- A relação $\frac{X}{R}$ do circuito com falha;
- O ângulo de fase da forma de onda de tensão no momento em que o curto-circuito ocorre;

5.5 Sequência de cálculo apresentado em MAMEDE FILHO (2012)

A corrente de curto circuito de uma instalação em uma indústria é determinada através das impedâncias dos circuitos da planta, que pode ser obtida por intermédio da sequência de cálculos a seguir. Após encontradas essas correntes, é possível determinar os condutores, proteção, equipamentos entre outros (MAMEDE FILHO, 2012).

5.5.1 Impedância do sistema (concessionária)

Para o cálculo das correntes de curto-circuito devem ser observados os principais elementos do sistema elétrico, considerados por meio de suas impedâncias. A impedância do sistema é representada pelas impedâncias desde a fonte geradora até a entrega de energia. A concessionária fornece o valor da corrente de falta no ponto de entrega na maioria das vezes, desta forma é possível calcular a impedância no ponto de entrega através da equação:

$$Z_{us} = R_{us} + X_{us} (pu) \quad (106)$$

Em que:

Z_{us} – Impedância no ponto de entrega;

X_{us} – Reatância do sistema de suprimento;

$R_{us} = 0$ – Resistência do sistema de suprimento (como a resistência do sistema de suprimento é muito pequena relativamente ao valor da reatância, na prática é comum desprezar-se o seu efeito);

$$X_{us} = \frac{P_b}{P_{cc}} (pu) \quad (107)$$

Em que:

X_{us} – Reatância do sistema de suprimento;

P_b – Potência de base;

P_{cc} – Potência de curto-circuito no ponto de entrega, em KVA;

$$P_{cc} = \sqrt{3} \times V_{np} \times I_{cp} \text{ (KVA)} \quad (108)$$

Em que:

P_{cc} – Potência de curto-circuito no ponto de entrega, em KVA;

V_{np} – Tensão nominal primária no ponto de entrega, em Kv;

I_{cp} – Corrente de curto-circuito no ponto de entrega, em A. Conforme o disjuntor escolhido de acordo com a concessionária de energia;

5.5.2 Impedância do transformador

Como todo componente do sistema elétrico contribui com sua impedância para a corrente de falta. Para obter a impedância do transformador pode-se utilizar a equação 109, no qual é necessário conhecer informações do equipamento, tais como, potência nominal, impedância percentual, perdas ôhmicas no cobre e tensão nominal.

$$Z_{ut} = \frac{R_{pt}}{100} + jX_{ut} \text{ (pu)} \quad (109)$$

Em que:

Z_{ut} – Impedância unitária;

R_{pt} – Resistência percentual;

X_{ut} – Reatância unitária;

$$R_{pt} = \frac{P_{cu}}{10 \times P_{nt}} \text{ (\%)} \quad (110)$$

Em que:

R_{pt} – Resistência percentual;

P_{cu} – Perdas no cobre;

P_{nt} – Potência nominal do transformador;

$$X_{ut} = \sqrt{\left(\frac{Z_{pt}}{100}\right)^2 - \left(\frac{R_{pt}}{100}\right)^2} (pu) \quad (111)$$

Em que:

X_{ut} – Reatância unitária;

Z_{pt} – Impedância percentual;

R_{pt} – Resistência percentual;

5.5.3 Impedância do circuito

A partir de dados dos condutores pode-se calcular a impedância dos mesmo de acordo com a equação 112.

$$Z_{uc} = R_{uc} + X_{uc} (pu) \quad (112)$$

Em que:

R_{uc} – Resistência do circuito;

X_{uc} – Reatância do circuito;

$$R_{uc} = \frac{R_{u\Omega} \times L_c}{1000 \times N_{cp}} \times \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \text{ como o termo } \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \text{ é constante}$$

$$R_{uc} = \frac{R_{u\Omega} \times L_c}{1000 \times N_{cp}} \times k \quad K = \frac{P_b}{1000 \times V_b^2} \quad (113)$$

Em que:

R_{uc} – Resistência do circuito;

P_b – Potência de base;

V_b – Tensão de base;

L_c – Comprimento total do condutor;

$R_{u\Omega}$ – Resistência do condutor;

N_{cp} – Número de condutor por fase;

$$X_{uc} = \frac{X_{u\Omega} \times L_c}{1000 \times N_{cp}} \times k \text{ (pu)} \quad (114)$$

Em que:

X_{uc} – Reatância do circuito;

L_c – Comprimento total do condutor;

$X_{u\Omega}$ – Reatância do condutor;

N_{cp} – Número de condutor por fase;

5.5.4 Corrente de curto-circuito

Após o cálculo das impedâncias é possível determinar as correntes de acordo com as equações a seguir.

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \quad (115)$$

Em que:

I_b – Corrente de base;

P_b – Potência de base;

V_b – Tensão de base;

Corrente de curto-circuito trifásico simétrico no ponto de entrega.

$$I_{cs} = \frac{I_b}{Z_{us}} \quad (116)$$

Estabelecendo uma nova corrente de base para calcular a corrente de curto-circuito no secundário do transformador.

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} \times V_b} \quad (117)$$

Corrente de curto-circuito trifásico simétrico no secundário do transformador.

$$I_{cs} = \frac{I_b}{Z_{us} + Z_{ut}} \quad (118)$$

Para determinar a corrente de curto circuito dos circuitos utiliza-se as seguintes equações para realizar os cálculos.

$$I_b = \frac{P_b}{\sqrt{3} x V_b} \quad (119)$$

Em que:

I_b – Corrente de base;

P_b – Potência de base;

V_b – Tensão de base;

$$I_{cs} = \frac{P_b}{\sum Z_u} \quad (120)$$

Em que:

I_{cs} – Corrente de curto circuito simétrica;

P_b – Potência de base;

$\sum Z_u$ – Somatório das impedâncias até o circuito;

Corrente de curto circuito simétrica I_{ca} .

$$I_{ca} = F_a \times \frac{I_{cs}}{1000} (KA) \quad (121)$$

Em que:

I_{cs} – Corrente de curto circuito simétrica;

F_a – Fator de assimetria;

O fator de assimetria pode ser obtido através da equação 00. Como a resistência e reatância devem ser conhecidos, assim com a relação $\frac{X}{R}$ e um tempo definido pode-se calcular F_a , utilizando a tabela 2.

$$F_a = \sqrt{1 + 2e^{-(2t/C_t)}} \quad (122)$$

$$C_t = \frac{X}{377 \cdot R} \quad (123)$$

Tabela 2: Fator de assimetria

Fator de assimetria — F para t = 1/4 ciclo

Relação X/R	Fator de Assimetria	Relação X/R	Fator de Assimetria	Relação X/R	Fator de Assimetria
	F		F		F
0,40	1,00	3,80	1,37	11,00	1,58
0,60	1,00	4,00	1,38	12,00	1,59
0,80	1,02	4,20	1,39	13,00	1,60
1,00	1,04	4,40	1,40	14,00	1,61
1,20	1,07	4,60	1,41	15,00	1,62
1,40	1,10	4,80	1,42	20,00	1,64
1,60	1,13	5,00	1,43	30,00	1,67
1,80	1,16	5,50	1,46	40,00	1,68
2,00	1,19	6,00	1,47	50,00	1,69
2,20	1,21	6,50	1,49	60,00	1,70
2,40	1,24	7,00	1,51	70,00	1,71
2,60	1,26	7,50	1,52	80,00	1,71
2,80	1,28	8,00	1,53	100,00	1,71
3,00	1,30	8,50	1,54	200,00	1,72
3,20	1,32	9,00	1,55	400,00	1,72
3,40	1,34	9,50	1,56	600,00	1,73
3,60	1,35	10,00	1,57	1.000,00	1,73

