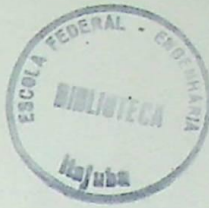


TESE

145



ESFORÇOS TERMOMECÂNICOS EM BARRAMENTOS
FLEXÍVEIS DE SUBESTAÇÕES DEVIDOS
A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Dissertação de Mestrado
Carlos Alberto da Silva

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Itajubá - MG
Março - 1977

AGRADECIMENTOS

O autor é agradecido:

às CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. - ELETROBRÁS e à
CENTRAIS ELÉTRICAS DE MINAS GERAIS S.A. - CEMIG

pelos recursos colocados à sua disposição no Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência e para a execução deste trabalho.

à Comissão Examinadora da EFEI pela análise e contribuição valiosa oferecida.

aos eng^{os} Marcos Afonso Nogueira Milagres e Paulo Sergio Azambuja Rocha pela colaboração e incentivo para que este trabalho fosse apresentado.

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinado, nomeado por Portaria nº 048 de 17 / 02 / 77, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Tese de Mestrado intitulada: "Esforços Termomecânicos em Barramentos Flexíveis de Subestações devidos a Correntes de Curto-Circuito"

apresenta pronunciamento no sentido de que a Comissão de Pós-Graduação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite à DDD (Divisão de Divulgação e Documentação) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica na Área de Concentração de Sistemas de Potência satisfeitas as demais exigências regimentais à _____

CARLOS ALBERTO DA SILVA

Itajubá, 07 de março de 1977

Amadeu Casal Caminha
1º Examinador
Prof. Amadeu Casal Caminha

Antonio Eduardo Hermeto
2º Examinador
Prof. Antonio Eduardo Hermeto

José Carlos Goulart Siqueira
3º Examinador - Presidente
Prof. José Carlos Goulart Siqueira

Ministério da Educação e Cultura
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBA

A N E X O II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Tese: "Esforços Termomecânicos em Barramentos Flexíveis de Subestações devidos a Correntes de Curto-Circuito"

Autor: CARLOS ALBERTO DA SILVA

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A	<i>Amadeu</i>
2º	A	<i>Antonio Eduardo</i>
3º	A	<i>Jose Carlos</i>

Resultado médio: Conceito A, ou seja aprovado

Observações:

Itajubá, 07 de março de 1977

Amadeu Casal Caminha
1º Examinador

Prof. Amadeu Casal Caminha

Antonio Eduardo Hermeto
2º Examinador

Prof. Antonio Eduardo Hermeto

Jose Carlos
3º Examinador - Presidente

Prof. José Carlos Goulart Siqueira

ÍNDICE

	Página
LISTA DE TABELAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
LISTA DE APÊNDICES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	IV
BIBLIOGRAFIA	67
1.0 - OBJETIVO	1
2.0 - INTRODUÇÃO	1
3.0 - DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS TÉRMICOS DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO EM BARRAMENTOS DE CABOS FLEXÍVEIS	1
3.1 - Considerações Gerais	1
3.2 - Descrição do Método	2
3.3 - Sequência de Cálculo	5
3.4 - Exemplos Numéricos	7
4.0 - DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS MECÂNICOS DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO EM CABOS DE BARRAMENTOS COM UM ÚNICO CONDUTOR POR FASE	9
4.1 - Considerações Gerais	9
4.2 - Descrição do Método	9
4.3 - Sequência de Cálculo	13
4.4 - Exemplos Numéricos	14
5.0 - DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS MECÂNICOS DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO EM CABOS DE BARRAMENTOS COM FEIXE DE CONDUTORES DISTRIBUIDOS SEGUNDO UM POLÍGONO REGULAR.	20
5.1 - Considerações Gerais	20
5.2 - Descrição do Método	20
5.3 - Sequência de Cálculo	27
5.4 - Exemplos Numéricos	30
5.5 - Cálculos efetivados através de programa digital de computador.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela "1" - Características dos cabos C.A.A.

51

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 - Fator χ	52
Figura 2 - Influência da componente de corrente alternada (n) e da componente de corrente contínua (m) na determinação da corrente efetiva média (I_{kef}), durante o estado transitório da corrente de curto-circuito, relativo a esforços térmicos	53
Figura 3 - Fator ψ	54
Figura 4 - Configuração parabólica entre espaçadores adjacentes de cabos geminados em regime de curto-circuito	55
Figura 5 - Esquema de forças estáticas atuantes em cabos condutores entre espaçadores adjacentes ao ocorrer o curto-circuito	55
Figura 6 - Esquema de forças estáticas atuantes em um espaçador isolado	55
Figura 7 - Configuração para determinação do aumento de comprimento do condutor entre dois espaçadores adjacentes (ΔS) e o coseno do ângulo θ	55

LISTAS DE APÊNDICES

Página

APÊNDICE I - Transformação Adiabática - Demonstração da Equação (7)	57
APÊNDICE II - Demonstração da Equação (42)	61
APÊNDICE III - Demonstração das Equações (47) e (48)	64

LISTAS DE SÍMBOLOS

REFERENTES AO ITEM 3

- I_s = corrente de curto-circuito assimétrica de pico.
 I_k = corrente de curto-circuito de estado permanente.
 I_k'' = corrente de curto-circuito simétrica inicial.
 V = tensão fase-fase nominal do Sistema.
 Z = impedância de sequência positiva reduzida no barramento.
 Z_0 = impedância de sequência zero reduzida no barramento.
 Z_T = impedância de terra.
 R = resistência de sequência positiva reduzida no barramento.
 X = reatância de sequência positiva reduzida no barramento.
 R_0 = resistência de sequência zero reduzida no barramento.
 X_0 = reatância de sequência zero reduzida no barramento.
 R_T = resistência de terra.
 X_T = reatância de terra.
 A = área da seção transversal do condutor.
 t = tempo de duração do curto-circuito.
 c = calor específico do condutor.
 γ = densidade ou massa específica do condutor.
 α = coeficiente de variação da resistividade com a temperatura em $^{\circ}\text{C}^{-1}$.
 T_i = temperatura do condutor.
 ρ_T = resistividade do condutor à temperatura T .
 I_{kef} = corrente de curto-circuito efetiva do ponto de vista de aquecimento.
 m = fator de influência da componente de corrente contínua da corrente de curto-circuito.
 n = Fator de influência da componente de corrente alternada da corrente de curto-circuito.

REFERENTES AO ITEM 4 *

- T = tensão mecânica a que fica sujeito o cabo nas condições de curto-circuito.

- T_0 = tensão de esticamento do cabo antes de iniciar o curto-circuito.
 F_m = força magnética devida à corrente de curto-circuito.
 m = peso do cabo por unidade de comprimento.
 ϕ = fator adimensional função de F_m e m .
 a = distância entre fases.
 L = distância entre os pontos de fixação dos cabos.
 s = valor característico de elasticidade (constante de mola) do sistema de fixação dos cabos.
 E = módulo de elasticidade do cabo condutor.
 ζ = fator adimensional função de m , L , T_0 , s , E , A .
 ψ = fator adimensional função ϕ e ζ .
 l = distância dos pontos de fixação do cabo de derivação.
 f = flecha da derivação.

REFERENTES AO ITEM 5 *

- L = comprimento da projeção sobre o eixo dos X, do trecho do cabo condutor que não entra em contacto com o cabo condutor oposto por ocasião do curto-circuito.
 b = distância mínima entre as linhas de centro dos cabos condutores durante as condições de curto-circuito.
 C = distância entre as linhas de centro dos cabos condutores para qualquer valor de x , quando os cabos condutores sofrem o deslocamento máximo em consequência do curto-circuito.
 p = foco da parábola.
 F_i = força magnética instantânea.
 i_1, i_2 = correntes instantâneas nos condutores 1 e 2.
 ω = frequência.
 I = valor de pico da componente simétrica da corrente de curto-circuito em cada um dos cabos condutores de uma fase.
 I_{rms} = valor eficaz da componente simétrica da corrente de curto-circuito em cada um dos cabos condutores.
 K = fator de esforço.

- FE = tração mecânica requerida para causar dilatação no cabo condutor.
- ΔS = aumento de comprimento do cabo condutor entre espaçadores adjacentes.
- S = distância entre dois espaçadores adjacentes.
- F_S = força de reação do espaçador.
- F_{me} = força magnética total exercida ao longo do cabo condutor entre dois espaçadores, concentrado no ponto médio.
- H = diâmetro do maior círculo circunscrito ao polígono regular formado pelos cabos condutores (no espaçador), em cm.
- λ_n = maior distância entre dois cabos condutores adjacentes (lado do polígono regular), no espaçador.
- n = número de cabos condutores por fase distribuídos segundo um polígono regular.
- b = diâmetro do menor círculo circunscrito ao polígono regular formado pelos cabos condutores de uma fase por ocasião do curto-circuito.
- d = menor distância entre dois cabos adjacentes (lado do polígono regular) - por ocasião do curto-circuito.

* os símbolos não relacionados neste item já o foram nos itens anteriores.

1.0 - OBJETIVO

É objetivo do presente trabalho, tendo em vista o aumento das correntes de curto-circuito em um sistema de energia elétrica, estabelecer critérios e normalizar uma sequência de cálculo para a determinação dos esforços térmicos e mecânicos a que ficam sujeitos os cabos condutores quando percorridos por essas correntes.

2.0 - INTRODUÇÃO

Os métodos de cálculo apresentados neste trabalho, abrangem os barramentos flexíveis com um único cabo condutor por fase e com mais de um cabo condutor por fase (feixe de condutores). Para o caso de mais de um cabo condutor por fase, o método foi desenvolvido para cabos geminados e em seguida generalizado para mais de dois subcondutores por fase distribuídos de modo que à vista de um corte transversal ao eixo destes, em qualquer ponto, mostre-os como vértices de um polígono regular cujos lados são as distâncias' entre eles.

Para maior facilidade de entendimento e utilização, o trabalho foi dividido da seguinte maneira:

- Determinação dos esforços térmicos, devidos a correntes de curto-circuito, em barramentos de cabos flexíveis.
- Determinação dos esforços mecânicos, devidos a correntes de curto-circuito, em barramentos com um único condutor por fase.
- Determinação dos esforços mecânicos, devidos a correntes de curto-circuito em barramentos com feixe de cabos condutores por fase, distribuídos - segundo um polígono regular.

3.0 - DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS TÉRMICOS DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO, - EM BARRAMENTOS DE CABOS FLEXÍVEIS.

3.1 - Considerações Gerais

O esforço térmico em cabos de barramentos depende da duração e da grandeza da corrente de curto-circuito.

Durante o tempo de curto-circuito a corrente varia desde um valor máximo - (corrente de curto-circuito assimétrica de pico I_s) até o valor de estado permanente I_k ; passando por um valor intermediário que é designado como corrente de curto-circuito simétrica inicial I_k'' .

O valor da corrente de curto-circuito simétrica inicial (I_k'') para os diversos tipos de curto-circuito pode ser determinada pelas equações:

$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot V}{\sqrt{3} Z} \text{ para curto-circuito trifásico} \quad (1)$$

$$I_k'' = \frac{1,1 \cdot V}{2Z} \text{ para curto-circuito fase-fase} \quad (2)$$

$$I_k'' = \frac{1,1\sqrt{3} \cdot V}{2Z + Z_0 + Z_T} \text{ para curto-circuito fase-terra} \quad (3)$$

sendo:

I_k'' é a corrente de curto-circuito simétrica inicial, em kA

V é a tensão fase-fase nominal do sistema, em kV

$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ (4) é a impedância de sequência positiva reduzida no barramento em Ω .

$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ (5) é a impedância de sequência zero reduzida no barramento em Ω .

$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$ (6) é a impedância de terra em Ω .

R é a resistência de sequência positiva reduzida no barramento, em Ω .

X é a reatância de sequência positiva reduzida no barramento, em Ω .

R_0 é a resistência de sequência zero reduzida no barramento, em Ω .

X_0 é a reatância de sequência zero reduzida no barramento, em Ω .

R_T é a resistência de terra, em Ω .

X_T é a reatância de terra, em Ω .

3.2 - Descrição do método

A determinação da área da seção do condutor capaz de suportar uma determinada condição de curto-circuito pode ser feita por meio de equação (7) demonstrada no Apêndice I

$$A = \frac{1000 I_{kef} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{4,184 \left(\frac{c \cdot \gamma}{\rho_{T1} \cdot \alpha} \right) \ln [1 + \alpha (T_{max} - T_1)]}} \quad (7)$$

onde:

A é a área da seção transversal do conjunto, em mm²;

t é o tempo de duração do curto-circuito em segundos;

c é o calor específico do condutor, em caloria / gr °C;

γ é a densidade ou massa específica do condutor, em gr/cm³;

α é o coeficiente de variação da resistividade com a temperatura em °C⁻¹

T₁ é a temperatura inicial do condutor, imediatamente antes de ocorrer o curto-circuito que, para o caso de cabos nus, com velocidade do vento' 0,61 m/s e temperatura ambiente 40°C, é considerada 70°C.

ρ_{T₁} é a resistividade do condutor na temperatura inicial T₁, em Ω x mm² /m.

Para determinar ρ_{T₁} basta utilizar a equação:

$$\rho_{T_1} = \rho_{20} \left[1 + \alpha(T_1 - 20) \right] \quad (8)$$

ρ₂₀ é a resistividade do condutor a 20°C, em Ω x mm²/m.

T_{max} é a temperatura máxima que pode atingir o condutor por ocasião do curto-circuito que pode ser considerada para cabos nus sujeitos a esforços - de tensão como:

170°C para os cabos de cobre nus (referência 1)

170°C para os cabos C.A.A. (referência 1)

I_{kef} é a corrente de curto-circuito efetiva do ponto de vista de aquecimento, em kA.

O valor de I_{kef} é determinado pela equação:

$$I_{kef} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad (9) \quad (\text{referência 1})$$

sendo:

I_k'' o maior dos valores de corrente de curto-circuito simétrica inicial, em kA, dados pela equação (1) ou (3), já que o dado pela equação (2) será sempre menor do que o dado pela equação (1).

m- o fator que determina a influência da componente da corrente contínua' da corrente de curto-circuito e que é obtido através do gráfico (a) da - fig. 2, entrando-se com o valor X e o tempo de duração do curto-circuito, t.

O valor de X é determinado através do gráfico da fig. 1, entrando-se com a relação entre a resistência e a reatância do caminho de curto-circuito. A relação R_{cc}/X_{cc} depende de qual das três equações, (1), (2) ou (3) deu o maior valor de I_k'' .

$$\frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \frac{R}{X} \quad (10) \quad \text{para o caso do maior valor de } I_k'' \text{ for dado pela equação (1).}$$

$$\frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \frac{2R + R_o + R_T}{2X + X_o + X_T} \quad (11) \quad \text{para o caso do maior valor de } I_k'' \text{ for dado pela equação (3).}$$

n é o fator que determina a influência da componente de corrente alternada da corrente de curto-circuito e que é obtida através do gráfico (b) da figura 2, entrando-se com a relação entre a corrente de curto-circuito si métrica inicial (I_k'') e a corrente de curto-circuito de estado permanente (I_k) correspondente ao maior valor de I_k'' calculado e o tempo de duração' do curto-circuito (t).

Como os valores de $c, \gamma, \rho_{20}, \alpha, T_{max}$ e T_1 são constantes e definidos con forme Tabela I, podemos reduzir a equação (7) do seguinte modo:

Calculando ρ_{T_1} pela equação (8)

$$\rho_{T_1} = \rho_{20} [1 + \alpha (T_1 - 20)]$$

Para os cabos C.A.A. temos:

$$\rho_{T_1} = 0,028264 [1 + 0,00403 (70 - 20)]$$

$$\rho_{T_1} = 0,033959196 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m.}$$

Para os cabos nús de cobre temos:

$$\rho_{T_1} = 0,017775 [1 + 0,00381 (70 - 20)]$$

$$\rho_{T_1} = 0,021161137 \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$$

Então, substituindo estes valores na equação (7) temos:

$$A = \frac{1000 I_{kef} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{4,184 \frac{c \cdot \gamma}{\rho_{T_1} \cdot \alpha} \ln [1 + \alpha (T_{max} - T_1)]}}$$

Para os cabos C.A.A.,

$$A = \frac{1000 \cdot I_{kef} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{4,184 \cdot 0,214 \cdot 2,703 \ln [1 + 0,00403 (160-70)]}} \\ 0,033959196 \cdot 0,00403$$

$$A = 13,52 I_{kef} \cdot \sqrt{t} \quad (12)$$

Para os cabos de cobre,

$$A = \frac{1000 \cdot I_{kef} \cdot V \cdot t}{\sqrt{\frac{4,184 \cdot 0,0925 \cdot 8,89}{0,021161137 \cdot 0,00381} \ln [1 + 0,00381 (170-70)]}}$$

$$A = 8,52 I_{kef} \cdot V \cdot t \quad (13)$$

3.3 - Sequência de cálculo

3.3.1 - Dados a serem obtidos:

- Corrente de curto-circuito de estado permanente de um curto-circuito trifásico e fase-terra (I_k) em kA.
- Resistência de sequência positiva reduzida no barramento (R), em Ω .
- Reatância de sequência positiva reduzida no barramento (X), em Ω .
- Resistência de sequência zero reduzida no barramento (R_0), em Ω .
- Reatância de sequência zero reduzida no barramento (X_0), em Ω .
- Resistência de terra (R_T) em Ω .
- Reatância de terra (X_T) em Ω .
- Tensão fase-fase do barramento (V) em kV.
- Tempo de duração do curto-circuito (t) em segundos.