Fonte: Mamede Filho, 2012

Impulso da corrente de curto circuito I_{cm} .

$$I_{cm} = \sqrt{2} \times I_{ca} \text{ (KA)} \quad (124)$$

Em que:

 I_{ca} – Corrente de curto circuito simétrica;Corrente bifásica de curto circuitos I_{cb} .

$$I_{cb} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{I_{cs}}{1000} \text{ (KA)} \quad (125)$$

Em que:

;
 I_{cs} – Corrente de curto circuito simétrica;

Para estabelecer a corrente de curto circuito fase terra calcula-se as Impedância dos circuitos de sequência zero, apenas do cabo e do transformador que é a mesma da sequência positiva.

$$I_{cftma} = \frac{3 \times I_b}{(2 \times Z_{utot} + Z_{ut} + \sum Z_{u0c}) \times 1000 \text{ (KA)}} \quad (126)$$

Em que:

I_{cftma} – Corrente de curto circuito fase terra máxima;
 I_b – Corrente de base;
 Z_{utot} – Impedância total da instalação;
 Z_{ut} – Impedância do transformador;
 $\sum Z_{u0c}$ – Somatório das impedâncias de sequência 0 até o circuito;

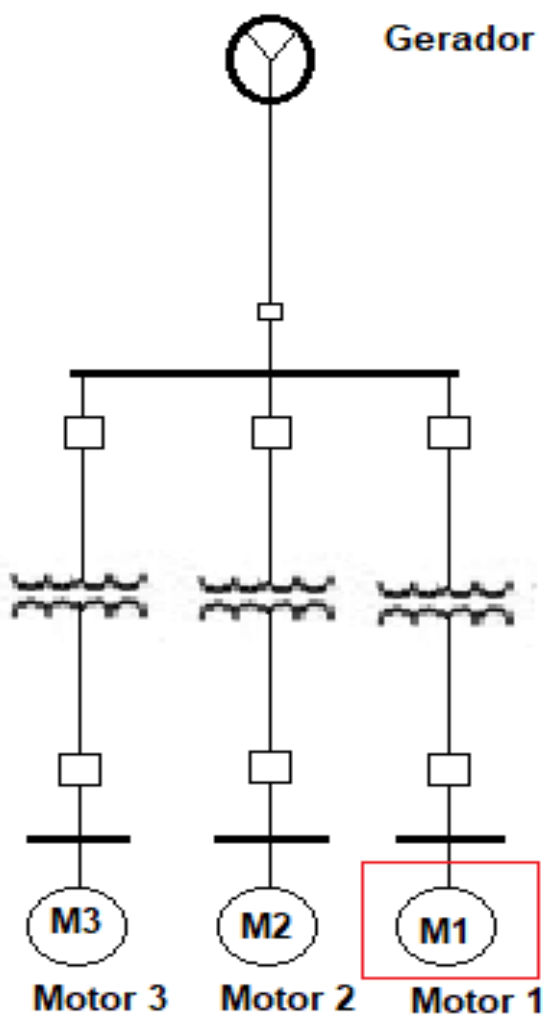
Em ocorrência de uma falha os motores de indução com tensões de 220V, 380V, 440V de pequeno porte, tem pouca influência. Já os motores de grande porte com tensões acima de 600V, provoca um aumento de vinte e cinco por cento na tensão nominal e nas potências de base (MAMEDE FILHO, 2012).

6 INFLUÊNCIA DO MOTOR PARA ELEVAÇÃO CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO - SIMULAÇÃO

De acordo com o demonstrado nos capítulos anteriores, o motor de indução trifásico pode contribuir para a elevação da corrente de curto-circuito no ponto de falta.

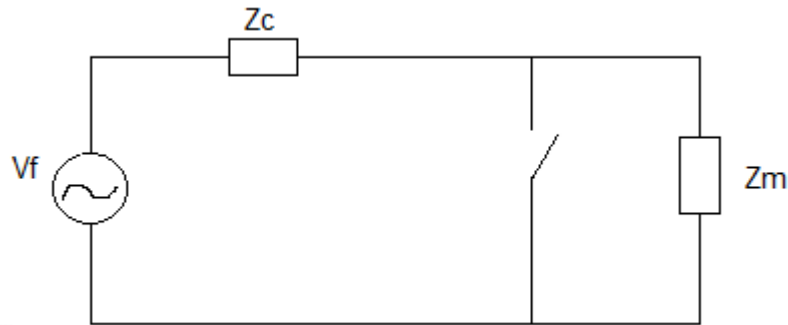
Considerando como base o diagrama unifilar ilustrado na figura 29, que apresenta parte de um circuito que será utilizado para calcular a corrente de falta. Nesta parte temos, um motor de indução rotor gaiola de esquilo de 90 KW (125 HP), tensão $V_f = 440\angle 0^\circ$, cabos com impedância $Z_c = 0,00079 + j0,00065$ e o motor com impedância $Z_m = 0,0803 + j1,16$, representado em um circuito equivalente na figura 30.

Figura 29: Diagrama unifilar



Fonte: Próprio autor

Figura 30: Circuito equivalente



Fonte: Próprio autor

A realização do cálculo da contribuição do motor para a corrente de falta será de acordo com os passos a seguir.

Primeiramente assume-se a tensão da fonte no domínio do tempo, valores da impedância $Z_c = R_c + jX_c$ e valores da impedância $Z_m = R_c + jX_c$ calculado através dos valores da folha de dados no Anexo A. O sistema possui uma frequência (f) de 60 Hertz.

$$V_f = 440\angle 0^\circ V \rightarrow V_f = 440 + j0 V$$

$$Z_m = Z_{rotor} // Z_{núcleo} + Z_{estator} \Omega$$

$$Z_m = \frac{(0,0288 + j0,7487) \times (473,8018 + j12,0564)}{(0,0288 + j0,7487) + (473,8018 + j12,0564)} + 0,0503 + j0,4137$$

$$Z_m = 0,0803 + j1,16 \Omega \rightarrow Z_m = 1,16\angle 86^\circ \Omega$$

$$Z_c = 0,00079 + j0,00065 \Omega \rightarrow Z_c = 0,00102\angle 39,45^\circ \Omega$$

Dessa forma, o valor da resistência e reatância total pode ser obtida:

$$Z_t = Z_c + Z_m \rightarrow Z_t = (R_c + R_m) + (jX_c + jX_m) \Omega$$

$$Z_t = 0,09079 + j2,33365 \Omega \rightarrow Z_t = 1,16\angle 86^\circ \Omega$$

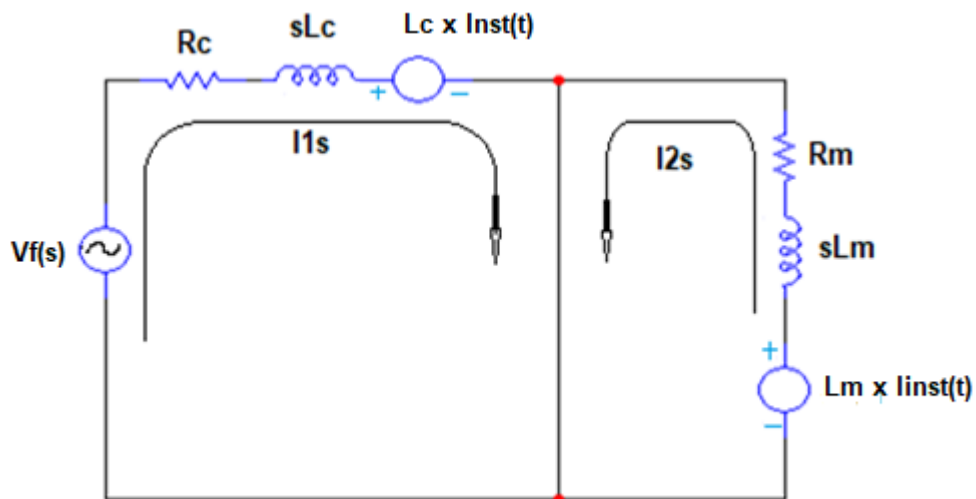
A corrente em regime permanente é determinada através:

$$I_{rp} = \frac{V_f}{Z_t} \rightarrow I_{rp} = \frac{440 \angle 0^\circ}{1,16 \angle 86^\circ}$$

$$I_{rp} = 26,479 - j378,38 \text{ A} \rightarrow I_{rp} = 379,31 \angle -86^\circ \text{ A}$$

Após a determinação da corrente em regime permanente no domínio do tempo, foi aplicado a transformada de Laplace utilizando como referência o circuito no domínio da frequência, como mostra a figura 31.