3.3.2 - Determinar as impedâncias de sequência positiva e zero reduzidas no barramento e a impedância de terra, pelas equações (4), (5) e (6).

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

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$$

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}$$

3.3.3 - Determinar a corrente de curto-circuito simétrica inicial, para curtos-circuitos trifásicos e fase-terra, pelas equações (1) e (3).

$$I_k'' = \frac{1,1 V}{\sqrt{3} Z}$$

$$I_k'' = \frac{1,1 \sqrt{3} V}{2Z + Z_0 + Z_T}$$

Escolhendo como valor de I_k'' , o maior dos dois.

- 3.3.4 - Determinar a relação entre a resistência e a reatância do caminho de curto-circuito (R_{cc}/X_{cc}) pela equação (10) ou (11), baseado no valor de I_k'' escolhido.

$$\frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \frac{R}{X} \quad \text{se o maior valor de } I_k'' \text{ for no curto-circuito trifásico.}$$

ou

$$\frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \frac{2R + R_0 + R_T}{2X + X_0 + X_T} \quad \text{se o maior valor de } I_k'' \text{ for no curto-circuito fase-terra.}$$

- 3.3.5 - Determinar a relação entre a corrente de curto-circuito simétrica inicial (I_k'') e a corrente de curto-circuito de estado permanente (I_k)

$$\frac{I_k''}{I_k}$$

- 3.3.6 - Determinar os valores de χ , entrando com o valor de R_{cc}/X_{cc} , encontrado no item 3.3.4, no gráfico da fig. 1.
- 3.3.7 - Determinar o valor de m , entrando com os valores de X e do tempo de duração do curto-circuito no gráfico (a) da figura 2.
- 3.3.8 - Determinar o valor de n , entrando com os valores de I_k''/I_k encontrado no item 3.3.5 e do tempo de duração do curto-circuito, no gráfico (b) da figura 2.
- 3.3.9 - Determinar o valor da corrente de curto-circuito efetiva do ponto de vista de aquecimento, pela equação (9).

$$I_{kef} = I_k'' \sqrt{m + n}$$

- 3.3.10 - Determinar a área da seção do condutor capaz de suportar as condições de curto-circuito, pela equação (12) ou (13).

$$A = 13,52 I_{k\text{ef}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{para cabos C.A.A.}$$

ou

$$A = 8,52 I_{k\text{ef}} \cdot \sqrt{t} \quad \text{para cabos nus de cobre.}$$

3.4 - Exemplos numéricos

3.4.1 - Dados:

Cabo C.A.A.

$I_K = 6,54 \text{ kA}$ no curto-circuito trifásico

$I_K = 7,56 \text{ kA}$ no curto-circuito fase-terra

$R = 2,09865 \ \Omega$

$X = 12,02057 \ \Omega$

$R_0 = 0,75795 \ \Omega$

$X_0 = 7,21577 \ \Omega$

$R_T = 0$

$X_T = 0$

$V = 138 \text{ kV}$

$t = 1 \text{ segundo}$

3.4.2 - Impedâncias de sequência positiva e zero reduzidas no barramento e impedância de terra, equações (4), (5) e (6)

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(2,09865)^2 + (12,02057)^2}$$

$$Z = 12,20239463 \ \Omega$$

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = \sqrt{(0,75795)^2 + (7,21577)^2}$$

$$Z_0 = 7,255468619 \ \Omega$$

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2} = \sqrt{0^2 + 0^2}$$

$$Z_T = 0$$

3.4.3 - Corrente de curto-circuito simétrica inicial, para curto-circuitos trifásicos e fase-terra, equações (1) e (3).

$$I_k'' = \frac{1,1V}{\sqrt{3} Z} = \frac{1,1 \cdot 138}{\sqrt{3} \cdot 12,20239463}$$

$$I_k'' = 7,183 \text{ kA}$$

$$I_k'' = \frac{1,1 \sqrt{3} V}{2Z + Z_0 + Z_T} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 138}{2 \cdot 12,20239463 + 7,255468619 + 0}$$

$$I_k'' = 8,31 \text{ kA}$$

A corrente de maior valor é a de curto-circuito fase-terra, $I_k'' = 8,31 \text{ kA}$.

3.4.4 - Relação entre a resistência e a reatância do caminho de curto-circuito' (R_{cc}/X_{cc}), equação (11)

$$\frac{R_{cc}}{X_{cc}} = \frac{2R + R_0 + R_T}{2X + X_0 + X_T} = \frac{2 \cdot 2,09865 + 0,75795 + 0}{2 \cdot 12,02057 + 7,21577} = 0,15853$$

3.4.5 - Relação entre a corrente de curto-circuito simétrica inicial (I_k'') e a corrente de curto-circuito de estado permanente (I_k).

$$\frac{I_k''}{I_k} = \frac{8,31}{7,56}$$

$$\frac{I_k''}{I_k} = 1,0992$$

3.4.6 - Valor de χ , entrando com o valor R_{cc}/X_{cc} , encontrado no item 3.4.4, no gráfico da figura 1.

$$\chi = 1,62$$

3.4.7 - Valor de m , entrando com os valores de χ e do tempo de duração do curto circuito, no gráfico (a) da figura 2.

$$m = 0,01$$

3.4.8 - Valor de n , entrando com os valores de I_k''/I_k encontrado no item 3.4.5 e do tempo de duração do curto-circuito, no gráfico (b) da figura 2.

$$n = 0,972$$

3.4.9 - Valor da corrente de curto-circuito efetiva, do ponto de vista de aquecimento, equação (9).

$$I_{kef} = I_k \sqrt{m + n} = 8,31 \sqrt{0,01 + 0,972}$$

$$I_{kef} = 8,235 \text{ kA}$$

3.4.10 - Área da seção do condutor capaz de suportar estas condições de curto-circuito, equação (12).

$$A = 13,52 \cdot I_{kef} \cdot \sqrt{t}$$

$$A = 13,52 \cdot 8,235 \cdot \sqrt{1}$$

$$A = 111,34 \text{ mm}^2$$

Pelo valor de A encontrado, conclui-se que a área da seção da parte condutora do cabo do barramento não poderá ser inferior a 111,34 mm².

NOTA:- Para o caso de cabos em feixe, faz-se os cálculos normalmente como indicado e entra com o valor da corrente de curto-circuito efetiva do ponto de vista de aquecimento dividida pelo número de condutores por fase.

4.0 - DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS MECÂNICOS DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO , EM CABOS DE BARRAMENTOS COM UM ÚNICO CONDUTOR POR FASE.

4.1 - Considerações Gerais

O esforço mecânico em barramentos com um único cabo condutor por fase, depende: da corrente de curto-circuito e das características mecânicas do sistema de fixação dos cabos.

A corrente utilizada no método adotado, é a corrente de curto-circuito simétrica inicial em um curto-circuito fase-fase dada pela equação (2). (referência 2).

4.2 - Descrição do método

No arranjo em que temos um único cabo condutor por fase em posição horizontal, o esforço de tensão T, a que fica sujeito o cabo por ocasião de um curto-circuito é $(1 + \phi \cdot \psi)$ vezes maior do que a tensão estática ou de esticamento T_0 .

Portanto

$$T = T_0 (1 + \phi \cdot \psi) \quad (14) \quad (\text{referência 2})$$

Sendo:

T a tensão mecânica a que fica sujeito o cabo nas condições de curto-circuito, em Kgf;

T_0 a tensão estática ou de esticamento do cabo, antes de iniciar o curto-circuito, em Kgf;

ϕ um fator adimensional que é determinado pela equação:

$$\phi = 3 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{F_m}{m}\right)^2} - 1 \right] \quad (15)$$

onde:

m é o peso do cabo por unidade de comprimento, em kgf/cm;

F_m é a força magnética exercida no cabo, por ocasião do curto-circuito, por unidade comprimento, em kgf/cm.

Esta força é determinada por sua equação fundamental.

$$F_m = \frac{2,04 \cdot 10^{-2}}{a} \cdot I_k^{2''} \quad (16)$$

onde:

a é a distância entre fases, em cm,

$I_k^{2''}$ é a corrente de curto-circuito simétrica inicial, num curto-circuito fase-fase, em kA, equação (2).

E : ψ um fator, também adimensional, que é uma função de ϕ e ζ . O valor de ϕ é determinado pela equação (15) e o valor de ζ que é um fator adimensional é determinado pela equação:

$$\zeta = \frac{(m \cdot L)^2}{24 \cdot T_0^3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{s \cdot L} + \frac{1}{E \cdot A}} \quad (17) \quad (\text{referência 2})$$

sendo:

m o mesmo da equação (15),

L a distância entre os pontos de fixação do cabo, em cm.

T_0 o mesmo da equação (14)

s o valor característico de elasticidade (constante de mola) do sistema de fixação dos cabos, em kgf/cm.

Não se conhecendo valores mais exatos para s , pode ser arbitrado como 102 kgf/cm, para os tipos mais comuns de vigas e pilares - (referência 2).

E o módulo de elasticidade do cabo, em kgf/cm².

A a área total da seção transversal do cabo, em cm^2 .

Uma vez determinados os valores de ϕ e ζ , o fator ψ pode ser determinado pela equação:

$$\zeta = \left[\frac{(1 + \phi\psi)^2}{2 + \phi + \phi\psi} \right] \cdot \left[\frac{\psi}{1 - \psi} \right] \quad (18)$$

que pode ser escrita na forma

$$\psi^3 + \frac{(2 + \zeta)}{\phi} \psi^2 + \frac{(1 + 2\zeta)}{\phi^2} \psi - \zeta \frac{(2 + \phi)}{\phi^2} = 0 \quad (19)$$

O valor de ψ pode ser determinado analiticamente pelas equações (18) ou (19) ou através das curvas plotadas no gráfico da figura 3, que são a representação gráfica destas equações, entrando com os valores de ϕ e ζ .

4.2.1 - Método de resolução da equação cúbica (19)

A determinação do valor de ψ é feito através da resolução da equação cúbica (19), utilizando as soluções por redução trigonométrica.

Para facilitar o cálculo, façamos:

$$\frac{2 + \zeta}{\phi} = p$$

$$\frac{1 + 2\zeta}{\phi^2} = q$$

$$\zeta \frac{(2 + \phi)}{\phi^2} = r$$

A equação (19) ficará: $\psi^3 - p\psi^2 + q\psi + r = 0$ (20)

Fazendo $\psi = x - \frac{p}{3}$, (21)

A equação (20) ficará reduzida a

$$x^3 + ux + v = 0 \quad (22)$$

sendo:

$$u = \frac{1}{3} (3q - p^2) \quad e \quad v = \frac{1}{27} (2p^3 - 9pq + 27r) \quad (23)$$

As raízes x_1 , x_2 e x_3 da equação (22) são:

$$x_1 = A + B; \quad x_2 = -\frac{A + B}{2} + i \frac{A - B}{2} \sqrt{3} \quad e$$

$$x_3 = - \left(\frac{A+B}{2} \right) - i \frac{A-B}{2} \sqrt{3} \quad (24)$$

$$\text{sendo } A = \sqrt[3]{-\frac{v}{2} + \sqrt{Q}}, \quad B = \sqrt[3]{-\frac{v}{2} - \sqrt{Q}}$$

$$\text{e } Q = -\frac{v^2}{4} + \frac{u^3}{27} \quad (25)$$

O valor de ψ tem que ser um número real e positivo, portanto, façamos uma análise para verificar qual das três raízes satisfaz.

1 - Se $Q > 0$, teremos uma raiz real e duas imaginárias conjugadas (equações (24)), então a que satisfaz é $x_1 = A + B$

2 - Se $Q = 0$, teremos três raízes das quais as duas últimas são iguais.

Sendo $v \geq 0$, A e B serão iguais e negativos e as raízes, pelas equações (24), serão:

$$x_1 = -2A, \quad x_2 = A \quad \text{e} \quad x_3 = A$$

Portanto a raiz $x_2 = x_3 = A$, satisfaz

Sendo $v < 0$, A e B serão iguais e positivos e as raízes, pelas equações (24), serão:

$$x_1 = 2A, \quad x_2 = -A \quad \text{e} \quad x_3 = -A$$

A raiz $x_1 = 2A$, satisfaz

3 - Se $Q < 0$, teremos três raízes reais e desiguais. Para determinar as raízes, neste caso, teremos que utilizar a solução trigonométrica. As raízes da equação (22) pelo método trigonométrico são:

$$x_1 = 2 \sqrt{-\frac{u}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} \right); \quad x_2 = -2 \sqrt{-\frac{u}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} + 60^\circ \right); \quad \text{e}$$

$$x_3 = -2 \sqrt{-\frac{u}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} - 60^\circ \right) \quad (26) \quad (\text{referência 5})$$

$$\text{Sendo } \alpha = \text{arc. cos} \left[-\frac{v}{2\sqrt{-\left(\frac{u}{3}\right)^3}} \right] \quad (27)$$

Calculada as três raízes, adota-se a de maior valor positivo.

Uma vez determinada a raiz x , discutida anteriormente, determina-se finalmente o valor de ψ , através da equação (21)

$$\psi = x - \frac{p}{3}$$

Observações:

1 - Com os cabos condutores em posições diferentes da horizontal, o método de cálculo descrito acima, pode ser utilizado considerando ser pouco provável que os esforços a que ficam sujeitos os cabos, nas condições de curto-circuito, sejam maiores do que os valores encontrados através deste método (referência 2).

2- Para o cálculo de esforços mecânicos a que ficam sujeitos os cabos condutores de uma derivação, o método utilizado é o mesmo descrito acima, fazendo-se a tensão estática ou de esticamento,

$$T_0 = m\ell \left(\frac{\ell}{8f} + \frac{f}{\ell} \right), \text{ sendo:}$$

m o peso do cabo condutor da derivação, por unidade de comprimento, em kgf/cm;

ℓ a distância entre os pontos de fixação do cabo, em cm;

f a flecha da derivação, em cm;

Para o caso de derivações, o valor da tensão a que fica sujeito o cabo condutor por ocasião do curto-circuito a ser considerado deve ser o calculado multiplicado por 1,5 (referência 2).

4.3 - Sequência de cálculo

4.3.1 - Dados a serem obtidos:

- Distância entre fases (a), em cm.
 - Peso do cabo por unidade de comprimento (m), em kgf/cm (tabela 1)
 - Distância entre os pontos de fixação do cabo (L), em cm.
 - Tensão estática ou de esticamento do cabo, antes de iniciar o curto-circuito (T_0), em kgf.
 - Valor característico de elasticidade (constante da mola) do sistema de fixação dos cabos (s), em kgf/cm.
- Para os sistemas de fixação (vigas, pilares, etc.) mais comuns, pode ser admitido como 102 kgf/cm.
- Módulo de elasticidade do cabo (E), em kgf/cm². (tabela 1).
 - Área da seção transversal do cabo (A), em cm². (tabela 1).
 - Tensão fase-fase nominal do sistema (V), em kV.
 - Impedância de sequência positiva reduzida no barramento (Z), em Ω .

4.3.2 - Determinar a corrente de curto-circuito simétrica inicial, num curto-circuito fase-fase (I_k''), em kA, equação (2)

$$I_k'' = \frac{1,1 V}{2Z}$$

- 4.3.3 - Determinar a força magnética exercida no cabo, por ocasião do curto-circuito, por unidade de comprimento (F_m), em kgf/cm, equação (16),

$$F_m = \frac{2,04 \cdot 10^{-2}}{a} \cdot I_k''^2$$

- 4.3.4 - Determinar o fator ϕ , equação (15)

$$\phi = 3 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{F_m}{m} \right)^2} - 1 \right]$$

- 4.3.5 - Determinar o fator ζ , equação (17)

$$\zeta = \frac{(m \cdot L)^2}{24 \cdot T_0^3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{s \cdot L} + \frac{1}{E \cdot A}}$$

- 4.3.6 - Determinar o fator ψ , resolvendo a equação (19) pelo método exposto no item 4.2.1 ou entrando com os valores de ϕ e ζ no gráfico da figura 3.

$$\psi^3 + \left(\frac{2 + \zeta}{\phi} \right) \psi^2 + \left(\frac{1 + 2\zeta}{\phi^2} \right) \psi - \zeta \left(\frac{2 + \phi}{\phi^2} \right) = 0$$

- 4.3.7 - Determinar o valor da tensão mecânica a que fica sujeito o cabo, em kgf, nas condições de curto-circuito, equação (14)

$$T = T_0 (1 + \phi \psi)$$

- 4.4 - Exemplos numéricos:

- 4.4.1 - Dados:

Cabo C.A.A. 795 MCM

$a = 560$ cm.