Figura 31: Circuito no domínio da frequência



Fonte: Próprio autor

Determinando o tempo de ocorrência da falha (interruptor fecha) em $t = 0,5 \times 1/60 \text{ s}$, a corrente no instante do curto-circuito é determinada através:

$$I_{inst} = I_{rp} \text{sen}(\omega t + \varphi_{I_{rp}})$$

$$I_{inst} = 379,31 \text{sen}(376,99 \times 0,5 \times 1/60 - 1,5010)$$

$$I_{inst} = 378,38 \text{ A}$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f \rightarrow \omega = 376,99 \text{ rad/s}$$

Cálculo das correntes devido às condições iniciais (energia armazenada nos indutores).

Corrente I_{1s} :

$$I_{1s} = \frac{V_f}{((s \times L_c) + R_c)} - \frac{(L_c \times I_{inst})}{((s \times L_c) + R_c)}$$

$$I_{1s} = \frac{440}{((s \times 1,72 \times 10^{-6}) + 0,00079)} - \frac{1,72 \times 10^{-6} \times 378,38}{((s \times 1,72 \times 10^{-6}) + 0,00079)}$$

Dividindo por $1,72 \times 10^{-6}$

$$I_{1s} = \frac{255813953,488}{(s + 459,30)} - \frac{378,38}{(s + 459,30)}$$

$$I_{1s} = 255813953,488 \times \frac{1}{s + 459,30} - 378,38 \times \frac{1}{s + 459,30} \text{ A}$$

Corrente I_{2s} :

$$I_{2s} = \frac{(L_m \times I_{inst})}{((s \times L_m) + R_m)}$$

$$I_{2s} = \frac{(3,07 \times 10^{-3} \times 378,38)}{((s \times 3,07 \times 10^{-3}) + 0,0803)}$$

$$I_{2s} = \frac{1,16}{0,0803 + (s \times 3,07 \times 10^{-3})} \rightarrow \text{Dividindo por } 3,07 \times 10^{-3}$$

$$I_{2s} = \frac{378,38}{s + 26,15} \rightarrow I_{2s} = 378,38 \times \frac{1}{s + 26,15} \text{ A}$$

Os parâmetros L_c e L_m são calculados:

$$L_c = \frac{X_c}{\omega} \rightarrow L_c = \frac{0,00065}{376,99} \rightarrow L_c = 1,72 \times 10^{-6} \text{ H}$$

$$L_m = \frac{X_m}{\omega} \rightarrow L_m = \frac{1,16}{376,99} \rightarrow L_m = 3,07 \times 10^{-3} \text{ H}$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace temos a corrente em um tempo $t = 0,5 \times 1/60 \text{ s}$ e $t = 1/60 \text{ s}$.

Corrente $t = 0,5 \times 1/60$.

$$I_{1t} = 255813953,488 \times \frac{1}{s + 459,30} - 378,38 \times \frac{1}{s + 459,30}$$

$$I_{1t} = 255813953,488e^{-459,3t} - 378,38 \times e^{-459,3t} \rightarrow I_{1t} = 5567515,79A$$

$$I_{2t} = 378,38 \times \frac{1}{s + 26,15} \rightarrow I_{2t} = 378,38 \times e^{-26,15t} \rightarrow I_{2t} = 304,29 A$$

Corrente total no ponto de falta em $t = 0,5 \times 1/60 \text{ s}$.

$$I_{total} = I_{1t} + I_{2t} \rightarrow I_{total} = 5567820,08 A$$

Corrente $t = 1/60$.

$$I_{1t} = 255813953,488e^{-459,3t} - 378,38 \times e^{-459,3t} \rightarrow I_{1t} = 121171,1775 A$$

$$I_{2t} = 378,38 \times \frac{1}{s + 26,15} \rightarrow I_{2t} = 378,38 \times e^{-26,15t} \rightarrow I_{2t} = 244,70 A$$

Corrente total no ponto de falta em $t = 0,5 \times 1/60 \text{ s}$.

$$I_{total} = I_{1t} + I_{2t} \rightarrow I_{total} = 121415,8775 A$$

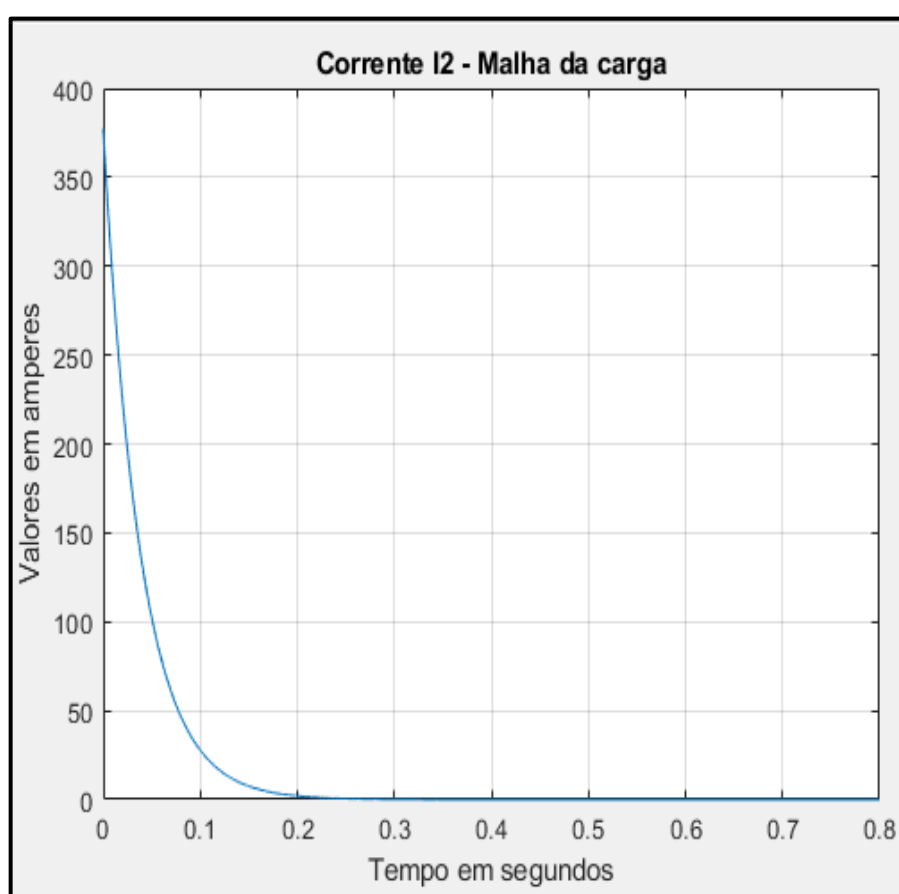
6.1 Simulação

Tomando como exemplo o circuito equivalente da figura 30 e a sequência de cálculos apresentados nesse capítulo, foram realizadas simulações que permitem interpretar e entender o comportamento do motor de indução na ocorrência de um

curto-circuito. As simulações foram realizadas pelo software Matlab, de acordo com algoritmo do Apêndice A, obedecendo a sequência de cálculo apresentada anteriormente neste capítulo.

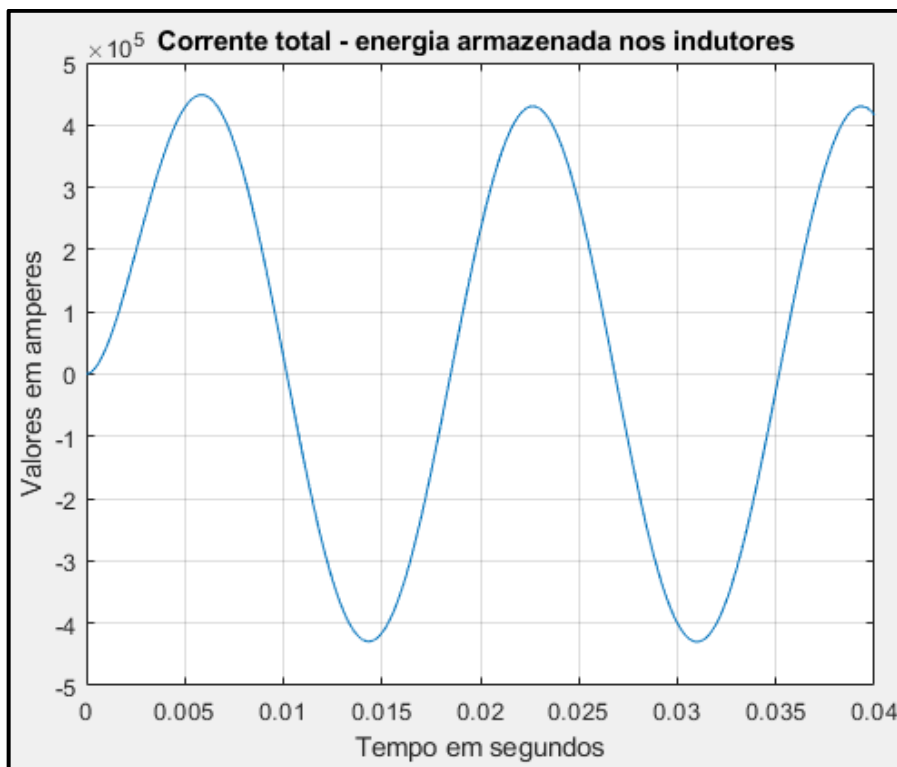
O gráfico 1 mostra o valor da corrente de curto-circuito no ponto de ocorrência da falta, após o interruptor fechar em $t = 0,5 \times 1/60$, devido à energia armazenada nos indutores. Conforme pode ser observado, depois de 0,2 segundos não há mais corrente fornecidas pelo motor.

Gráfico 1: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 0,5 \times 1/60$



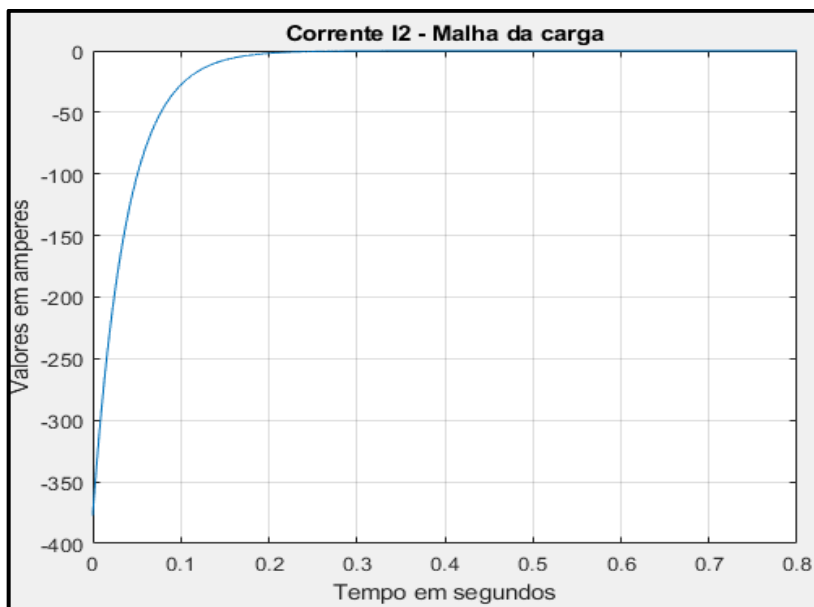
Fonte: Próprio autor

O gráfico 2 demonstra a corrente total no ponto de falha, percebe-se que inicialmente tem-se um pico de corrente e um decaimento ao longo do tempo. A energia armazenada nos indutores do motor mostrada no gráfico 1, contribui com um percentual para este pico de corrente.

Gráfico 2: Corrente total no ponto de falta em $t = 0,5 \times 1/60$ 

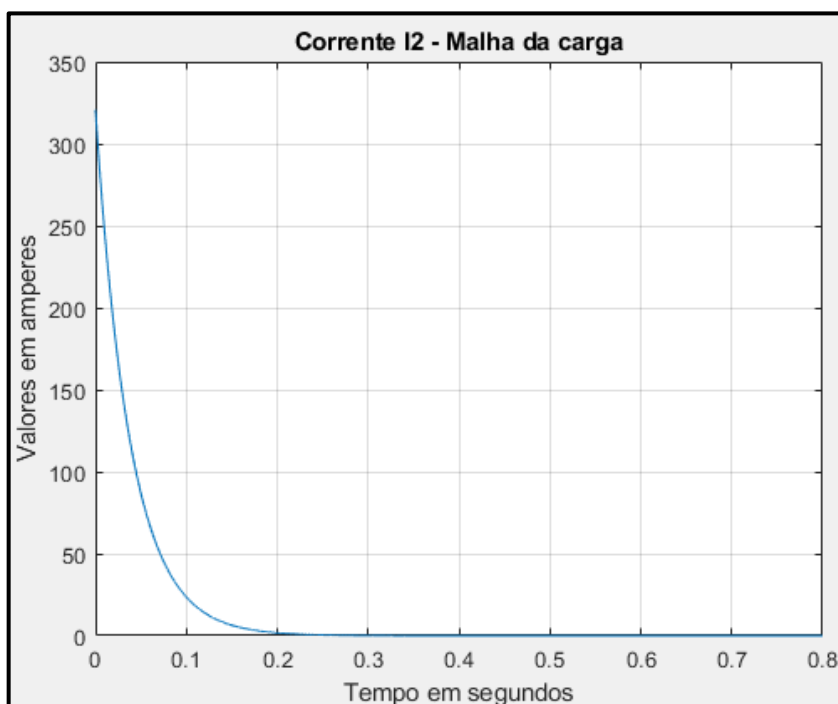
Fonte: Próprio autor

No gráfico 3 foi simulada a contribuição do motor com a ocorrência da falta em $t = 1/60$. Como ilustrado no gráfico 1, essa corrente da falta é devido a energia do motor (armazenada nos indutores), além disso, após 0,2 segundos não se tem mais contribuição da máquina. Percebe-se também no gráfico 2 que os valores da corrente estão com sinais negativo, este sinal, mostra que no momento da falta a onda senoidal está passando abaixo de zero.