$m = 0,016283$ kgf/cm (tabela 1)

$L = 8.000$ cm

$T_0 = 800$ kgf

$s = 102$ kgf/cm

$E = 715700$ kgf/cm² (tabela 1)

$A = 4,683$ cm² (tabela 1)

$V = 230$ kV

$Z = 17,51053321$ Ω

- 4.4.2 - Corrente de curto-circuito simétrica inicial, em um curto-circuito fase-fase, equação (2).

$$I_k'' = \frac{1,1 \text{ V}}{2Z} = \frac{1,1 \cdot 230}{2 \cdot 17,51053321}$$

$$I_k'' = 7,3 \text{ kA}$$

4.4.3 - Força magnética, equação (16)

$$F_m = \frac{2,04 \cdot 10^{-2}}{a} \cdot I_k''^2 = \frac{2,04 \cdot 10^{-2}}{560} \cdot 7,3^2$$

$$F_m = 0,001941278 \text{ kgf/cm}$$

4.4.4 - Fator ϕ , equação (15)

$$\phi = 3 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{F_m}{m} \right)^2} - 1 \right] = 3 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,001941278}{0,016283} \right)^2} - 1 \right]$$

$$\phi = 0,021245307$$

4.4.5 - Fator ζ , equação (17)

$$\zeta = \frac{(m \cdot L)^2}{24 T_0^3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{s \cdot L} + \frac{1}{E \cdot A}} = \frac{(0,016283 \cdot 8000)^2}{24 \cdot 800^3}$$

$$\dots \frac{1}{\frac{102 \cdot 8000}{715700} + \frac{1}{4,683}}$$

$$\zeta = 0,906280763$$

4.4.6 - Valor de ψ , graficamente entrando com os valores de ϕ e ζ no gráfico da figura 3 ($\psi = 0,64$) ou pela resolução da equação (19), conforme o método de resolução indicado no item 4.2.1.

$$\psi^3 + \frac{(2 + \zeta)\psi^2}{\phi} + \frac{(1 + 2\zeta)\psi}{\phi^2} - \zeta \frac{(2 + \phi)}{\phi^2} = 0$$

$$p = \frac{2 + \zeta}{\phi} = \frac{2 + 0,906280763}{0,021245307}$$

$$p = 136,7963646$$

$$q = \frac{1 + 2\zeta}{\phi^2} = \frac{1 + 2 \cdot 0,906280763}{0,021245307^2}$$

$$q = 6231,262921$$

$$r = -\zeta \frac{(2 + \phi)}{\phi^2} = -0,906280763 \frac{(2 + 0,021245307)}{0,021245307^2}$$

$$r = -4058,409171$$

$$u = -\frac{1}{3} (3q - p^2) = \frac{1}{3} (3 \times 6231,262921 - \frac{136,7963646^2}{3})$$

$$u = -6,485534666$$

$$v = \frac{1}{27} (2p^3 - 9pq + 27r)$$

$$v = \frac{1}{27} [2 \cdot \frac{136,7963646^3}{3} - 9 \cdot 136,7963646 \cdot 6231,262921 + 27(-4058,409171)]$$

$$v = -98573,93376$$

$$Q = \frac{v^2}{4} + \frac{u^3}{27} = \frac{(-98573,93376)^2}{4} + \frac{(-6,485534666)^3}{27}$$

$$Q = 2429205094$$

$$Q > 0$$

Portanto,

$$A = \sqrt[3]{-\frac{v}{2} + \sqrt{Q}} = \sqrt[3]{-\frac{(-98573,93376)}{2} + \sqrt{2429205094}}$$

$$A = 46,1941906$$

$$B = \sqrt[3]{-\frac{v}{2} - \sqrt{Q}} = \sqrt[3]{-\frac{(-98573,93376)}{2} - \sqrt{2429205094}}$$

$$B = 0,047026693$$

$$x_1 = A + B = 46,1941906 + 0,047026693$$

$$x_1 = 46,24121729$$

Pela equação (21), temos:

$$\psi = x - \frac{p}{3} = 46,24121729 - \frac{136,7963646}{3}$$

$$\psi = 0,642429093$$

4.4.7 - Tensão mecânica por ocasião do curto-circuito, equação (14),

$$T = T_0 (1 + \phi\psi) = 800 (1 + 0,021245307 \cdot 0,642429093)$$

$$T = 810,9188826 \approx 811 \text{ kgf}$$

4.4.8 - Para completar o exemplo, calcularemos o esforço em uma derivação do barramento para uma chave seccionadora.

4.4.9 - Dados:

$$a = 560 \text{ cm}$$

$$m = 0,016283 \text{ kgf/cm}$$

$$l = 1200 \text{ cm}$$

$$f = 110 \text{ cm}$$

$$s = 102 \text{ kgf/cm}$$

$$E = 715700 \text{ kgf/cm}^2$$

$$A = 4,683 \text{ cm}^2$$

$$V = 230 \text{ kV}$$

$$Z = 17,51053321 \Omega$$

4.4.10- Corrente de curto-circuito simétrica inicial, curto-circuito bifásico, equação (2)

$$I_k'' = \frac{1,1 V}{2Z} = \frac{1,1 \cdot 230}{2 \cdot 17,51053321}$$

$$I_k'' = 7,224223185$$

4.4.11 -Força magnética, equação (16)

$$F_m = \frac{2,04 \cdot 10^{-2}}{a} \cdot I_k''^2 = \frac{2,04 \cdot 10^{-2}}{560} \cdot 7,224223185^2$$

$$F_m = 0,001901185 \text{ kgf/cm}$$

4.4.12- Fator ϕ , equação (15),

$$\phi = 3 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{F_m}{m}\right)^2} - 1 \right] = 3 \left[\sqrt{1 + \left(\frac{0,001941278}{0,016283}\right)^2} - 1 \right]$$

$$\phi = 0,020379735$$

4.4.13- Tensão elástica ou de esticamento T_0 , equação citada na observação 2,

$$T_0 = m\ell \left(\frac{\ell}{8f} + \frac{f}{\ell} \right) = 0,016283 \cdot 1.200 \left(\frac{1.200}{8 \times 110} + \frac{110}{1.200} \right)$$

$$T_0 = 28,436 \text{ kgf}$$

4.4.14- Fator ζ , equação (17)

$$\zeta = \frac{(m \cdot \ell)^2}{24T_0^3} \cdot \frac{1}{\frac{1}{s \cdot \ell} + \frac{1}{E \cdot A}} = \frac{(0,016283 \cdot 1200)^2}{24 \cdot (28,436)^3} \cdot$$

$$\frac{1}{\frac{1}{102.1200} + \frac{1}{715700.4,683}}$$

$$\zeta = 81,70025507$$

4.4.15- Valor de ψ , graficamente entrando com os valores de ϕ e ζ no gráfico - da figura 3 ($\psi = 0,99$) ou pela resolução da equação (19), conforme método de resolução indicado no item 4.2.1.

$$\psi^3 + \frac{(2 + \zeta)}{\phi} \psi^2 + \frac{(1 + 2\zeta)}{\phi^2} \psi - \frac{\zeta(2 + \phi)}{\phi^2} = 0$$

$$p = \frac{2 + \zeta}{\phi} = \frac{2 + 81,70025507}{0,020379735}$$

$$p = 4107,033534$$

$$q = \frac{1 + 2\zeta}{\phi^2} = \frac{1 + 2 \cdot 81,70025507}{(0,020379735)^2}$$

$$q = 395827,7146$$

$$r = - \frac{\zeta(2 + \phi)}{\phi^2} = - 81,70025507 \frac{(2 + 0,020349735)}{(0,020379735)^2}$$

$$r = -397428,9087$$

$$u = \frac{1}{3} (3q - p^2) = \frac{1}{3} (3 \cdot 395827,7146 - (4107,033534)^2)$$

$$u = - 5226747,101$$

$$v = \frac{1}{27} (2p^3 - 9pq + 27r)$$

$$v = \frac{1}{27} \left[2 \cdot (4107,033534)^3 - 9 \cdot 4107,033534 \cdot 395927,7146 + 27 \dots \right. \\ \left. \dots (- 397428,9087) \right]$$

$$v = 4589288520$$

$$Q = \frac{v^2}{4} + \frac{u^3}{27} = \frac{(4589288520)^2}{4} + \frac{(5226747,101)^3}{27}$$

$$Q = - 2,308565570 \times 10^{16}$$

$$Q < 0$$

Então:

$$\alpha = \arccos \left[\frac{-v}{2\sqrt{\left(\frac{u}{3}\right)^3}} \right] = \arccos \left[- \frac{4589288520}{2\sqrt{\left(\frac{-5226747,101^3}{3}\right)}} \right]$$

$$\alpha = 176,2116956^\circ$$

$$x_1 = 2\sqrt{-\frac{u}{3}} \cos \frac{\alpha}{3} = 2\sqrt{+\frac{5226747,101}{3}} \cos \left(\frac{176,2116956}{3}\right)$$

$$x_1 = 1370,004969$$

$$x_2 = - 2\sqrt{-\frac{u}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} + 60^\circ\right) = -2\sqrt{\frac{+5226747,101}{3}} \cos \dots$$

$$\dots \left(\frac{176,2116956^\circ}{3} + 60^\circ\right)$$

$$x_2 = 1269,239539$$

$$x_3 = - 2\sqrt{-\frac{u}{3}} \cos \left(\frac{\alpha}{3} - 60^\circ\right) = - 2\sqrt{+\frac{5226747,101}{3}} \cos \dots$$

$$\dots \left(\frac{176,2116956^\circ}{3} - 60^\circ\right)$$

$$x_3 = - 2639,244508$$

A raiz de maior valor positivo é $x_1 = 1,314228993 \times 10^3$

Levando o valor da raiz na equação (21), temos:

$$\psi = x - \frac{P}{3} = 1370,004969 - \frac{4107,033534}{3}$$

$$\psi = 0,9937910$$

4.4.16 - Tensão mecânica por ocasião do curto-circuito, equação (14)

$$T = T_0 (1 + \phi \psi) = 28,436 (1 + 0,020379735 \cdot 0,9937910)$$

$$T = 29,01191991 \text{ kgf}$$

Conforme a observação 2, o valor considerado de T, para derivações de verá ser 1,5 vezes maior do que o calculado, portanto:

$$1,5T = 1,5 \cdot 29,01191991 = 43,51787987$$

$$1,5T = 44 \text{ kgf}$$

5.0 - DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS MECÂNICOS, DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO_CIRCUITO, EM CABOS DE BARRAMENTOS COM FEIXE DE CONDUTORES DISTRIBUIDOS SEGUNDO UM - POLÍGONO REGULAR.

5.1 - Considerações Gerais:

O método de cálculo utilizado no dimensionamento de esforços mecânicos de vidos a correntes de curto-circuito em barramentos com feixe de cabos condutores por fase, será desenvolvido para o caso de dois cabos por fase - (geminados) e posteriormente generalizado para o caso de um feixe de n - condutores, distribuídos segundo um polígono regular.

5.2 - Descrição do Método

O método de cálculo que permite estimar a tensão mecânica a que fica su-'jeito cada cabo condutor do geminado durante a condição de curto-circuito, supõe que os cabos ao sofrerem a ação da força magnética de atração, to-mam a configuração de uma curva parabólica entre espaçadores adjacentes - (figura 4).

Considerando o eixo dos x na linha de centro entre os dois condutores e o eixo dos y na linha de centro entre dois espaçadores teremos:

$$x^2 = 4_p \left(y - \frac{b}{2} \right) \quad (28)$$

$$y = \frac{C}{2} \quad (29)$$

onde:

L é o comprimento da projeção sobre o eixo dos X, do trecho de cabo condutor que não entra em contacto com o cabo condutor oposto por ocasião do curto-circuito.

b é a distância mínima entre as linhas de centro dos cabos condutores durante as condições de curto-circuito. Quando os cabos condutores entram em contacto, b será igual ao diâmetro do condutor, em caso contrário, ele deverá ser arbitrado.

C é a distância entre as linhas de centro dos cabos condutores para qualquer valor de x, quando os cabos condutores sofrem o deslocamento máximo em consequência do curto-circuito.

p é o foco da parábola.

4_p é o comprimento do "latus rectum" da parábola.

Substituindo (29) em (28) temos:

$$x^2 = 4_p \left(\frac{C}{2} - \frac{b}{2} \right) \quad (30)$$

Tirando o valor de C em (30) vem:

$$C = \frac{x^2}{2_p} + b \quad (31)$$

A base do método consiste em determinar a força magnética de curto-circuito necessária para fazer o condutor adquirir a configuração mostrada na figura 4 e igualá-la à resistência mecânica oferecida pelo sistema: espaçadores e cabo condutor, utilizando as leis de equilíbrio estático.

A equação fundamental que dá a força magnética entre dois condutores paralelos conduzindo corrente, por unidade de comprimento, é:

$$\frac{F_i}{L} = 2,04 \cdot 10^{-2} \frac{i_1 \cdot i_2}{a} \quad (32)$$

Onde:

F_i é a força magnética instantânea, em Kgf

L é o comprimento dos condutores, em cm.

i_1 é a corrente instantânea no condutor 1, em kA

i_2 é a corrente instantânea no condutor 2, em kA

a é o espaçamento entre os condutores, em cm.

Para o caso de condutores geminados i_1 e i_2 são iguais.

Considerando a pior condição, ou seja, a corrente de curto-circuito completamente assimétrica, temos:

$$i_1 = i_2 = (1 - \cos \omega t) = \sqrt{2} I_{rms} (1 - \cos \omega t),$$

sendo:

$$\omega - \text{frequência} - \omega = \frac{2\pi}{T}$$

I - o valor de pico da componente simétrica da corrente de curto em ca da um dos cabos condutores de uma fase, em kA.

I_{rms} - o valor eficaz da componente simétrica da corrente de curto em cada um dos cabos condutores de uma fase, em kA.

Substituindo i_1 e i_2 fazendo $a = C$ em (32) vem:

$$\frac{F_i}{L} = \frac{2,04 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{2} I_{rms} (1 - \cos \omega t) \cdot \sqrt{2} I_{rms} (1 - \cos \omega t)}{C}$$

$$\frac{F_i}{L} = \frac{4,08 \cdot 10^{-2} \cdot I_{rms}^2 \cdot (1 - \cos \omega t)^2}{C}$$

O valor médio da força magnética por unidade de comprimento no período T será:

$$\frac{F_m}{L} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{4,08 \cdot 10^{-2} \cdot I_{rms}^2 (1 - \cos \omega t)^2}{C} dt$$

$$\frac{F_m}{L} = \frac{4,08 \cdot 10^{-2} \cdot I_{rms}^2}{C} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\cos 2\pi t}{T}\right)^2 dt$$

$$\frac{F_m}{L} = \frac{4,08 \cdot 10^{-2} \cdot I_{rms}^2}{C} \cdot \frac{1}{T} \left[\frac{3t}{2} - \frac{2}{2\pi/T} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) + \frac{1}{4 \cdot 2\pi/T} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t\right) \right]_0^T$$

$$\frac{F_m}{L} = \frac{4,08 \cdot 10^{-2} \cdot I_{rms}^2}{C} \cdot \frac{1}{T} \left[\frac{3T}{2} - \frac{2}{2\pi/T} \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot T\right) + \frac{1}{4 \cdot 2\pi/T} \sin^2\left(\frac{2\pi}{T} \cdot T\right) - 0 \right]$$

$$\frac{F_m}{L} = \frac{6,12 \cdot 10^{-2} \cdot I_{rms}^2}{C} \quad (33)$$

Para o caso de se querer considerar os efeitos causados pelo sistema de fixação (isoladores, vigas, pilares, etc), um fator K chamado fator de esforço pode ser introduzido multiplicando a equação (33). Para o nosso caso, devido à complexidade para sua determinação K será considerado igual a 1.

Introduzindo K na equação (33) vem:

$$\frac{F_m}{L} = 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot \frac{I_{rms}^2}{C} \quad (34)$$

Diferenciando a equação (34) com relação a L, teremos:

$$dF_m = 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot \frac{I_{rms}^2}{C} dL$$

Mas $dL = dx$, portanto

$$dF_m = 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot \frac{I_{rms}^2}{C} dx$$

Substituindo C pelo valor dado na equação (31), vem:

$$dF_m = 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot \frac{I_{rms}^2}{\left(\frac{x^2}{2p} + b\right)}$$

Multiplicando numerador e denominador do segundo membro da equação por $2p$:

$$dF_m = 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \cdot \frac{2p}{x^2 + 2pb} dx \quad (35)$$

Integrando a equação (35) de $x = -L/2$ até $x = L/2$, obtemos a força magnética total a que fica sujeito o cabo condutor quando ocorre um curto-circuito, então:

$$\begin{aligned} dF_m &= 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \cdot 2p \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dx}{x^2 + 2pb} \\ F_m &= 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \cdot 2p \left[\frac{1}{\sqrt{2pb}} \arctan \frac{1}{2pb} x \right]_{-L/2}^{L/2} \\ F_m &= 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \cdot 2p \left[\frac{2}{2pb} \arctan \frac{L}{2 \cdot 2pb} \right] \\ F_m &= 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \left[\sqrt{\frac{16 p^2}{2pb}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}} \right] \\ F_m &= 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \left[\sqrt{\frac{8p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}} \right] \\ F_m &= 6,12 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{rms}^2 \cdot 2 \sqrt{\frac{p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}} \\ F_m &= 0,1731 \cdot K \cdot I_{rms}^2 \sqrt{\frac{p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}} \quad (36) \end{aligned}$$

A equação que fornece a tração mecânica necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor para que ele tome a configuração mostrada na fig. 4 é:

$$FE = \frac{E \cdot A \cdot \Delta S}{S} \quad (37)$$

sendo:

FE a tração mecânica requerida para causar um aumento de ΔS no cabo condutor, em kgf

A a área da seção transversal do cabo condutor, em cm^2 .

ΔS o aumento de comprimento do cabo condutor entre dois espaçadores, em cm.

S a distância entre dois espaçadores adjacentes, em cm.

E o módulo de elasticidade do cabo condutor, em kgf/cm^2 .

As forças que atuam no sistema constituído por um dos cabos condutores e dois espaçadores adjacentes, ao ocorrer o curto-circuito, são mostradas na figura 5 onde:

F_S é a reação do espaçador, em Kgf.

F_{me} é a força magnética total exercida ao longo do cabo condutor, entre dois espaçadores, concentrada no ponto médio, em kgf.

$T = T_0 + FE$ (38) é a tensão mecânica total no cabo condutor (a inicial mais a necessária para ocasionar o aumento no comprimento do cabo condutor), em kgf.

T_0 é a tensão estática ou de esticamento de cada condutor de uma fase, em kgf.