Gráfico 3: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 1/60$ 

Fonte: Próprio autor

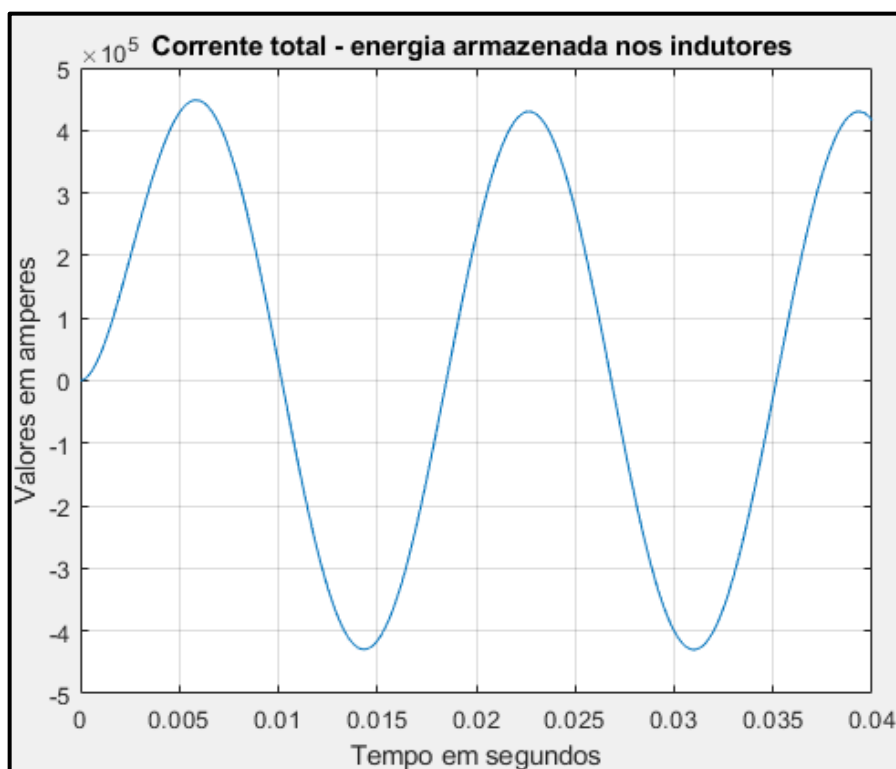
Já no gráfico 4 foi realizado a simulação em um tempo $t = 0,04$ s, em que, pode-se observar que a energia armazenada no campo magnético no motor será igual a 0 em $t = 0,2$ s.

Gráfico 4: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 0,04$ 

Fonte: Próprio autor

O gráfico 5 demonstra a corrente total no ponto de falta, onde tem-se um pico inicial e um amortecimento ao longo do tempo. Este pico de corrente carrega uma parcela da contribuição do motor até $t = 0,2s$.

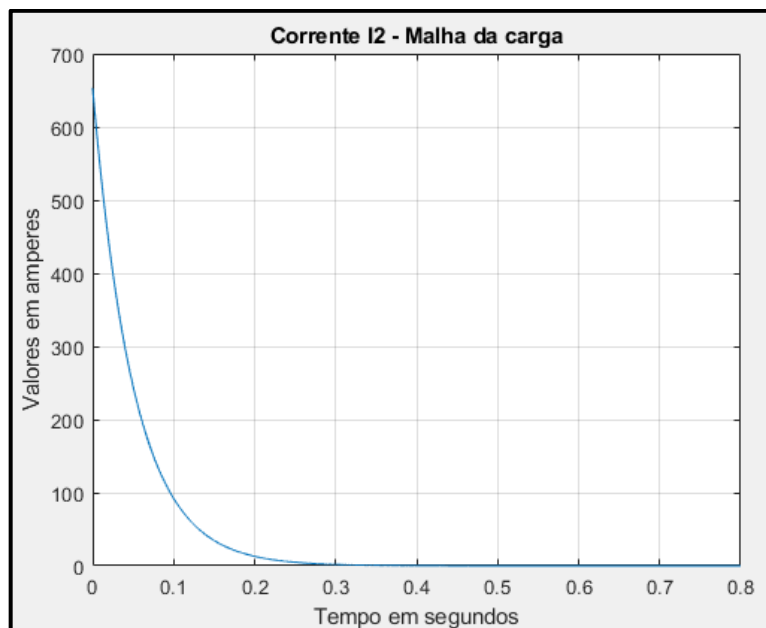
Gráfico 5: Corrente total no ponto de falta em $t = 0,04$



Fonte: Próprio autor

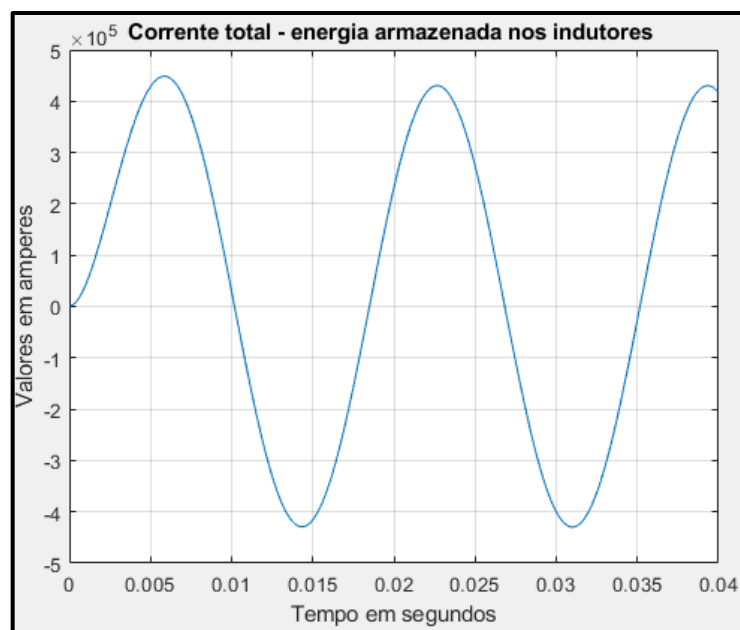
Levando em consideração o exemplo do circuito equivalente da figura 30 e a sequência de cálculos apresentadas, realizou-se outra simulação. Nesta simulação, foi utilizado um motor de indução rotor gaiola de esquilo de 185 KW (250 HP), e com impedância $Z_m = 0,03486 + j0,671$ ilustrado no Anexo B. Mantiveram-se os mesmos valores de tensão e impedância dos cabos da simulação anterior.

No gráfico 6 o interruptor ilustrado na figura 30 fecha em $t = 0,5 \times 1/60$. Pode-se notar que com um motor de maior potência, há uma contribuição maior no valor da corrente de falta e, um maior tempo para a energia armazenada nos indutores chegar a zero.

Gráfico 6: Contribuição do motor para elevação da corrente em $t = 0,5 \times 1/60$ 

Fonte: Próprio autor

O gráfico 7 mostra a corrente total no ponto de curto circuito, em que se observa no momento inicial da falta um pico de corrente que possui uma parcela aproximadamente 650 amperes de contribuição do motor no ponto de falta. Essa corrente diminui exponencialmente e até $t = 0,3$ s, a partir deste instante não haverá contribuição do motor de indução para a corrente no ponto de falha.

Gráfico 7: Corrente total no ponto de falta em $t = 0,5 \times 1/60$ 

Fonte: Próprio autor

7 CONCLUSÕES

A ocorrência de um curto circuito em um sistema elétrico industrial é algo extremamente indesejado. Durante uma falta podem ocorrer diversas condições danosas que podem colocar em risco a vida de pessoas além de causar destruição nas estruturas da indústria, perda de produtividade e prejuízos financeiros.

Este trabalho teve como principal objetivo demonstrar, através de uma revisão bibliográfica explicativa, a importância do estudo de curto circuito para as instalações elétricas industriais. Especificamente, procurou-se: mostrar a contribuição dos motores de indução para a elevação da corrente durante um curto circuito; demonstrar metodologias utilizadas para o cálculo das correntes de curto circuito com ênfase nas normas internacionais da IEC e ANSI; e realizar o cálculo e a simulação da contribuição de um motor de indução através do software MATLAB.