Admitindo-se que existe um equilíbrio estático no instante em que o condutor sofreu o alongamento máximo, podemos aplicar a lei de Newton que diz - que a soma das forças é igual a zero, isto é:

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_x = T \sin \theta - T \sin \theta = 0 \\ F_y = F_{me} - F_S - F_S + T \cos \theta + T \cos \theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} F_x = 0 \\ F_y = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} T \sin \theta = T \sin \theta \\ F_{me} = 2F_S - 2T \cos \theta \quad (39) \end{cases}$$

Isolando um espaçador conforme a figura 6, temos:

$$F_S = 2T \cos \theta \quad (40)$$

Substituindo (40) em (39) vem:

$$F_{me} = 2 \cdot 2 T \cos \theta - 2T \cos \theta$$

$$F_{me} = 2T \cos \theta \quad (41)$$

Conclusão:

Os valores de L ou b têm que ser arbitrados até que o valor de F_m calculado na equação (36) seja igual ao de F_{me} calculado pela equação (41). Uma vez satisfeito isto, o valor de FE é o cimo de tensão ou tensão de impacto a que fica sujeito cada cabo condutor de uma fase, por ocasião do curto-circuito.

5.2.1 - Generalização do método para n condutores distribuídos segundo um polígono regular:

O método descrito para dois cabos condutores por fase pode ser generalizado para n cabos condutores por fase, distribuídos segundo um polígono regular. Para isto, basta saber que nas condições de curto-circuito o movimento de cada um dos cabos condutores de um sistema de n cabos condutores distribuídos segundo um polígono regular e conduzindo correntes iguais, pode ser estudado analogamente como se fosse dois cabos condutores, cada um conduzindo a mesma corrente, com espaçamento igual ao diâmetro do círculo circunscrito ao polígono regular e sofrendo uma força magnética de atração $(n-1)$ vezes maior (demonstração no apêndice II). Portanto o método pode ser empregado com a mesma precisão, apenas lembrando-se que a equação (36) e os espaçamentos entre cabos condutores (H e b da figura 4) deverão ser:

$$F_m = (n-1) \cdot 0,1731 \cdot K \cdot I_{rms}^2 \sqrt{\frac{p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}} \quad (42)$$

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{\ell n}{\text{sen} \frac{180}{n}} \\ e & \\ b &= \frac{d}{\text{sen} \frac{180}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

Sendo:

H - o diâmetro do maior círculo circunscrito ao polígono regular formado pelos cabos condutores (no espaçador), em cm.

ℓn - a maior distância entre dois cabos condutores adjacentes (lado do polígono regular), no espaçador, em cm.

n - o número de cabos condutores por fase, distribuídos segundo um polígono regular, adimensional.

b - o diâmetro do menor círculo circunscrito ao polígono regular forma

do pelos cabos condutores de uma fase, por ocasião do curto-circuito, em cm.

d - a menor distancia entre dois cabos condutores adjacentes (lado do polígono regular) por ocasião do curto-circuito; igual ao diâmetro dos cabos condutores quando estes entram em contacto, em cm.

Observações:

1 - A influência na tensão mecânica devido a força magnética de repulsão entre duas fases pode ser desprezada porque ficou constatado experimentalmente que o instante em que o esforço de tensão devido a repulsão entre fases se soma ao esforço de tensão ocasionada pela tração entre os cabos condutores geminados, este já passou pelo valor máximo e decresceu para um valor tal que esta soma é menor do que o valor máximo. (referência 3).

2 - Para o cálculo de esforços mecânicos a que ficam sujeitos os cabos condutores de uma derivação, o método utilizado é o mesmo descrito acima, porém, considerando a tensão inicial ou de esticamento.

$$T_0 = mL \frac{L}{8f} + \frac{f}{L}, \text{ sendo:}$$

m o peso de cada cabo condutor da derivação, por unidade de comprimento, em kgf/cm;

L a distância entre os pontos de fixação dos cabos, em cm;

f a flecha da derivação, em cm.

3 - No caso específico de 3 (três) condutores por fase alinhados na horizontal sendo os 2 (dois) condutores externos equidistantes do condutor central e percorrido por correntes de intensidade e sentidos iguais cada condutor externo será atraído na direção do condutor central por uma força magnética.

Esta força magnética será a soma das forças magnéticas ocasionadas pela interação do campo magnético de um dos condutores externos com o condutor central e do campo magnético deste mesmo condutor com o outro condutor externo.

O condutor central permanecerá imóvel já que a soma das forças magnéticas nele é nula.

Considerando o acima exposto o método de cálculo pode ser perfeitamente utilizado admitindo-se um modelo equivalente com as seguintes caracte-

rísticas:

- número de condutores por fase: 2 ($n = 2$)
- corrente de curto-circuito simétrico por condutor = $\frac{(I_{rms} \text{ fase})}{3}$
multiplicada por $\sqrt{3}$
- distancia entre os 2 (dois) condutores = distancia entre os 2 (dois) condutores externos do sistema de 3 condutores por fase.
- diâmetro do cabo do modelo = 2x (diâmetro de cada cabo do sistema de 3 condutores por fase).

5.3 - Sequência de Cálculo

5.3.1 - Dados a serem obtidos:

- Corrente de curto-circuito simétrica em cada cabo condutor de uma fase (I_{rms}), em kA
- Número de cabos condutores por fase (n), adimensional
- Espaçamento entre dois condutores adjacentes (ℓn), em cm.
- Distancia entre dois espaçadores adjacentes (S), em cm.
- Área da seção transversal do cabo condutor (A), em cm^2 .
- Módulo de elasticidade do cabo condutor (E), em Kgf/cm^2 .
- Diâmetro do cabo condutor (d), em cm.
- Fator de esforço (K), normalmente 1.
- Tensão estática inicial ou de esticamento de cada condutor de uma fase (T_0), em kgf.

5.3.2 - Determinar o diâmetro do maior e do menor círculo circunscrito aos condutores H e b, respectivamente, em cm, equações nº (43):

$$H = \ell n / \text{sen}(180/n)$$

$$b = d / \text{sen}(180/n)$$

5.3.3 - Arbitrar o valor da projeção sobre o eixo x da parcela de cabo condutor que não entre em contacto com o cabo condutor oposto (L), em cm. Para facilitar este valor deve ser arbitrado $0,05 \times S$, inicialmente.

5.3.4 - Determinar $L/2$, em cm.

5.3.5 - Determinar o aumento de comprimento do cabo condutor entre dois espaçado

res adjacentes (ΔS), em cm e o coseno do ângulo θ (figura 7).

Da figura temos:

$$\frac{\Delta S}{2} = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)^2} - L/2 \quad (44)$$

$$\cos \theta = \frac{\frac{H}{2} - \frac{b}{2}}{\frac{L}{2}} \quad (45)$$

- 5.3.6 - Determinar o valor da tração mecânica necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor (FE), em kgf, equação (37).

$$FE = \frac{E.A.\Delta S}{S}$$

- 5.3.7 - Determinar a tensão mecânica total no cabo condutor (tensão inicial mais a necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor) equação (38)

$$T = T_0 + FE$$

- 5.3.8 - Determinar o foco da parábola (p), fazendo na equação (28), $x = L/2$ e $y = \frac{H}{2}$

$$p = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2}{4\left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)} \quad (46)$$

- 5.3.9 - Determinar a força magnética total a que fica sujeito o cabo condutor, - quando ocorre um curto-circuito (F_m), equação (42).

$$F_m = (n-1) \cdot 0,1731 \cdot K \cdot I_{rms}^2 \sqrt{\frac{p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}}$$

- 5.3.10- Determinar a força magnética que o sistema mecânico exige para tomar a - configuração considerada, equação (41)

$$F_{me} = 2T \cos \theta$$

- 5.3.11- Comparar a força magnética calculada em 5.3.9 com a calculada em 5.3.10.

Se $F_m \neq F_{me}$, significa que o valor de L arbitrado não é o real e refaz-se o cálculo desde o item 5.3.3, tomando-se sucessivos valores de $L = L$ arbitrado anteriormente + 0,05S até se obter $F_m = F_{me}$.

Após obter $F_m = F_{me}$, determina-se o valor de L que torna $F_m = F_{me}$ através' da equação (47), demonstrada no apêndice III.

$$L = L_2 + 0,05S \left(\frac{F_{m1} - F_{m2}}{F_{m2} - F_{m1} + F_{m1} - F_{m2}} - 1 \right) \quad (47)$$

onde:

L_2 é o valor de L com o qual se obteve $F_m > F_{me}$

S é a distancia entre dois espaçadores adjacentes, em cm.

F_{m1} é o último valor de F_{me} calculado com o qual se obteve

$$F_m < F_{me}$$

F_{m2} é o último valor de F_m calculado com o qual se obteve

$$F_m < F_{me}$$

F_{m2} é o valor de F_m calculado com o qual se obteve

$$F_m > F_{me}$$

F_{me2} é o valor de F_{me} calculado com o qual se obteve

$$F_m > F_{me}$$

Se o valor de L calculado pela equação (47) é menor ou igual ao valor de S , retorna-se com ele ao item 5.3.3 refazendo-se todo cálculo novamente, obtendo-se $F_m \approx F_{me}$.

Então o valor de T calculado no item 5.3.6 é a tensão mecânica total a que fica sujeito cada cabo condutor por ocasião do curto-circuito, e FE calculado no item 5.3.5 é o acréscimo de tensão em cada cabo condutor devido ao curto-circuito.

Se o valor de L calculado pela equação (47) é maior do que o valor de S , significa que os cabos condutores não entram em contacto quando ocorre o curto-circuito e para determinar T , faz-se L constante e igual a S e arbitra-se valores para b do seguinte modo.

Toma-se $b = d/\text{sen}180/n + 0,05H$ e faz-se o cálculo desde o item 5.3.4. Se o valor encontrado for $F_m < F_{me}$, toma-se novo valor de $b = b$ anterior + $0,05H$, faz-se novamente o cálculo desde o item 5.3.4 e assim sucessivamente até encontrar $F_m > F_{m2}$. Uma vez encontrado $F_m > F_{m2}$ pode-se calcular o valor de b que dará $F_m \approx F_{me}$ pela equação (48), demonstrada no apêndice III.

$$b = b_2 + 0,05H \left(\frac{F_{m1} - F_{m2}}{F_{m1} - F_{m2} + F_{m2} - F_{m1}} - 1 \right) \quad (48)$$

onde:

b_2 é o valor de b com o qual se obteve $F_m > F_{m2}$

H é o mesmo definido no item 5.3.2, em cm.

Fm1 é o último valor de Fme calculado com o qual se obteve

$$F_m < F_{me}$$

Fm1 é o último valor de Fm calculado com o qual se obteve

$$F_m < F_{me}$$

Fm2 é o valor de Fm calculado com o qual se obteve

$$F_m > F_{me}$$

Fme2 é o valor de Fme calculado com o qual se obtém

$$F_m > F_{me}$$

Com o valor de b calculado pela equação (48) retorna-se ao item 5.3.4 e calcula-se tudo novamente encontrando $F_m \approx F_{me}$.

Portanto o valor de FE calculado no item 5.3.6 é o acréscimo de tensão - mecânica ou tensão de impacto a que fica sujeito cada cabo condutor de uma fase, por ocasião do curto-circuito.

5.4 - Exemplos numéricos

Exemplo 1

5.4.1 - Dados: cabo C.A.A. 795 M.C.M.

$$I_{rms} = 5,93 \text{ kA}$$

$$n = 2$$

$$l_n = 45 \text{ cm} \quad (\text{distancia entre cabos de mesma fase})$$

$$S = 3.100 \text{ cm}$$

$$A = 4.68269 \text{ cm}^2 \quad (\text{tabela I})$$

$$E = 715700 \text{ kgf/cm}^2 \quad (\text{tabela I})$$

$$d = 2,813 \text{ cm} \quad (\text{tabela I})$$

$$K = 1$$

$$T_o = 1000 \text{ kgf}$$

5.4.2 - Diâmetro do maior e do menor círculo circunscrito aos condutores:

$$H = l_n / \sin 180/n = 45 / \sin 180/2 \quad H = 45 \text{ cm}$$

$$b = d / \sin 180/n = 2,813 / \sin 180/2 \quad b = 2.813 \text{ cm}$$

5.4.3 - Valor da projeção sobre o eixo x da parcela do cabo condutor que não entra em contacto com o cabo condutor oposto:

$$L = 0,05S = 0,05 \times 3.100$$

$$L = 155 \text{ cm}$$

$$5.4.4 - \frac{L}{2} = \frac{155}{2}$$

$$\frac{L}{2} = 77,5 \text{ cm}$$

5.4.5 - Aumento de comprimento do cabo condutor entre dois espaçadores adjacentes.

ΔS é o cosseno do ângulo θ , equações (44) e (45), respectivamente.

$$\frac{\Delta S}{2} = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)^2} - \frac{L}{2} = \sqrt{77,5^2 + \left(\frac{45}{2} - \frac{2.813}{2}\right)^2} - 77,5$$

$$\frac{\Delta S}{2} = 2,81927379 \text{ cm}$$

$$\Delta S = 5,63854 \text{ cm}$$

$$\cos\theta = \frac{\frac{H}{2} - \frac{b}{2}}{\frac{L}{2} + \frac{\Delta S}{2}} = \frac{\frac{45}{2} - \frac{2.813}{2}}{77,5 + 2,811927379}$$

$$\cos\theta = 0,262620651$$

5.4.6 - Tração mecânica necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor, equação (37)

$$FE = \frac{E.A. \Delta S}{S} = \frac{715700 \cdot 4,68269 \cdot 5,63854}{3100}$$

$$FE = 6095,809647 \text{ kgf}$$

5.4.7 - Tensão mecânica total no cabo condutor (tensão estática ou de esticamento mais a necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor), equação (38)

$$T = T_0 + FE = 1000 + 6095,809647$$

$$T = 6095,809647 \text{ kgf}$$

5.4.8 - Foco da parábola, equação (46)

$$p = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2}{4\left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)} = \frac{77,5^2}{4 \frac{45}{2} - \frac{2,813}{2}}$$

$$p = 71,18602887$$

5.4.9 - Força magnética total a que fica sujeito cada cabo condutor por ocasião'

do curto-circuito, equação (42)

$$F_m = (n-1) 0,1731 \cdot K \cdot I_{rms}^2 \sqrt{\frac{p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}}$$

$$F_m = 1 \cdot 0,1731 \cdot 1 \cdot (5,93)^2 \sqrt{\frac{71,18602887}{2,813}} \arctan \sqrt{\frac{155^2}{8 \cdot 71,18602887 \cdot 2,813}}$$

$$F_m = 40,3612925 \text{ kgf}$$

5.4.10- Força magnética que o sistema mecânico (espaçadores e cabos condutores) exige para tomar a configuração considerada, equação (41)

$$F_{me} = 2 T \cos \theta = 2 \cdot 7095,809647 \cdot 0,262620651$$

$$F_{me} = 3727,012297 \text{ kgf}$$

5.4.11- $F_m < F_{me}$

Façamos uma tabela com sucessivos valores de L.

Item	L anterior	L = L ant. +0,05S	FE	T	Fm	Fme
1	-	155	6095,809647	7095,809647	40,3612925	3727,012297
2	155	310	3089,110172	4089,110172	80,7225849	1102,785481
3	310	465	2064,658102	3064,658102	121,0838775	553,8060481
4	465	620	1549,881554	2549,881554	161,44517	346,205507
5	620	775	1240,420537	2240,420537	201,8064625	243,5532846
6	775	930	1033,917361	2033,917361	242,167755	184,1478713

No item 6 encontramos $F_m > F_{me}$

Para determinar o valor mais exato de L pela equação (47), temos:

$$L_2 = 930 \text{ cm}$$

$$S = 3100 \text{ cm}$$

$$F_{me1} = 243,553284 \text{ kgf}$$

$$F_m 1 = 201,8064625 \text{ kgf}$$

$$F_m 2 = 242,167755 \text{ kgf}$$

$$F_{me2} = 184,1478313 \text{ kgf}$$

$$L = L_2 + 0,05S \left(\frac{F_{me1} - F_{m1}}{F_m 2 - F_{m1} + F_{me1} - F_{me2}} - 1 \right)$$

$$L = 1550 + 0,05 \cdot 3100 \left(\frac{243,553284 - 201,8064625}{242,167755 - 201,8064625 + 243,553284 - 184,1478313} \right)$$

$$L = 839,8588597 \text{ cm}$$

L S

Voltemos ao item 5.4.3 com $L = 839,8588597$

$$\frac{L}{2} = \frac{839,8588597}{2} \text{ cm}$$

$$\frac{L}{2} = 419,9294298 \text{ cm}$$

$$\frac{\Delta S}{2} = \sqrt{(419,9294298)^2 + \left(-\frac{45}{2} - \frac{2813}{2}\right)^2} - 419,9294298$$

$$\frac{\Delta S}{2} = 0,52944065 \text{ cm}$$

$$\Delta S = 1,0588814 \text{ cm}$$

$$\cos\theta = \frac{\frac{45}{2} - \frac{2,813}{2}}{419,9294298 + 0,52944065}$$

$$\cos\theta = 0,050167808$$

$$FE = \frac{715700 \cdot 4,68269 \cdot 1,0588814}{3 \cdot 100}$$

$$FE = 1144,753686 \text{ kgf}$$

$$T = 1000 + 1144,753686$$

$$T = 2144,753686 \text{ kgf}$$

$$P = \frac{(419,9294298)^2}{4 \left(\frac{45}{2} - \frac{2,813}{2}\right)}$$

$$P = 2089,98893$$

$$F_m = 1 \cdot 0,1731 \cdot 1 \cdot (5,93)^2 \sqrt{\frac{2089,98893}{2,813}} \arctan \sqrt{\frac{(839,8588597)^2}{8 \cdot 2089,98893 \cdot 2,813}}$$

$$F_m = 218,6954134 \text{ kgf}$$

$$F_{me} = 2 \cdot 2144,753686 \cdot 0,050167808$$

$$F_{me} = 215,1951831 \text{ kgf}$$

$$F_m \cong F_{me}$$

Portanto temos:

- O acréscimo de tensão devido ao curto-circuito ou tensão de impacto em cada um dos cabos condutores de uma fase, $FE = 1144,753686 \text{ kgf}$
- A tensão total a que fica sujeito cada um dos cabos condutores de uma fase, por ocasião do curto-circuito, $T = 2144,753686 \text{ kgf}$
- O acréscimo de tensão devido ao curto-circuito ou tensão de impacto na fase = $n \times FE = 2 \times 1144,753686 = 2289,507372 \text{ kgf}$
- A tensão total na fase por ocasião do curto-circuito = $n \cdot T = 2 \cdot 2144,753686 = 4289,507372 \text{ kgf}$

5.4.12 - Exemplo 2

5.4.13 - Dados: Cabos C.A.A. 795 M.C.M.

$$I_{rms} = 4 \text{ kA}$$

$$n = 3$$

$$l_n = 45,7 \text{ cm}$$

$$S = 1100 \text{ cm}$$

$$A = 4,68269 \text{ cm}^2$$

$$E = 715700 \text{ kgf/cm}^2$$

$$d = 2,813$$

$$K = 1$$

$$T_0 = 1000 \text{ kgf}$$

5.4.14 - Determinação do diâmetro do maior e do menor círculo circunscrito aos condutores (H e b), equação (43)

$$H = \frac{n}{\text{sen } \frac{180}{n}} = \frac{45,7}{\text{sen } \frac{180}{3}}$$

$$H = 52,7698146 \text{ cm}$$

$$b = \frac{d}{\text{sen } \frac{180}{n}} = \frac{2,813}{\text{sen } \frac{180}{3}}$$

5.4.15 - Valor da projeção sobre o eixo dos x da parcela do cabo condutor que não entra em contacto com os outros dois condutores:

$$L = 0,05 S = 0,05 \cdot 1100$$

$$L = 55 \text{ cm}$$

5.4.16 - Determinar $\frac{L}{2}$

$$\frac{L}{2} = \frac{55}{2}$$

$$\frac{L}{2} = 27,5$$

5.4.17 - Aumento de comprimento do cabo condutor entre dois espaçadores adjacentes ΔS e o cosseno do ângulo θ , equações (44) e (45), respectivamente.

$$\frac{\Delta S}{2} = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)^2} - \frac{L}{2} = \sqrt{(27,5)^2 + \left(\frac{52,7698146}{2} - \frac{3,24817261}{2}\right)^2} - 27$$

$$\frac{\Delta S}{2} = 9,504705865 \text{ cm}$$

$$\Delta S = 19,0094173 \text{ cm}$$

$$\cos \theta = \frac{\frac{H}{2} - \frac{b}{2}}{\frac{L}{2} + \frac{\Delta S}{2}} = \frac{\frac{52,7698146}{2} - \frac{3,24817261}{2}}{27,5 + 9,504705865}$$

$$\cos \theta = 0,669126275$$

5.4.18 - Tração mecânica necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor, equação (37).

$$FE = \frac{E \cdot A \cdot S}{S} = \frac{715700 \cdot 4,68269 \cdot 19,0094173}{1100}$$

$$FE = 57916,51446 \text{ kgf}$$

5.4.19 - Tensão mecânica total em cada cabo condutor (tensão estática mais a tensão necessária para ocasionar o aumento ΔS no comprimento do cabo condutor), equação (38).

$$T = T_0 + FE = 1000 + 57916,51446$$

$$T = 58916,51446$$

5.4.20 - Foco da parábola, equação (46)

$$P = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2}{4\left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)} = \frac{(27,5)^2}{4\left(\frac{52,7698146}{2} - \frac{3,24817261}{2}\right)}$$

$$p = 7,635550535$$

5.4.21 - Força magnética total a que fica sujeito cada cabo condutor por ocasião do curto-circuito, equação (42)

$$F_m = (n-1) \cdot 0,1731 - K \cdot I_{rms}^2 \sqrt{\frac{p}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}}$$

$$F_m = (3 - 1) \cdot 0,1731 \cdot 1 \cdot 4^2 \frac{7,635550535}{3,24817261} \arctan \frac{55^2}{8 \cdot 7,635550535} \dots$$

$$\dots \cdot \overline{3,24817261}$$

$$F_m = 11,21107427 \text{ kgf}$$

5.4.22 - Força magnética que o sistema mecânico (espaçadores e cabos condutores) exige para tomar a configuração considerada, equação (41)

$$F_{me} = 2 \cdot T \cdot \cos\theta = 2 \cdot 58916,51446 \cdot 0,669126275$$

$$F_{me} = 78845,17571 \text{ kgf}$$

5.4.23 - $F_m \ll F_{me}$

Como $F_m \ll F_{me}$, fazendo-se $L = S$ encontra-se

$$F_m = 224,2214855 \text{ kgf} \text{ e } F_{me} = 395,281363 \text{ kgf}$$

$$F_m < F_{me}$$

Isto quer dizer que os cabos condutores não entram em contacto por ocasião do curto-circuito, o que implica em variar b até encontrar $F_m > F_{me}$, mantendo L constante e igual a 1100.

$$\text{Façamos } b = b + 0,05H = 3,24817261 + 0,05 \cdot 52,7698146$$

$$b = 5,886663344 \text{ cm.}$$

$$5.4.24 - \frac{\Delta S}{2} = \sqrt{\frac{L^2}{2} + \left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)^2} - \frac{L}{2} = \sqrt{550^2 + \frac{52,7698146}{2} - \frac{5,886663344}{2}} - 550$$

$$\frac{\Delta S}{2} = 0,49932557 \text{ cm.}$$

$$\Delta S = 0,99865114 \text{ cm.}$$

$$\cos\theta = \frac{\frac{H}{2} - \frac{b}{2}}{\frac{L}{2} + \frac{\Delta S}{2}} = \frac{\frac{52,7698146}{2} - \frac{5,886663344}{2}}{550 + 0,49932557}$$

$$\cos\theta = 0,042582387$$

$$5.4.25 - F_E = \frac{E.A. \Delta S}{S} = \frac{715700 \cdot 4,68269 \cdot 0,99865114}{1.100}$$

$$F_E = 3.042,618783$$

$$5.4.26 - T = T_0 + F_E$$

$$T = 1000 + 3042,618783$$

$$T = 4.042,618783 \text{ kgf}$$

$$5.4.27 - P = \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2}{4 \left(\frac{H}{2} - \frac{b}{2}\right)} = \frac{550^2}{4 \left(\frac{52,7698146}{2} - \frac{5,886663344}{2}\right)}$$

$$P = 8226,105667$$

$$5.4.28 - F_m = (n-1) \cdot 0,1731 \cdot K \cdot I_{rms}^2 \sqrt{\frac{P}{b}} \arctan \sqrt{\frac{L^2}{8pb}}$$

$$F_m = (3-1) \cdot 0,1731 \cdot 1 \cdot 4^2 \sqrt{\frac{3226,105667}{5,886663344}} \arctan \dots$$

$$\dots \sqrt{\frac{1100^2}{8 \cdot 3226,105667 \cdot 5,886663344}}$$

$$F_m = 159,53179 \text{ kgf}$$

$$5.4.29 - F_m = 2 \cdot T \cos\theta = 2 \cdot 4042,618783 \cdot 0,042582387$$

$$F_{me} = 344,288715 \text{ kgf}$$

$$5.4.30 - F_m < F_{me}$$

Façamos uma tabela com sucessivos valores de b

b ANTERIOR	b ANTERIOR + 0,05 H	FE	T	Fm	Fme
3,248117261	5,886663344	3042,618783	4042,618783	159,53179	344,288715
5,886663344	8,525154074	2709,924756	3709,924756	128,3536925	298,2031679
8,52514074	11,1636448	2396,466066	3396,466066	109,2387112	256,7508499
11,1636448	13,80213553	2102,247953	3102,247953	96,04427734	219,6574918
13,80213553	16,44062626	1827,275597	2827,275597	86,26226363	186,6484657
16,44062626	19,07911699	1571,553751	2571,553751	78,65391979	157,4487858
19,07911699	21,71760772	1335,08674	2335,08674	72,52857844	131,7831318
21,71760772	24,35609845	1117,87871	2117,87871	67,46711782	109,3758886
24,35609845	26,99458918	919,9333756	1919,9333756	63,19872158	89,9511553
26,99458918	29,63307991	741,25415	1741,25415	59,53970556	73,23277551
29,63307991	32,27157064	581,8441411	1581,844141	56,36057514	58,94436104
32,27157064	34,91006137	441,7059688	1441,7059688	53,56711263	46,80930852

No item 12 encontramos F_m F_{me}

Para determinar um valor mais exato de b pela equação (48), temos:

$$b_2 = 34,91006137 \text{ cm}$$

$$H = 52,7698146 \text{ cm}$$

$$F_{me1} = 58,94436104 \text{ kgf}$$

$$F_{m1} = 56,36057514 \text{ kgf}$$

$$F_{m2} = 53,56711263 \text{ kgf}$$

$$F_{me2} = 46,80930852 \text{ kgf}$$

$$b = b_2 + 0,05H \left(\frac{F_{me1} - F_{m1}}{F_{me1} - F_{me2} + F_{m2} - F_{m1}} - 1 \right)$$

$$b = (34,91006137 + 0,05 \cdot 52,7698146 \dots$$

$$\dots \left(\frac{\dots 58,94436104 - 56,36057514}{58,94436104 - 46,80930852 + 53,56711263 - 56,36057514} - 1 \right)$$

$$b = 33,00134952 \text{ cm.}$$

$$b < H$$

Voltemos ao item 5.4.23 com $b = 33,00134952$

$$\frac{\Delta S}{2} = \sqrt{550^2 + \left(\frac{52,7698146 - 33,00134952}{2} \right)^2} - 550$$

$$\frac{-\Delta S}{2} = 0,08880923 \text{ cm}$$

$$\Delta S = 0,17761846$$

$$\cos\theta = \frac{\frac{52,7698146}{2} - \frac{33,00134952}{2}}{550 + 0,08880923}$$

$$\cos\theta = 0,01796843$$

$$FE = \frac{715700 \cdot 4,68269 \cdot 0,17761846}{1100}$$

$$FE = 541,1552053 \text{ kgf}$$

$$T = 1000 + 541,1552053$$

$$T = 1541,1552053$$

$$P = \frac{550^2}{4 \left(\frac{52,7698146}{2} - \frac{33,00134952}{2} \right)}$$

$$p = 7651,074546$$

$$F_m = (3-1) \times 0,1731 \times 1 \times 4^2 \sqrt{\frac{7651,074546}{33,00134952}} \text{ artcan} \dots$$

$$\dots \sqrt{\frac{1100^2}{8 \cdot 7651,074546 \cdot 33,00134952}}$$

$$F_m = 55,55270994 \text{ kgf}$$

$$F_{me} = 2 \cdot 1541,1552053 \cdot 0,01796843$$

$$F_{me} = 55,38428039 \text{ kgf}$$

$$F_m \cong F_{me}$$

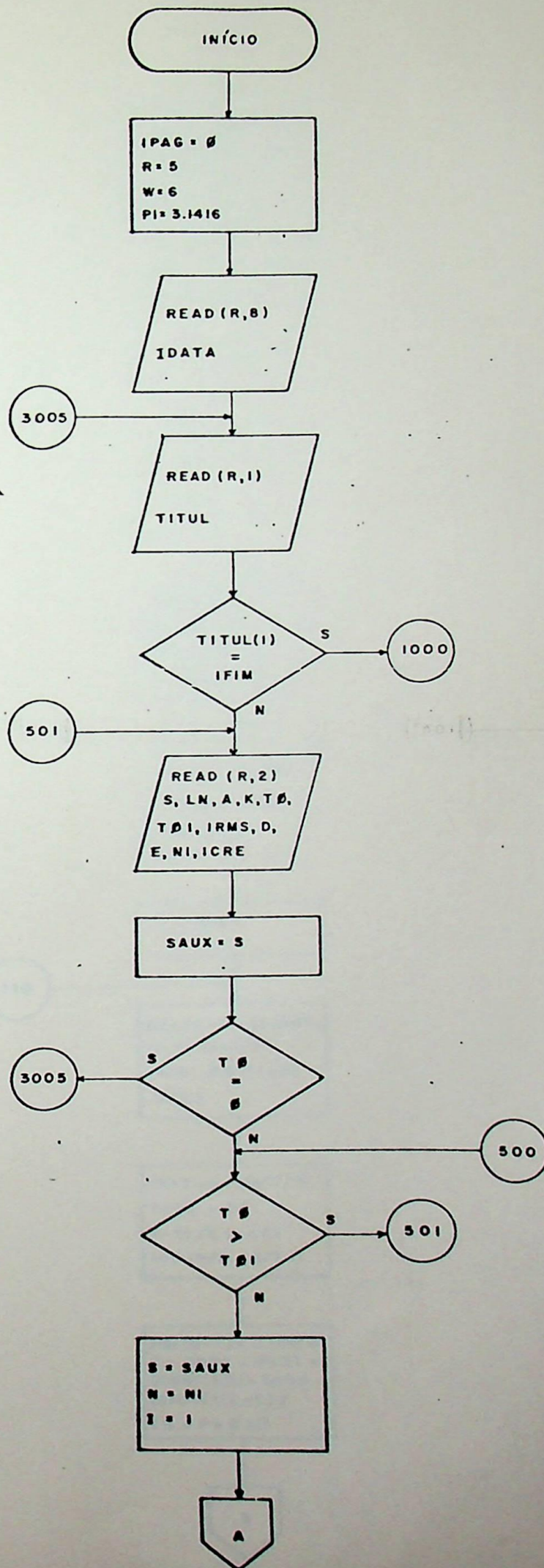
Portanto temos:

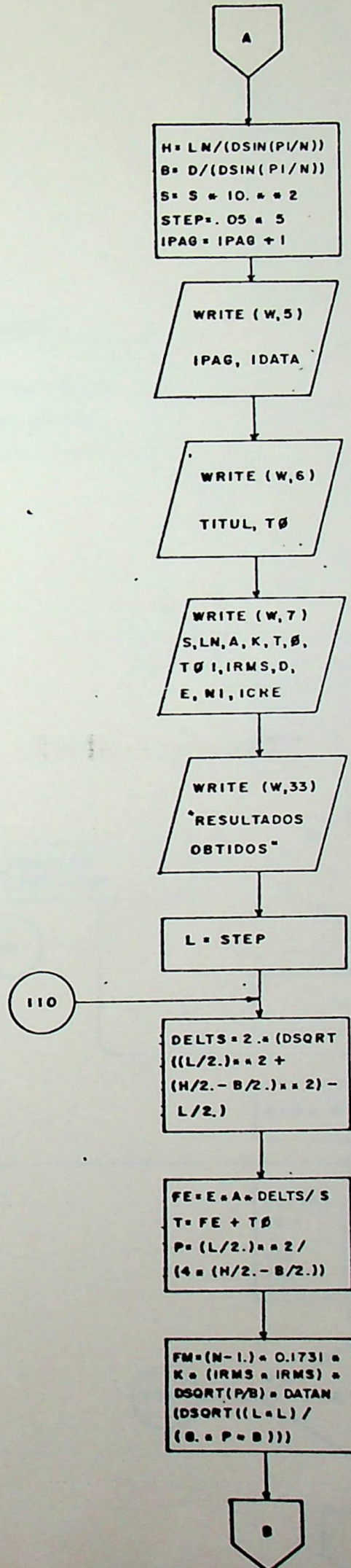
- O acréscimo de tensão devido ao curto-circuito ou tensão de impacto em cada um dos cabos condutores de uma fase,
 $FE = 541,1552053 \text{ kgf}$
- A tensão total a que fica sujeito cada um dos cabos condutores de uma fase, - por ocasião do curto-circuito, $T = 1541,1552053 \text{ kgf}$.
- O acréscimo de tensão devido ao curto-circuito ou tensão de impacto na fase =
 $n \times FE = 3 \times 541,1552053 = 1623,465616 \text{ kgf}$
- A tensão total na fase por ocasião do curto-circuito = $n \times T = 3 \times 1541,1552053$
 $= 4623,465615 \text{ kgf}$.