Após a realização deste trabalho, pode-se observar que quando da ocorrência de uma falta nos terminais do gerador síncrono haverá uma grande mudança na topologia da máquina. Ocorrerá uma grande elevação na corrente de armadura, a impedância vista pelo gerador cai drasticamente e haverá uma grande variação no fluxo magnético do equipamento. Em consequência, o gerador injeta uma corrente de curto circuito elevada no sistema e esta corrente é dividida em transitórios e seu valor dependerá da tensão induzida nos enrolamentos e da reatância presente em cada período.

Quando avaliados os motores assíncronos, pode-se notar que, na ocorrência de um curto-circuito trifásico no circuito de alimentação de um motor de indução, a tensão no ponto de falta diminui tendendo a zero. O fluxo no rotor não decai até zero no mesmo momento, devido à energia armazenada no campo magnético nas bobinas do rotor. Enquanto houver energia armazenada no campo magnético do indutor, que se comportará como uma fonte de corrente, juntamente com a velocidade do eixo do rotor. Dependendo do nível de corrente liberado pelo indutor, esta pode contribuir ou não para o aumento da corrente de falta.

Através das metodologias de cálculo da corrente de curto-circuito apresentadas foram realizados os cálculos e simulações em que pode-se notar que o motor de indução rotor gaiola de esquilo contribui para o aumento da corrente no ponto de falta, enquanto houver energia armazenada em seu campo magnético. Além disso,

observa-se que quanto maior a potência da máquina, maior será a corrente no ponto de curto circuito.

7.1 Propostas para trabalhos futuras

Analisar as demais cargas nas instalações industriais, mostrando o seu comportamento durante o curto-circuito e especificação do sistema de proteção.

REFERÊNCIAS

BIM, Edson. Máquinas elétricas e acionamento. Elsevier, 2012.

BREAKERS, *AC High Voltage Generator Circuit. Rated on a Symmetrical Current Basis*. IEEE Standard C, v. 37, 2016.

CHAPMAN, Stephen J. *Fundamentos de máquinas elétricas*: 5.ed. AMGH Editora, 2013.

CLÁUDIO MODERGAN. Fontes de curto-circuito. In: CLÁUDIO MODERGAN. *Curto-circuito para a seletividade*: Edição 130, 2016. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed-130-CapXI-Fasc%C3%ADculo_Curto-circuito%20para%20a%20seletividade.pdf>. Acesso em: 20 abril. 2019.

DOS SANTOS, Vanessa Malaco. *ESTUDO DE CASO DE CURTOCIRCUITO EM UM SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL*. 2009.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. *Cenários de Demanda para o PNE 2050, Relatório Parcial*, dezembro de 2018.
FIRJAN. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. *Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil, Estudo para o desenvolvimento do rio de janeiro*, Nº 8, Agosto de 2011.

GRIGOLETTO, Fernando Antônio. *Análise comparativa entre as metodologias ANSI e IEC para o cálculo de curto-circuito em sistemas industriais*. 2013.

GUEDES, Manuel Vaz. *O Motor de Indução Trifásico*. DEEC, FEUP, 1994.

HUENING, Walter C. *Calculating short-circuit currents with contributions from induction motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, n. 2, p. 85-92, 1982.

IEEE Std 551™-2006 IEEE *Recommended Practice for Calculating Short-Circuit Currents in Industrial and Commercial Power Systems* – Violet Book

IEC 60909-0 *Short-circuit Currents in Threephase A.C. Systems* - Part 0, First edition 2001-07

INTERNATIONAL STANDART. Copyright © 2016 IEC 60909, 2016. Genebra, Suíça, 2016. E-book

KINDERMANN, Geraldo. *Curto-circuito*. 2ª Edição. Porto Alegre-RS: SAGRA LUZZATTO, 1997.

MALJKOVIC, Zlatko; CETTOLO, Mirko; PAVLICA, Milutin. *The impact of the induction motor on short-circuit current*. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 7, n. 4, p. 11-17, 2001.

MALJKOVIC, Z.; CETTOLO, Mirko; PAVLICA, Milutin. *Induction motor's contribution to short circuit current*. In: *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. IEMDC'99. Proceedings (Cat. No. 99EX272). IEEE, 1999. p. 354-356.

MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. 8ª Edição. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2012.

MOTA, I. L. et al. *Impactos da Contribuição de Curto-Circuito da Máquina de Indução em Instalações Elétricas*, 2014.


RODRIGUES, T. G. *Análise de curto circuito em um gerador síncrono de pólos salientes pelo método dos elementos finitos*. 2013. 82p. dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SATO, Fujio; FREITAS, Waldir. *Análise de Curto-Circuito e Princípios de Proteção Em Sistemas de Energia Elétrica-Fundamentos e Prática*. Rio de Janeiro: Campus, 2015.

UMANS, Stephen D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. AMGH Editora, 2014.