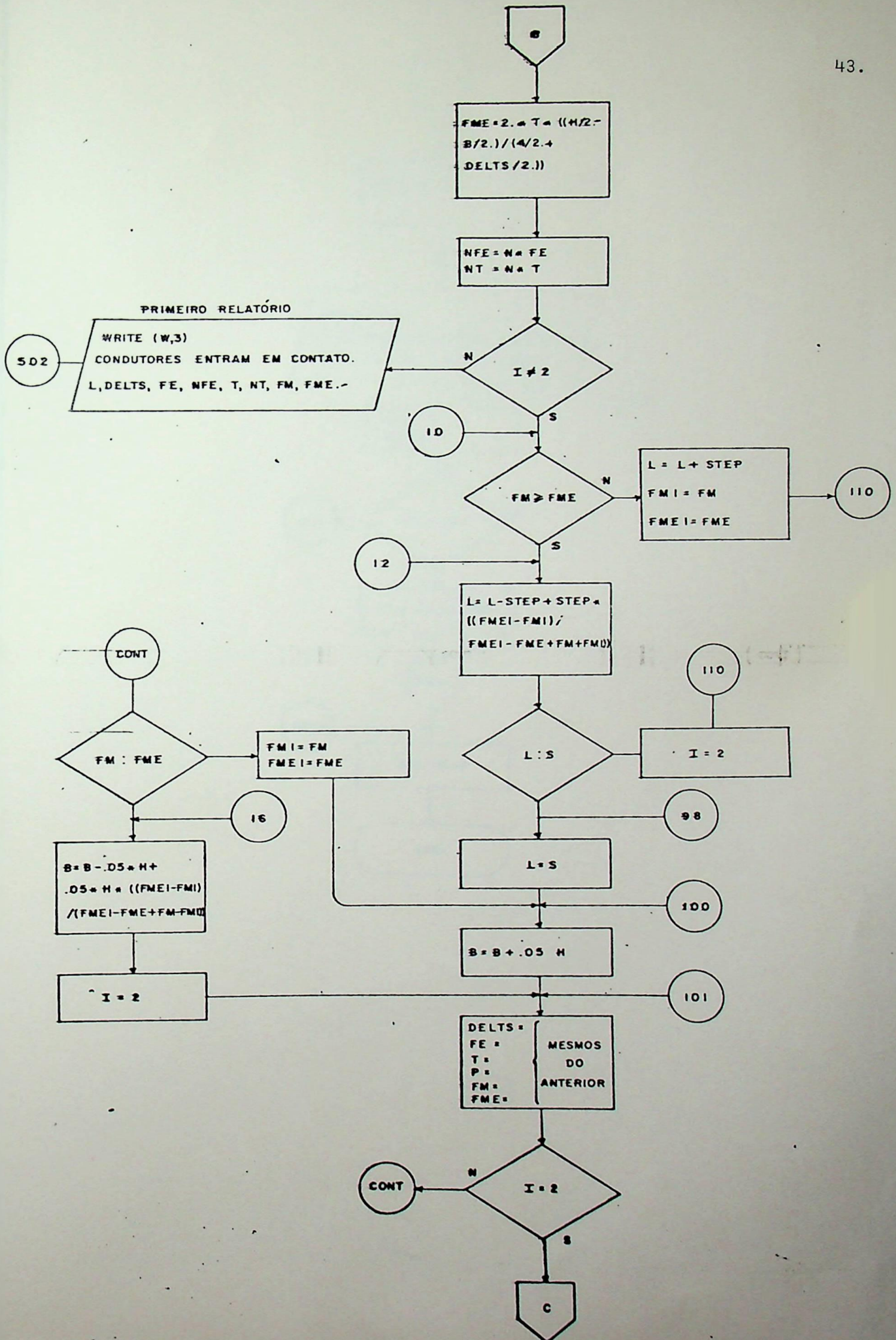
5.5 - CÁLCULOS EFETUADOS ATRAVÉS DE PROGRAMA DIGITAL DE COMPUTADOR.

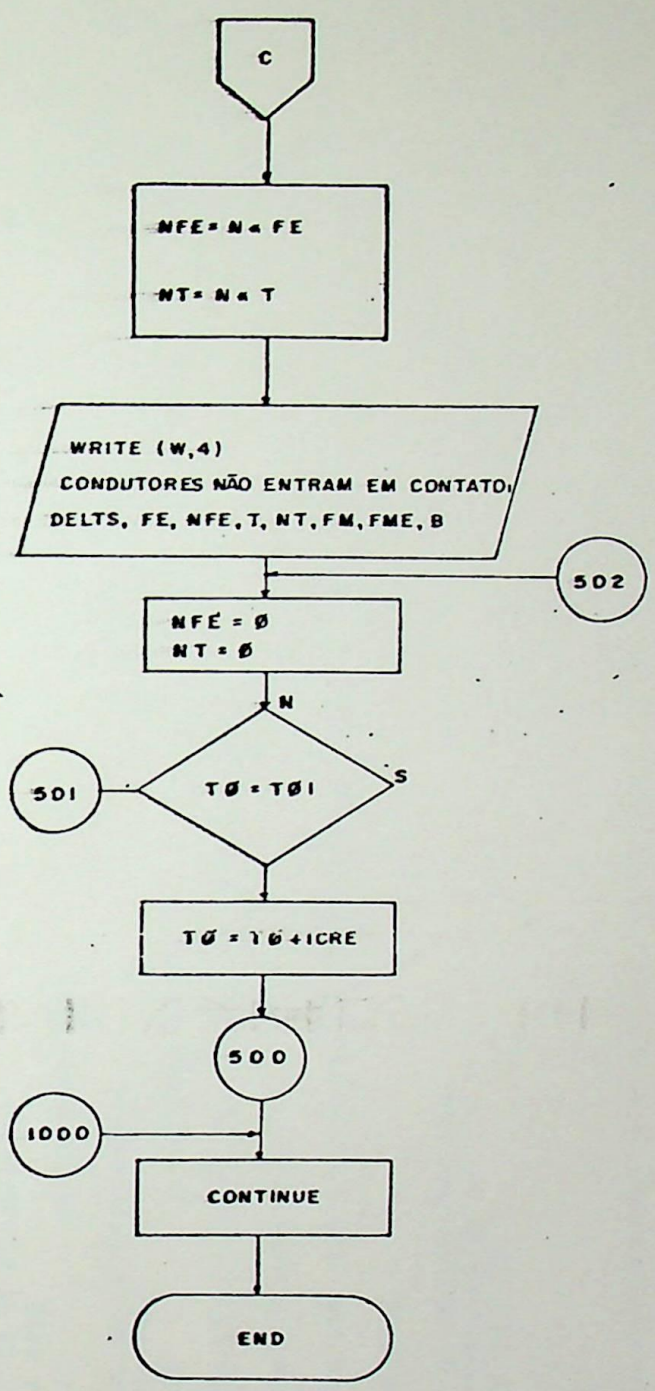
Com o objetivo de dotar o trabalho de maiores recursos para a execução de cálculos típicos no dimensionamento de esforços mecânicos, devido a correntes de curto-circuito, em barramentos com feixe de condutores distribuídos segundo um polígono regular foi desenvolvido um programa digital de computador cujo fluxograma e listagem encontram-se a seguir incorporados ao estudo.

FLUXOGRAMA









FTN4,L
PROGRAM MILAG

DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS EM FEIXE

VARIAVEIS USADAS NO PROGRAMA E SEUS SIGNIFICADOS

S = DISTANCIA ENTRE DOIS ESPACADORES ADJACENTES (METRO)
LN = ESPACAMENTO ENTRE DOIS CONDUTORES ADJACENTES DE UMA FASE (CENTIMETRO)
A = AREA DA SECAO TRANSVERSAL DO CABO CONDUTOR (CENTIMETRO QUADRADO)
K = FATOR DE ESFORCO
T0 = TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO
DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE
(VALEUR LIMITE INFERIOR) (KILOGRAMA-FORCA)
T01 = TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO
DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE
(VALEUR LIMITE SUPERIOR) (KILOGRAMA-FORCA)
IRMS = CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA POR CONDUTOR (KILO-AMPERES)
D = DIÂMETRO DO CABO CONDUTOR (CENTIMETRO)
E = MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CABO CONDUTOR (KILOGRAMA-FORCA/CENT.QUADRADO)
N = NÚMERO DE CONDUTORES POR FASE
ICRE = VARIACAO INCREMENTAL DA TENSÃO ESTÁTICA
INICIAL OU DE ESTICAMENTO ENTRE OS
VALORES ESCOLHIDOS DE T0 E T01

DECLARACAO DAS VARIAVEIS

INTEGER R,W,TITUL,IDATA
DOUBLE PRECISION S,LN,A,K,T0,IRMS,E,D,N,L,H,STEP,DELTS,FE,F,M,FME,
1 T,P,FMEI,FMI,VFE,VT,SAUX,LAUX,BAUX,T01
DIMENSION TITUL(40),IDATA(4)
DATA IF1M/2HF1/
IPAG = 0
DEFINICAO DO COMPUTADOR A SER UTILIZADO
R = 1
W = 3
W = 6

R = 7

0057 C
0058 C
0059 C
0060 C
0061 C
0062 C
0063 C
0064 C
0065 C
0066 C
0067 C
0068 C
0069 C
0070 C
0071 C
0072 C
0073 C
0074 C
0075 C
0076 C
0077 C
0078 C
0079 C
0080 C
0081 C
0082 C
0083 C
0084 C
0085 C
0086 C
0087 C
0088 C
0089 C
0090 C
0091 C
0092 C
0093 C
0094 C
0095 C
0096 C
0097 C
0098 C
0099 C
0100 C
0101 C
0102 C
0103 C
0104 C
0105 C
0106 C
0107 C
0108 C
0109 C
0110 C
0111 C
0112 C

LEITURA DO TITULO
LEITURA DO TITULO
LEITURA DOS PARAMETROS
LEITURA DOS PARAMETROS
501 READ(R,2) S, LV, A, C, IO, IO1, IRMS, O, E, NI, ICRE
2 FORMAT(9D8.2, 2I4)
SAUX = S

IF(TO .EQ. 0) GO TO 3005
500 IF(TO.GT.101) GO TO 501
S = SAUX
N = NI
I = 1

H = LN / (DSIN(3.1416 / N))
B = D / (DSIN(3.1416 / N))
S = S * 10.**2
STEP = .05 * S
IPAG = IPAG + 1
WRITE(W,5) IPAG, IDATA

5 FORMAT(1H1, 131(1H*), /, 14X, 87HD E P A R T A M E N T O D E P R O J
1 E T O S J E S U B E S T A C O E S - O T / P S, 17X, 9HFOLHA
2 , 13., /, 10X, 98-DIMENSIONAMENTO DE BARRAMENTOS EM FEIXE - ESFORÇOS
3 MECANICOS DEVIDOS A CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO, 8X, 6HDATA
4 , 4A2, /, 132(1H*), /)

WRITE(W,6) TITUL, TO
6 FORMAT(1H0, 10X, 40A2, 9H COM TO =, F8.2)

IMPRESSAO DOS VALORES LIDOS E CALCULADOS

WRITE(W,7) S, LV, A, K, TO, IO1, IRMS, O, E, NI
7 FORMAT(1H0, 10X, 15-DADOS FORNECIDOS, /, 14X, 58HS = D
3ISTANCIA ENTRE DOIS ESPACADORES ADJACENTES, 29X, F7.2, 3H CM, /, /,
4 14X, 59H-N = ESPACAMENTO ENTRE DOIS CONDUTORES ADJACENT
5ES, 28X, F7.2, 3H CM, /, /, 14X, 58HA = AREA DA SECAO TRAN
6SVERSAL DO CABO CONDUTOR, 28X, F8.5, 4H CM2, /, /, 14X, 31HK = TENSAO ESTATI
7 FATOR DE ESFORCO, 59X, F4.2, /, /, 14X, 56HTO = TENSAO ESTATI
8CA INICIAL OJ DE ESTICAMENTO, /, 29X, 28H-DE CADA CONDUTOR DE UMA FA
9SE, /, 29X, 27H-(VALOR LIMITE INFERIOR) KGF, 44X, F8.2, /, /,
1 14X, 56HTO1 = TENSAO ESTATICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO, /
2, 29X, 28H-DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE, /, 29X, 27H-(VALOR LIMITE SU
3PERIOR) KGF, 44X, F8.2, /, /, 14X, 69HIRMS=
IRRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMETRICA POR CABO CONDUTOR, 18X, F7.2, 3H
2 KA, /, /, 14X, 40HD = DIAMETRO DO CABO CONDUTOR, 48X,
3 F7.2, 3H CM, /, /,
5 14X, 54HE = MODULO DE ELASTICIDADE DO CABO CONDUTCR,
6 30X, F10.2, 8H KGF/CM2, /, /, 14X, 44HV = NUMERO DE CONDUTORE
7S POR FASE, 46X, I11
WRITE(W,44) ICRE
44 FORMAT(1H0, 13X, 54HICRE=

VARIACAO INCREMENTAL DA TENSAO ES



```

11 ATICA,/,29X,34-INITIAL OU DE ESTICAMENTO ENTRE OS,/,29X,30-VALORE
25 ESCOLTIÇOS DE TO E TO1,43X,13,/)
WRITE(W,33)
33 FORMAT(10,10X,14-RESULTADOS ORTIÇOS)
-----
COMP. COND. QUE NAQ ENTRAM EM CONTATO DURANTE CURTO-CIRC.
-----
L = STEP.
110 DELTS = 2.*(DSQRT((L/2.))**2 + (1/2.-B/2.))**2) - L/2.)
-----
FE = FORÇA PARA CAUSAR MUDANCA NO COMPRIMENTO
-----
FE = E*A*DELTS/S
T = FE + I0
P = (L/2.))**2/((4*(1/2.-B/2.))
-----
FM = FORÇA MAGNETICA DE ATRACAO
-----
FM = (N-1.)*Q.17314*(18MS*18MS)*
1 DSQRT(2/3) *DATA(DSQRT((L*L)/ (8.*P*B)))
-----
FME = FORÇA MAG. QUE Q SIST. MEC. EXIGE P/ TOMAR A CONFIG. DESEJADA
-----
FME = 2. * T * ((1/2.-B/2.)) / (L/2.+DELTS/2.))
-----
CALCULO DE NFE E NT
NFE = N * FE
NT = N * I
IF(I.NE.2) GO TO 10
-----
IMPRESSAO DO PRIMEIRO RELATORIO
-----
WRITE(W,3) L,DELTS,FE,NFE,I,NT,FM,FME
3 FORMAT(10,40X,52HC Q N D U T O R E S E N T R A M E M C O N T A
1 T O,/,30X,41-COMPRIMENTO DOS CONDUTORES QUE NAQ ENTRAM,/,30X,
2 40-EM CONTATO, POR OCASIAO DO CURTO-CIRCUITO,12X,6HL = ,F12.5,
3 34 CM,/,30X, 34-MUDANCA NO COMPRIMENTO DO CONDUTOR,14X,11-DELTS
4 = ,F11.5,34 CM,/,30X, 42-TENSÃO DE IMPACTO POR CONDUTOR DE UM
5A FASE, 9X,4FE =,5X, F10.4, 4H KGF,/,30X,26-TENSÃO DE IMPACTO PO
6R FASE,21X, 84N X FE =,5X, F10.4,44 KGF,/,30X,37-TENSÃO TOTAL POR
7 CONDUTOR DE UMA FASE,15X,3HT =,5X,F10.4,44 KGF,/,30X,21-TENSÃO T
8OTAL POR FASE,27X,124N X T = ,F10.4,44 KGF,/,30X,26-FORÇA MAGN
9ETICA DE ATRACAO,125X,9HF4 = ,F10.4,44 KGF,/,30X,38-FORÇA MAGNE
11ICA QUE Q SISTEMA MECANICO,/,30X,43-EXIGE PARA TOMAR A CONFIGURAC
2AQ CONSIDERADA,7X,5FME =,5X,F10.4,44 KGF)
-----
GO TO 502
10 IF(FM.GE.FME) GO TO 12
L = L + STEP
FM1 = FM
FME1 = FME
GO TO 110
12 L = L - STEP +STEP*(FME1-FM1)/(FME1-FME+FM-FM1)
-----

```

0113
0114
0115
0116
0117
0118
0119
0120
0121
0122
0123
0124
0125
0126
0127
0128
0129
0130
0131
0132
0133
0134
0135
0136
0137
0138
0139
0140
0141
0142
0143
0144
0145
0146
0147
0148
0149
0150
0151
0152
0153
0154
0155
0156
0157
0158
0159
0160
0161
0162
0163
0164
0165
0166
0167
0168

```

0169 IF(L-S) 97,97,98
0170 I = 2
0171 GO TO 110
0172 L = S
0173 100 B = R + .05*I
0174 101 DELTS = 2.*(DSQRT(L/2.))*2+ (H/2.-3/2.)*2) - L/2. )
0175 FE = E*A*DELTS/S
0176 T = FE + T0
0177 P = (L/2.)*2 / (4*(H/2.-8/2.))
0178 FM = (N-1.)*0.1731*(IRMS*IRMS)*
0179 1 DSQRT(P/3) *DATAV(DSQRT((L*L)/ (8.*P*B)))
0180 FME = 2. * T * ((H/2.-3/2.) / (L/2. + DELTS/2.))
0181 IF(T.EQ.2) GO TO 13
0182 IF(FM.GE.FME) GO TO 16
0183 FM1 = FM
0184 FME1 = FME
0185 GO TO 100
0186 16 B = R -.05*I+.05*I*(FME1-FM)/(FME1-FME+FM-FM1))
0187 I = 2
0188 GO TO 101
0189 C
0190 C IMPRESSAO DO SEGUNDO RELATORIO
0191 C -----
0192 13 NFE = N * FE
0193 NT = N * T
0194 WRITE(W,4) DELTS,FE,NFE,T,NT,FM,FME,B
0195 4 FORMAT(1H0,36X,59HC O N D U T O R E S N A O E N T R A M E M C
0196 10 V T A T O,/,/,
0197 2 30X,34+MUJANCA VO COMPRIMENTO DO CONDUTOR,17X,10HDELTS = ,F10.5
0198 3,4H CM,/,/,
0199 4 30X,42HTENSAD DE IMPACTO POR CONDUTOR DE UMA FASE,12X,7HFE = ,
0200 5 F10.4,5H KGF,/,/,
0201 6 30X,26HTENSAD DE IMPACTO POR FASE,24X,11HN X FE = ,F10.4,
0202 7 5H KGF,/,/,
0203 8 30X,37HTENSAD TOTAL POR CONDUTOR DE UMA FASE,18X,6HT = ,F10.4,
0204 9 5H KGF,/,/,
0205 1 30X,21HTENSAD TOTAL POR FASE,30X,10TV X T = ,F10.4,5H KGF,/,/,
0206 2 30X,26FORCA MAGNETICA DE ATRACAO,28X,7HFM = ,F10.4,5H KGF,/,/,
0207 3 30X,38FORCA MAGNETICA QUE O SISTEMA MECANICO,/,
0208 4 30X,43HEXIGE PARA TOMAR A CONFIGURACAO CONSIDERADA,10X,8HFME =
0209 5,F10.4,5H KGF,/,/,
0210 6 30X,50DIAMETRO DO MENOR CIRCULO CIRCUNSCRITO AO POLIGONO,/,
0211 7 30X,46FORMADO PELOS CONDUTORES DE UMA FASE DURANTE 0,/,
0212 8 30X,14CURTO-CIRCUITO,41X,6HB = ,F10.5,4H CM)
0213 502 NFE = 0
0214 NT = 0
0215 IF(TO.EQ.T01) GO TO 501
0216 TO = T0 + ICRE
0217 GO TO 500
0218 C
0219 C 1000 CONTINUE
0220 END
0221

```

** NO ERRORS** PROGRAM = 02840 COMMON = 00000



* EXEMPL 1 - CABO 795 MCM COM T0 = 1000.00

DADOS FORNECIDOS

S = DISTANCIA ENTRE DOIS ESPACADORES ADJACENTES 3100.00 CM
 LN = ESPACAMENTO ENTRE DOIS CONDUTORES ADJACENTES 45.00 CM
 A = AREA DA SECAO TRANSVERSAL DO CABO CONDUTOR 4.68269 CM2
 K = FATOR DE ESFORÇO 1.00
 T0 = TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE (VALOR LIMITE INFERIOR) KGF 1000.00
 T01 = TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE (VALOR LIMITE SUPERIOR) KGF 1000.00
 IRMS = CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA POR CABO CONDUTOR 5.93 KA
 D = DIÂMETRO DO CABO CONDUTOR 2.81 CM
 E = MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CABO CONDUTOR 715700.00 KGF/CM2
 N = NÚMERO DE CONDUTORES POR FASE 2
 ICRE = VARIACÃO INCREMENTAL DA TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO ENTRE OS VALORES ESCOLHIDOS DE T0 E T01 0

RESULTADOS OBTIDOS

C O N D U T O R E S E N T R A M E M C O N T A T O

COMPRIMENTO DOS CONDUTORES QUE NÃO ENTRAM EM CONTATO POR OCASIAO DO CURTO-CIRCUITO L = 839.98213 CM
 MUÇANCA NO COMPRIMENTO DO CONDUTOR DELTS = 1.05873 CM
 TENSÃO DE IMPACTO POR CONDUTOR DE UMA FASE FE = 1144.5858 KGF
 TENSÃO DE IMPACTO POR FASE N X FE = 2289.1716 KGF
 TENSÃO TOTAL POR CONDUTOR DE UMA FASE T = 2144.5858 KGF
 TENSÃO TOTAL POR FASE N X T = 4289.1716 KGF
 FORÇA MAGNÉTICA DE ATRACAO FM = 218.7275 KGF
 FORÇA MAGNÉTICA QUE O SISTEMA MECÂNICO EXIGE PARA TOMAR A CONFIGURACAO CONSIDERADA FME = 215.1468 KGF

* EXEMPLO 2 - CABO 795 MCM

COM T0 = 1000.00

DADOS FORNECIDOS

S = DISTANCIA ENTRE DOIS ESPACADORES ADJACENTES 1100.00 CM
 LN = ESPACAMENTO ENTRE DOIS CONDUTORES ADJACENTES 45.70 CM
 A = AREA DA SECAO TRANSVERSAL DO CABO CONDUTOR 4.68269 CM2
 K = FATOR DE ESFORCO 1.00
 T0 = TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE (VALOR LIMITE INFERIOR) KGF 1000.00
 T01 = TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO DE CADA CONDUTOR DE UMA FASE (VALOR LIMITE SUPERIOR) KGF 1000.00
 IRMS = CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA POR CABO CONDUTOR 4.00 KA
 D = DIÂMETRO DO CABO CONDUTOR 2.81 CM
 E = MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CABO CONDUTOR 715700.00 KGF/CM2
 N = NÚMERO DE CONDUTORES POR FASE 3
 ICRE = VARIACAO INCREMENTAL DA TENSÃO ESTÁTICA INICIAL OU DE ESTICAMENTO ENTRE OS VALORES ESCOLHIDOS DE T0 E T01 0

RESULTADOS OBTIDOS

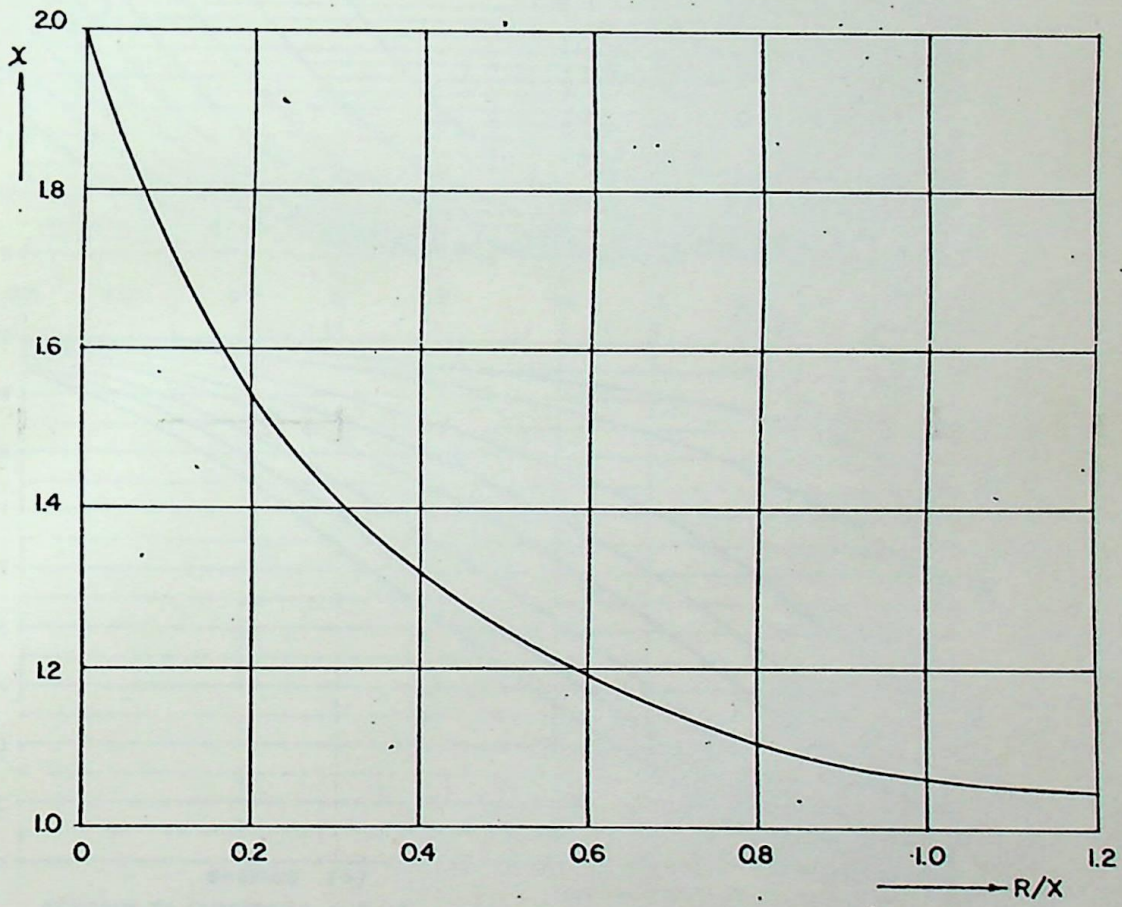
C O N D U T O R E S N A O E N T R A M E M C O N T A T O
 MUDANCA NO COMPRIMENTO DO CONDUTOR DELTS = .17762 CM
 TENSÃO DE IMPACTO POR CONDUTOR DE UMA FASE FE = 541.1569 KGF
 TENSÃO DE IMPACTO POR FASE N X FE = 1623.4707 KGF
 TENSÃO TOTAL POR CONDUTOR DE UMA FASE T = 1541.1569 KGF
 TENSÃO TOTAL POR FASE N X T = 4623.4707 KGF
 FORÇA MAGNÉTICA DE ATRACAO FM = 55.5529 KGF
 FORÇA MAGNÉTICA QUE O SISTEMA MECÂNICO EXIGE PARA TOMAR A CONFIGURACAO CONSIDERADA FME = 55.3844 KGF
 DIÂMETRO DO MENOR CIRCULO CIRCUNSCRITO AO POLIGONO FORMADO PELOS CONDUTORES DE UMA FASE DURANTE O CURTO-CIRCUITO B = 33.00124 CM

TABELA 1

CARACTERÍSTICAS DOS CABOS C.A.A.

BITOLA DO CABO (AWG ou M.C.M.)	2	1/0	2/0	4/0	336,4	636	795	795	954	954	954	954
PÊSO PRÓPRIO (m)	6/1	6/1	6/1	6/1	26/7	26/7	26/7	26/7	45/7	45/7	45/7	54/7
DIÂMETRO (d)	SPARROW	RAVEN	QUAIL	PENGUIN	LINNET	GROSBEAK	DRAKE	TERN	RAIL	CARDINAL		
ÁREA DA SEÇÃO TRANSVERSAL (A)	0,001358	0,002163	0,00272	0,00433	0,00689	0,013027	0,01628	0,013337	0,016004	0,01828		
	0,801	1,011	1,135	1,431	1,829	2,516	2,813	2,701	2,959	3,038		
MÓDULO DE ELASTICIDADE FINAL (E)	0,39235	0,62405	0,78596	1,25027	1,97914	3,74405	4,68269	4,3066	5,1683	5,45767		
	0,3363	0,5349	0,67368	1,07166	1,70222	3,2201	4,02714	4,0283	4,8340	4,83138		
CALOR ESPECÍFICO DO ALUMÍNIO (C)	812.000	795.800	795.800	795.800	764.900	715.700	715.700	668.000	668.000	667.950		
DENSIDADE OU MASSA ESPECÍFICA DO ALUMÍNIO A 20°C (γ)	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214		
RESISTIVIDADE A 20 °C (ρ)	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703	2,703		
COEFICIENTE DE VARIÇÃO DA RESISTÊNCIA POR °C A 20°C (α)	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264	0,028264		
CARGA DE RUPTURA	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403	0,00403		
	1.290	1.988	2.403	3.786	6.392	11.428	14.289	10.013	11.750	15.345		

FIG 1 - FATOR X



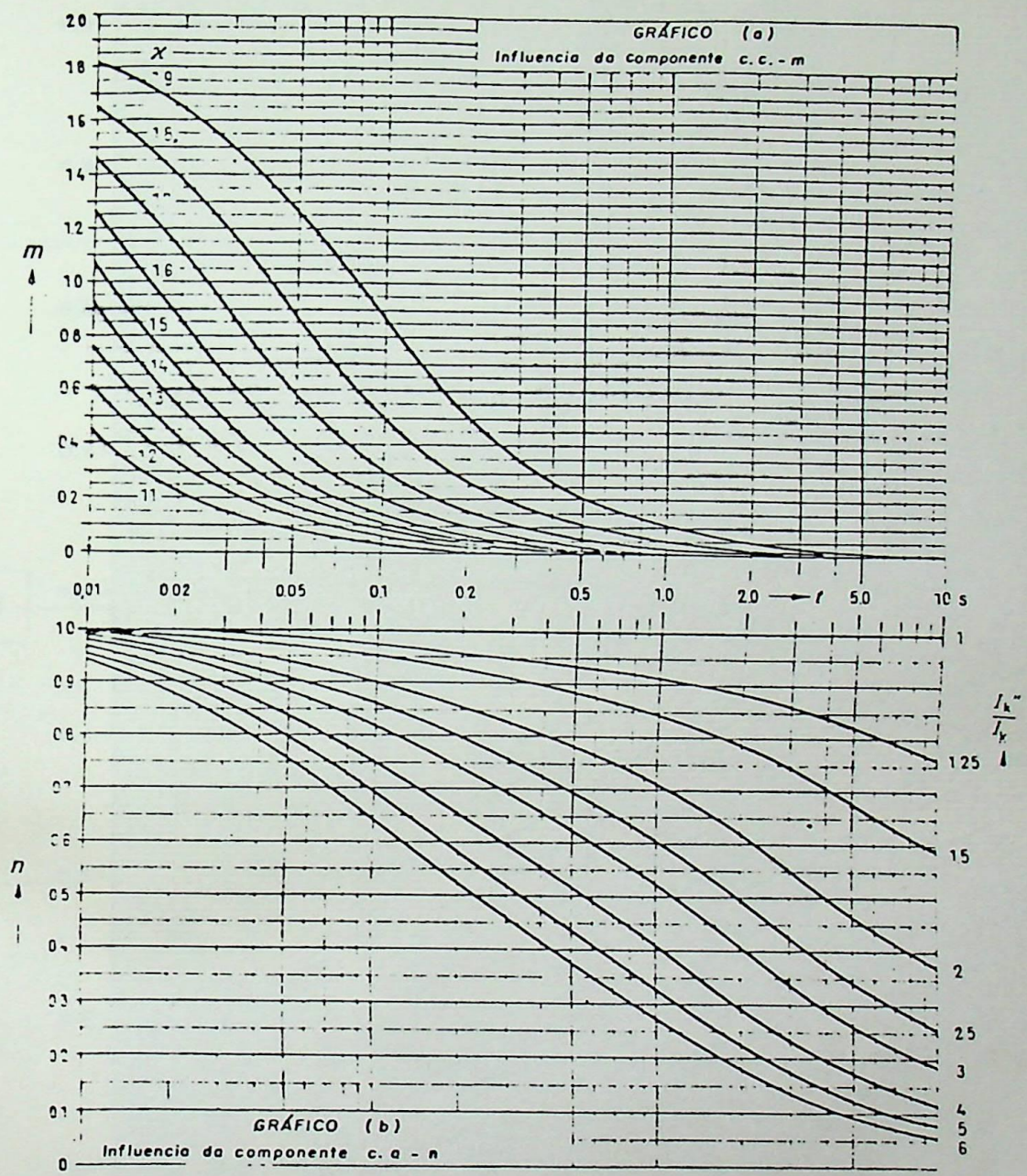


Fig. 2
Determinação da corrente efetiva média (I_{kef}) durante o estado transitório da corrente de curto circuito, relativo a esforços térmicos.

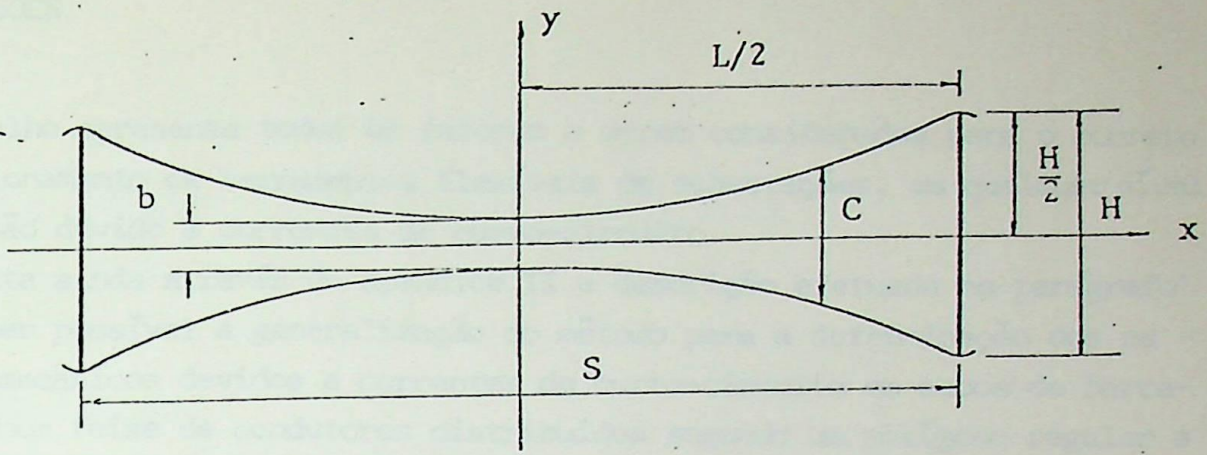


Figura 4

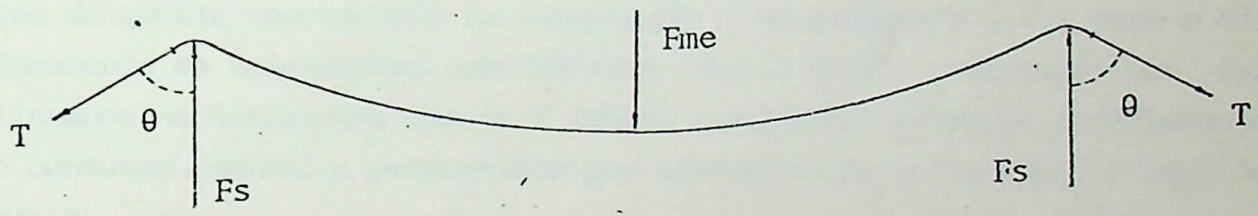


Figura 5

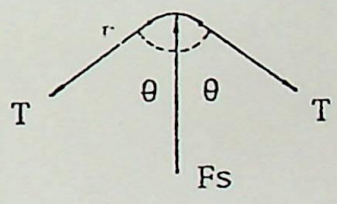


Figura 6

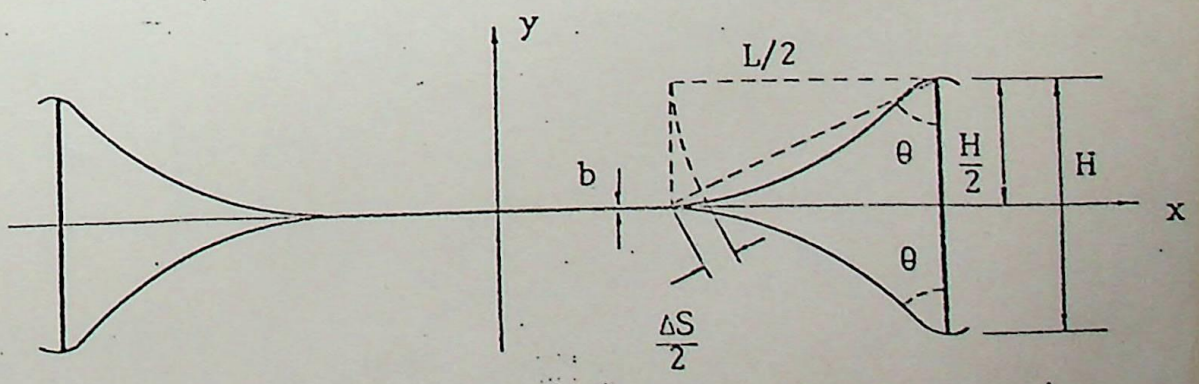


Figura 7

6.0 - CONCLUSÕES

O trabalho apresenta todos os fatores a serem considerados para o correto dimensionamento de barramentos flexíveis de subestações, em qualquer nível de tensão devido a correntes de curto-circuito.