ANEXO A – FOLHA DE DADOS MOTOR DE INDUÇÃO 90 KW

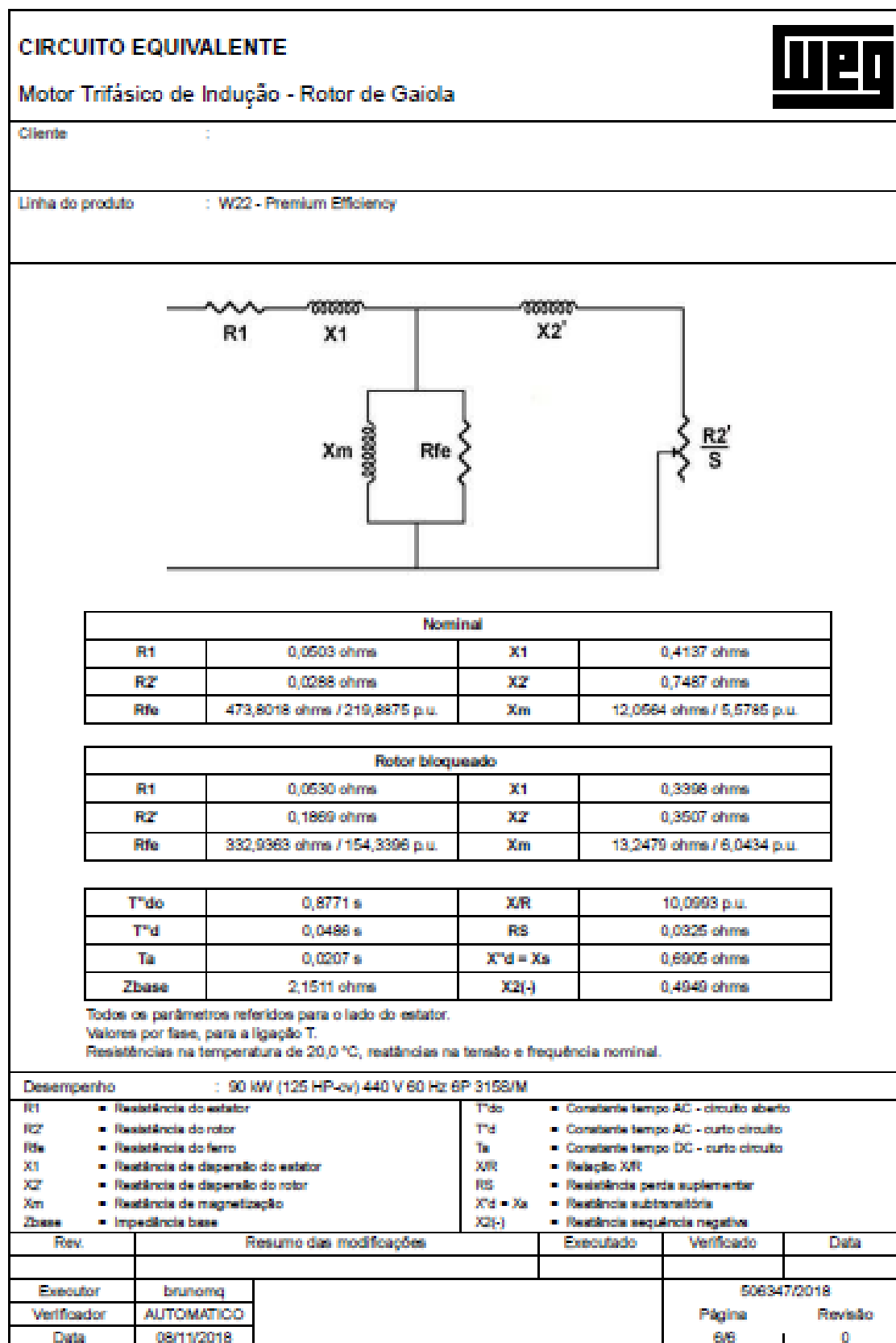
Figura 32: Folha de dados motor 90 KW

FOLHA DE DADOS					
Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola					
Cliente :					
Linha do produto : W22 - Premium Efficiency					
Carcaça : 3158/M	Tempo de rotor bloqueado : 38 s (quente) 68 s (frio)	Potência : 90 kW (125 HP-cv)	Elevação de temperatura ¹ : 80 K		
Número de polos : 6	Regime de serviço : S1	Frequência : 60 Hz	Temperatura ambiente : -20 °C a +40 °C		
Tensão nominal : 440 V	Altitude : 1000 m	Corrente nominal : 149 A	Grau de proteção : IPW55		
Corrente de partida : 1013 A	Método de refrigeração : IC411 - TEFC	Ip/In (p.u.) : 6,8	Forma construtiva : B3D		
Corrente a vazio : 64,0 A	Sentido de rotação ¹ : Ambos	Rotação nominal : 1190 rpm	Nível de ruído ² : 70,0 dB(A)		
Escorregamento : 0,83 %	Classe de vibração : B	Conjugado nominal : 73,7 kgfm	Método de partida : Partida direta		
Conjugado de partida : 210 %	Acoplamento : Direto	Conjugado mínimo : 195 %	Massa aproximada ³ : 957 kg		
Conjugado máximo : 240 %	Piano de pintura : 212P	Classe do isolamento : H	Cor : MUNSSELL 10 YR 7/12		
Fator de serviço : 1,15	Categoria : N	Momento de inércia (J) : 5,08 kgm ²			
Potência	Partida	50%	75%	100%	Tipo de carga acionada: - Conjugado da carga: - Inércia da carga (J=GDPM): -
Rendimento (%)	-	94,3	96,0	96,3	
Fator de potência	0,34	0,88	0,79	0,83	
		<u>Dianteiro</u>	<u>Traseiro</u>		Esforços na fundação Tração máxima : 914 kgf Compressão máxima : 1871 kgf
Tipo de mancal		6316-C3	6316-C3		
Intervalo de lubrificação		13000 h	16000 h		
Quantidade de lubrificante		45 g	34 g		
Tipo de lubrificante		MOBIL POLYREX EM			
Notas:					
Normas	Especificação	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1		Vibração	: IEC 60034-14
	Ensaio	: IEC 60034-2 / ABNT NBR 17094-3		Tolerância	: IEC 60034-1 / ABNT NBR 17094-1
	Ruído	: IEC 60034-9			
Esta revisão substitui e cancela a anterior, a qual deverá ser eliminada.			Os valores indicados são valores médios com base em ensaios e para alimentação em rede senoidal, sujeitos as tolerâncias das norma ABNT-NBR 17094-1.		
(1) Olhando a ponte de eixo dianteira do motor.					
(2) Medido a 1m e com tolerância de +3dB(A).					
(3) Massa aproximada sujeito a alteração após fabricação.					
(4) Em 100% de carga nominal.					
Rev.	Resumo das modificações		Executado	Verificado	Data
Executor	brunomq		506347/2018		
Verificador	AUTOMATICO		Página	Revisão	
Data	08/11/2018		1/6	0	

Propriedade de WEG S/A. Proibida a reprodução sem autorização prévia.


Fonte: Desconhecida

Figura 33: Circuito equivalente motor 90 KW



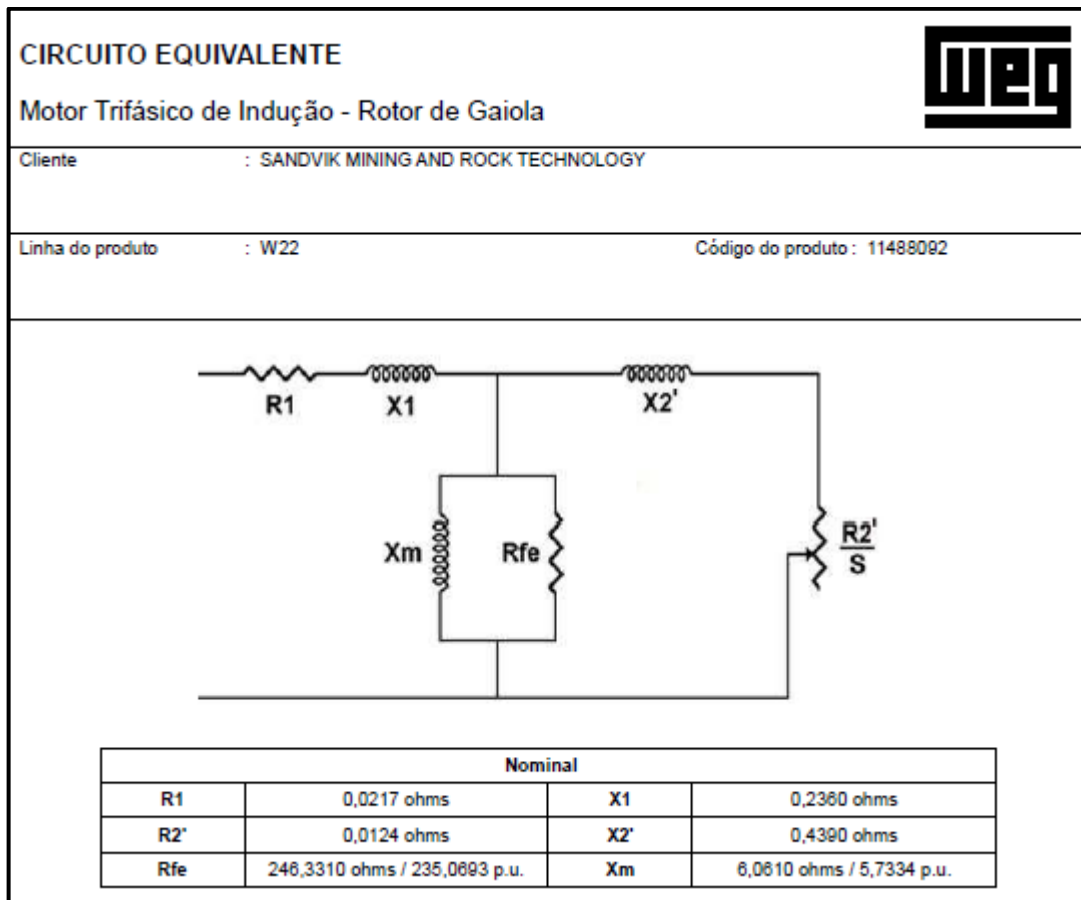
ANEXO B – FOLHA DE DADOS MOTOR DE INDUÇÃO 185 KW

Figura 34: Folha de dados motor 185 KW

FOLHA DE DADOS					
Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola					
Cliente : SANDVIK MINING AND ROCK TECHNOLOGY					
Linha do produto : W22			Código do produto : 11488092		
Carcaça	: 355M/L			Tempo de rotor bloqueado	: 30 s (quente) 54 s (frio)
Potência	: 185 kW (250 HP-cv)			Elevação de temperatura ⁴	: 80 K
Número de polos	: 6			Regime de serviço	: S1
Frequência	: 60 Hz			Temperatura ambiente	: -20 °C a +40 °C
Tensão nominal	: 220/380/440 V			Altitude	: 1000 m
Corrente nominal	: 628/384/314 A			Grau de proteção	: IPW55
Corrente de partida	: 3894/2254/1947 A			Método de refrigeração	: IC411 - TFVE
Ip/In (p.u.)	: 6,2			Forma construtiva	: B3E
Corrente a vazio	: 240/139/120 A			Sentido de rotação ⁴	: Ambos
Rotação nominal	: 1190 rpm			Nível de ruído ⁵	: 77,0 dB(A)
Escorregamento	: 0,83 %			Método de partida	: Partida direta
Conjugado nominal	: 151 kgfm			Massa aproximada ⁶	: 1455 kg
Conjugado de partida	: 200 %			Categoria	: H
Conjugado mínimo	: 170 %				
Conjugado máximo	: 210 %				
Classe do isolamento	: F				
Fator de serviço	: 1,15				
Momento de inércia (J)	: 9,53 kgm ²				
Potência	Partida	50%	75%	100%	Tipo de carga acionada: -
Rendimento (%)	-	95,0	95,4	95,5	Conjugado da carga: -
Fator de potência	0,33	0,69	0,78	0,81	Inércia da carga (J=GD ² /4): -
	<u>Dianteiro</u>	<u>Traseiro</u>			
Tipo de mancal	NU-322-C3	6319-C3	Esforços na fundação		
Intervalo de lubrificação	7000 h	13000 h	Tração máxima : 1358 kgf		
Quantidade de lubrificante	60 g	45 g	Compressão máxima : 2813 kgf		
Tipo de lubrificante	MOBIL POLYREX EM				
Notas:					
TAG:00-960-052-033A					
O nível de vibração e ruído informados são válidos quando o motor está operando com rolamentos de rolos respeitando sua carga radial mínima. Portanto, a WEG reserva-se o direito de testar o motor com rolamentos de esferas.					

Fonte: Desconhecida

Figura 35: Circuito equivalente motor 185 KW



Fonte: Desconhecida

APÊNDICE A – ALGORÍTIMO

```

close all;
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CÓDIGO SIMULAÇÃO CURTO CIRCUITO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Declaração variáveis simbólicas para simulação
syms s t;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DECLARAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ModuloVth = 440;
AnguloVth = 0; % radianos
Rth = 0.00079;
Xth = 0.00065;
Rc = 0.0803;
Xc = 1.16;
F = 60;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CÁLCULOS INICIAIS - PARÂMETROS IMPORTANTES E CORRENTE NO INSTANTE DO
% CURTO CIRCUITO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
W = 2 * pi * F;
Lth = Xth / W;
disp('Indutancia de thevanin');
disp(Lth);
Lc = Xc / W;
disp('Indutancia da carga ');
disp(Lc);
% Cálculo iimpedância do circuito
Rtotal = Rth + Rc;
Xtotal = Xth + Xc;
ModuloZtotal = sqrt(Rtotal^2 + Xtotal^2);
AnguloZtotal = atan(Xtotal / Rtotal);
disp('Impedancia total');
disp(ModuloZtotal);
disp(AnguloZtotal);

ModuloI = ModuloVth / ModuloZtotal;
AnguloI = AnguloVth - AnguloZtotal;
disp('Corrente em regime permanente');
disp(ModuloI);
disp(AnguloI);

% Especificação do instante de ocorrência do curto circuito
T0 = 0.5 * 1/60;
% Cálculo da corrente no circuito no instante do curto circuito
I0 = ModuloI * sin(W * T0 + AnguloI);
disp('Corrente no instante do curto circuito');
disp(I0);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROCESSO DE SIMULAÇÃO - COMPORTAMENTO CORRENTE NO CURTO
% Correntes devido às energias armazenadas nos componentes
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cálculo de correntes devido às condições iniciais (energia armazenada nos
% indutores
I1s_CondInicial = (Lth * I0) / ((s * Lth) + Rth);
I2s_CondInicial = (Lc * I0) / ((s * Lc) + Rc);

```

```

% Aplicação da transformada inversa de Laplace
I1t_CondInicial = ilaplace(I1s_CondInicial);
I2t_CondInicial = ilaplace(I2s_CondInicial);
disp('CORRENTE I1t');
disp(I1t_CondInicial);
disp('CORRENTE I2t');
disp(I2t_CondInicial);
% A resposta do comando anterior é uma função no domínio do tempo,
% com 't' como variável.
% Para gerarmos gráficos, ao invés da função, precisamos de valores.
% Para obtermos os valores da função, primeiro informamos o intervalo de
% tempo de interesse:
Tempos = 0:0.0001:0.04;
T = 0:0.0001:0.8;
% Convertemos a função obtida pelo ilaplace em uma função padrão
% matlab, assim, criamos um manipulador para esta função:
Funcao_I1t_CondInicial = matlabFunction(I1t_CondInicial);
Funcao_I2t_CondInicial = matlabFunction(I2t_CondInicial);
% Agora podemos obter os valores de resposta no domínio do tempo:
Valores_Funcao_I1t_CondInicial = feval(Funcao_I1t_CondInicial, Tempos);
Valores_Funcao_I2t_CondInicial = feval(Funcao_I2t_CondInicial, T);
% Neste ponto já temos os valores das correntes, no domínio do tempo devido
% às condições iniciais
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
% PROCESSO DE SIMULAÇÃO - COMPORTAMENTO CORRENTE NO CURTO
% Correntes devido à fonte de alimentação
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
% Valores para a tensão de entrada
Vth = ModuloVth * sin(W * Tempos + AnguloVth);
% Definição da função de transferência da função
num = (1);
den = [Lth Rth];
I1s_FuncaoTransferencia = tf(num, den);
% Simulação do sistema para a entrada especificada
[Valores_I1tForcado, ~] = lsim(I1s_FuncaoTransferencia, Vth, Tempos);
% Neste ponto, já temos tudo que precisamos para gerar a resposta do
% sistema
% Gráfico da corrente I1
out = Valores_Funcao_I1t_CondInicial + Valores_I1tForcado';
figure(1);
plot(Tempos, out);
xlabel('Tempo em segundos');
ylabel('Valores');
title('Corrente total I1 - Malha da fonte de alimentação');
grid on;
% Gráfico da corrente I1 total
figure(2);
plot(Tempos, Valores_Funcao_I1t_CondInicial, Tempos,
Valores_I1tForcado', Tempos, out);
xlabel('Tempo em segundos');
ylabel('Valores em amperes');
legend('Componente condição inicial', 'Componente forçada', 'Corrente
total');
title('Componentes corrente I1 - Malha da fonte de alimentação');
grid on;
% Gráfico da corrente I2
figure(3);
plot(T, Valores_Funcao_I2t_CondInicial);
xlabel('Tempo em segundos');

```

```
ylabel('Valores em amperes');
title('Corrente I2 - Malha da carga');
grid on;
% Gráfico da corrente no ramo do curto circuito
Time = 0:0.0001:0.04;
Valores_Funcao_I1t_CondInic = feval(Funcao_I1t_CondInicial, Time);
Valores_Funcao_I2t_CondInic = feval(Funcao_I2t_CondInicial, Time);
Icurto = Valores_Funcao_I1t_CondInic + Valores_I1tForcado' +
Valores_Funcao_I2t_CondInic;
figure(4);
plot(Time, Icurto);
xlabel('Tempo em segundos');
ylabel('Valores em amperes');
title('Corrente total - energia armazenada nos indutores ');
grid on;
```