Apresenta ainda através do apêndice II e descrição efetuada no parágrafo 5.2.1 ser possível a generalização do método para a determinação dos esforços mecânicos devidos a correntes de curto-circuito em cabos de barramentos com feixe de condutores distribuídos segundo um polígono regular a partir de barramentos constituídos por 2 (dois) cabos condutores por fase (geminados).

Deve-se para esta generalização tomar-se os cuidados explicitados no parágrafo 5.2.1.

Deve-se também ser considerada como de maior interesse prático a constituição do modelo apresentado na observação 3 do parágrafo 5.2.1 para o dimensionamento de barramentos constituídos por 3 (três) condutores por fase alinhados na horizontal com os 2 (dois) condutores externos equidistantes do condutor central e percorridos por correntes de intensidade e sentidos iguais.

Maior desenvolvimento deste trabalho poderia ser obtido a partir de medições efetuadas em testes de recepção de novas instalações confrontando-as com os cálculos executados através da sistemática aqui apresentada.

APÊNDICE ITRANSFORMAÇÃO ADIABÁTICA - DEMONSTRAÇÃO DA EQUAÇÃO (7)1 - Equações de energia

Pela lei de Joule a energia elétrica E_1 transformada em calor por comprimento unitário de condutor no intervalo de tempo $t - t_0$ é dada pela equação:

$$E_1 = \int_{t_0}^t r i^2 dt \quad (1) \quad E_1 - [J/m]$$

r - resistência por comprimento unitário $[\Omega/m]$

i - corrente instantânea $[A]$

t - tempo $[s]$

Ainda, a energia E_2 necessária para elevar a temperatura do comprimento unitário de condutor de dT é:

$$E_2 = \int_{T_1}^{T_{max}} 4,184 \cdot w \cdot c \cdot dT$$

onde: $E_2 - [J/m]$

4,184 - equivalente mecânico do calor $[J/cal]$

w - massa do comprimento unitário $[g/m]$

c - calor específico $[cal/gr. ^\circ C]$

T_{max} - temperatura final $[^\circ C]$

T_1 - temperatura inicial $[^\circ C]$

2 - Transformação Adiabática

Desde que a duração de uma falta no barramento é normalmente muito curta, podemos supor que durante a ocorrência de curto-circuito, nenhum calor é trocado

cado entre o cabo e o ambiente (transformação adiabática). Nestas circunstâncias, temos:

$$E1 = E2 \int_{t_0}^t ri^2 dt = \int_{T_1}^{T_{max}} 4,184.w.c.dT$$

$$\text{ou ainda} \int_{t_0}^t i^2 dt = \int_{T_1}^{T_{max}} \frac{4,184.w.c}{r} dT \quad (3)$$

Porém $r = \frac{\rho}{A}$ (4) onde ρ - resistividade do condutor em $\left[\frac{(\Omega \times \text{mm}^2)}{\text{m}} \right]$

A - área da seção reta do condutor $[\text{mm}^2]$

$$\text{Ainda } \rho_T = \rho_{T_1} \left[1 + \alpha (T - T_1) \right] \quad (5)$$

Entrando com o valor de ρ_T dado em (5), em (4) teremos:

$$r = \frac{\rho_{T_1} \left[1 + \alpha (T - T_1) \right]}{A} \quad (6)$$

Substituindo em (3) o valor de r dado em (6)

$$\int_{t_0}^t i^2 dt = \int_{T_1}^{T_{max}} \frac{4,184.w.c.A.}{\rho_{T_1} \left[1 + \alpha (T - T_1) \right]} dT$$

Solução das integrais

Considerando que a corrente de curto-circuito instantânea i , do ponto de vista de efeito térmico, é igual a I_{kef} determinada pela equação (9) do texto, teremos:

$$\int_{t_0}^t i^2 dt = \int_{t_0}^t I_{kef}^2 dt = I_{kef}^2 \cdot t \int_{t_0}^t = I_{kef}^2 (t - t_0)$$

para $t_0 = 0$

$$\int_{t_0}^t i^2 dt = I_{\text{kef}}^2 \cdot t$$

$$\int_{T_1}^{T_{\text{max}}} \frac{4,184 \text{ w.c.} \cdot A}{\rho_{T_1} [1 + \alpha(T - T_1)]} dT = \frac{4,184 \text{ w.c.} \cdot A}{\rho_{T_1}} \int_{T_1}^{T_{\text{max}}} \frac{1}{\alpha T + (1 - \alpha T_1)} dT =$$

$$= \frac{4,184 \text{ w.c.} \cdot A}{\rho_{T_1}} \times \left[\frac{1}{\alpha} \ln(\alpha T + 1 - \alpha T_1) \right]_{T_1}^{T_{\text{max}}} =$$

$$= \frac{4,184 \text{ w.c.} \cdot A}{\rho_{T_1}} \cdot \frac{1}{\alpha} \ln(1 + \alpha(T_{\text{max}} - T_1))$$

logo:

$$I_{\text{kef}}^2 \cdot t = \frac{4,184 \text{ w.c.} \cdot A}{\rho_{T_1} \cdot \alpha} \ln \left[1 + \alpha(T_{\text{max}} - T_1) \right] \quad (7)$$

temos ainda que: $w = \frac{M}{L}$ e

$$M = \gamma \cdot V = \gamma \cdot A \cdot L$$

$$\text{Portanto: } w = \frac{\gamma \cdot A \cdot L}{L} = \gamma \cdot A \quad (8)$$

onde: M - massa do condutor [g]

L - comprimento do condutor [m]

γ - densidade ou massa específica do condutor em

$$\left[\frac{\text{gr}}{\text{mm}^2} \cdot \text{m} \right] = \left[\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right]$$

Entrando com (8) em (7)

$$I_{\text{kef}}^2 \cdot t = \frac{4,184 \cdot \gamma \cdot e \cdot A^2}{\rho_{T_1} \cdot \alpha} \ln \left[1 + \alpha(T_{\text{max}} - T_1) \right]$$

Explicitando A e expressando I_{kef} em kA tem-se:

$$A^2 = \frac{10^6 I_{\text{kef}}^2 \cdot t}{4,184 \cdot \frac{\gamma \cdot e}{\rho_{T_1}} \ln \left[1 + \alpha(T_{\text{max}} - T_1) \right]}$$

$$A = \frac{1000 \cdot I_{kef} \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{4,184 \cdot \frac{\gamma \cdot c}{\rho T_1 \cdot \alpha} \ln [1 + \alpha(T_{max} - T_1)]}}$$

INDICADORES DA EFICIÊNCIA

Temperatura média da superfície do corpo aquecido, T_s , é dada por:



Figura 1

Índice de eficiência, η , é dado por:

As cargas que entram no sistema são iguais para todos os corpos, portanto, pelas condições que podem ser estabelecidas, a carga para todos eles, portanto, desta análise para o sistema.

A resistência dos corpos que entram sobre o sistema é, então, a mesma de centro de circuito elétrico, visto as condições, no sentido de potência para o sistema e igual ao valor dado para o corpo (1).

$$R_{el} = \sqrt{(R_{max})^2 + (R_{min})^2} \quad (1)$$

APENDICE II

DEMONSTRAÇÃO DA EQUAÇÃO (42)

Tomemos um feixe de n condutores distribuídos segundo um polígono regular, cada um sendo percorrido por uma corrente I de mesmo valor e sentido, figura 1.

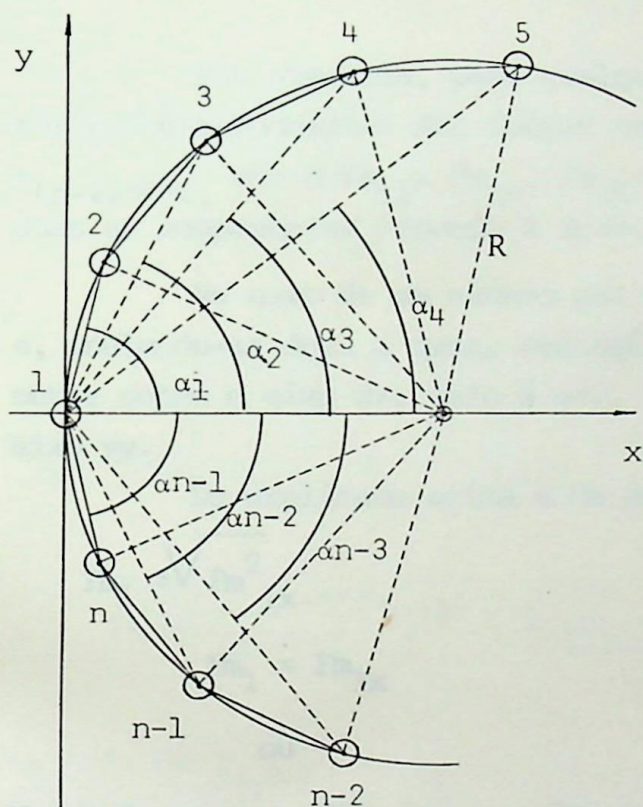


FIGURA 1

Feixe de Condutores Distribuídos
Segundo um Polígono Regular,

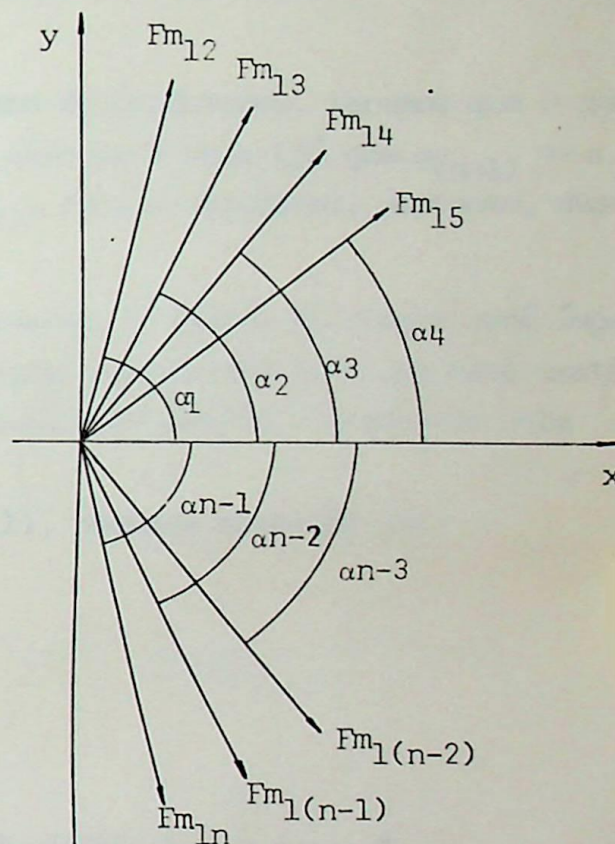


FIGURA 1A

Diagrama de Forças da Figura 1.

As forças magnéticas de atração que atuam sobre cada condutor, ocasionadas pelas correntes que passam nos outros $n-1$, será igual para todos eles, portanto - basta analisarmos para o condutor 1.

A resultante das forças que atuam sobre o condutor 1, será na direção do centro do círculo circunscrito ao polígono, no sentido do ponto 1 para o centro' e igual ao valor dado pela equação (1).

$$F_{m1} = \sqrt{(\sum F_{m1x})^2 + (\sum F_{m1y})^2} \quad (1)$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_{m_{1x}} = F_{m_{12}} \cos \alpha_1 + F_{m_{13}} \cos \alpha_2 + F_{m_{14}} \cos \alpha_3 + F_{m_{15}} \cos \alpha_4 + \dots + \\ \quad F_{m_{1(n-2)}} \cos \alpha_{(n-3)} + F_{m_{1(n-1)}} \cos \alpha_{(n-2)} + F_{m_{1n}} \cos \alpha_{(n-1)} \\ \\ \Sigma F_{m_{1y}} = F_{m_{12}} \operatorname{sen} \alpha_1 + F_{m_{13}} \operatorname{sen} \alpha_2 + F_{m_{14}} \operatorname{sen} \alpha_3 + F_{m_{15}} \operatorname{sen} \alpha_4 + \dots + \\ \quad F_{m_{1(n-2)}} \operatorname{sen} \alpha_{(n-3)} + F_{m_{1(n-1)}} \operatorname{sen} \alpha_{(n-2)} + F_{m_{1n}} \operatorname{sen} \alpha_{(n-1)} \end{array} \right.$$

Por simetria, para qualquer número de condutores, teremos que o somatório das componentes das forças segundo o eixo yy é nula (já que: $\alpha_{(n-1)} = -\alpha_1$, $\alpha_{(n-2)} = -\alpha_2$, etc e $F_{m_{12}} = F_{m_{1n}}$, $F_{m_{13}} = F_{m_{1(n-1)}}$, etc, anulando-se, portanto, duas a duas as componentes segundo o eixo yy).

No caso de um número par de condutores, o número de forças será ímpar e, anulando-se duas a duas, restará uma. Basta lembrar que esta uma está exatamente sobre o eixo xx , isto é $\alpha = 0$, tendo, conseqüentemente, componente nula no eixo yy .

Do explicado acima e da equação (1), podemos escrever que:

$$F_{m_1} = \sqrt{F_{m_{1x}}^2}$$

$$F_{m_1} = F_{m_{1x}}$$

ou

$$F_{m_1} = F_{m_{12}} \cos \alpha_1 + F_{m_{13}} \cos \alpha_2 + F_{m_{14}} \cos \alpha_3 + F_{m_{15}} \cos \alpha_4 + \dots + \\ F_{m_{1(n-2)}} \cos \alpha_{(n-3)} + F_{m_{1(n-1)}} \cos \alpha_{(n-2)} + F_{m_{1n}} \cos \alpha_{(n-1)} \quad (2)$$

A expressão da força magnética por unidade de comprimento de condutor, entre dois condutores paralelos espaçados entre si por uma distância d e conduzindo uma mesma corrente I é:

$$F_m = K \frac{I^2}{d} \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2) vem:

$$F_{m_1} = K \frac{I^2 \cos \alpha_1}{d_{12}} + K \frac{I^2 \cos \alpha_2}{d_{13}} + K \frac{I^2 \cos \alpha_3}{d_{14}} + K \frac{I^2 \cos \alpha_4}{d_{15}} + \dots + \\ K \frac{I^2 \cos \alpha_{(n-3)}}{d_{1(n-2)}} + K \frac{I^2 \cos \alpha_{(n-2)}}{d_{1(n-1)}} + K \frac{I^2 \cos \alpha_{(n-1)}}{d_{1n}} \quad (4)$$

Da figura 1 podemos observar que:

$$\begin{aligned}
 d_{12} &= 2R \cos\alpha_1 \\
 d_{13} &= 2R \cos\alpha_2 \\
 d_{14} &= 2R \cos\alpha_3 \\
 d_{15} &= 2R \cos\alpha_4 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 d_{1(n-2)} &= 2R \cos\alpha_{(n-3)} \\
 d_{1(n-1)} &= 2R \cos\alpha_{(n-2)} \\
 d_{1n} &= 2R \cos\alpha_{(n-1)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Entrando com os valores de (5) em (4), teremos:

$$\begin{aligned}
 F_{m_1} &= \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_1} \cos\alpha_1 + \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_2} \cos\alpha_2 + \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_3} \cos\alpha_3 + \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_4} \cos\alpha_4 + \dots + \\
 &\quad \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_{(n-3)}} \cos\alpha_{(n-3)} + \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_{(n-2)}} \cos\alpha_{(n-2)} + \frac{K I^2}{2R \cos\alpha_{(n-1)}} \cos\alpha_{(n-1)}
 \end{aligned}$$

$$F_{m_1} = (n-1) \frac{K I^2}{2R}$$

mas, $2R = D$

$$F_{m_1} = (n-1) \frac{K I^2}{D} \tag{6}$$

Analisando a equação (6) verificamos que ela representa a força magnética entre dois condutores paralelos, conduzindo cada um uma corrente I e espaçados entre si por uma distancia igual ao diâmetro do círculo circunscrito ao polígono regular formado pelos n condutores, multiplicada por $(n-1)$.

APENDICE III

DEMONSTRAÇÃO DAS EQUAÇÕES (47) E (48)

EQUAÇÃO (47)

Na figura 1 abaixo temos as curvas que representam F_m e F_{me} em função de L .

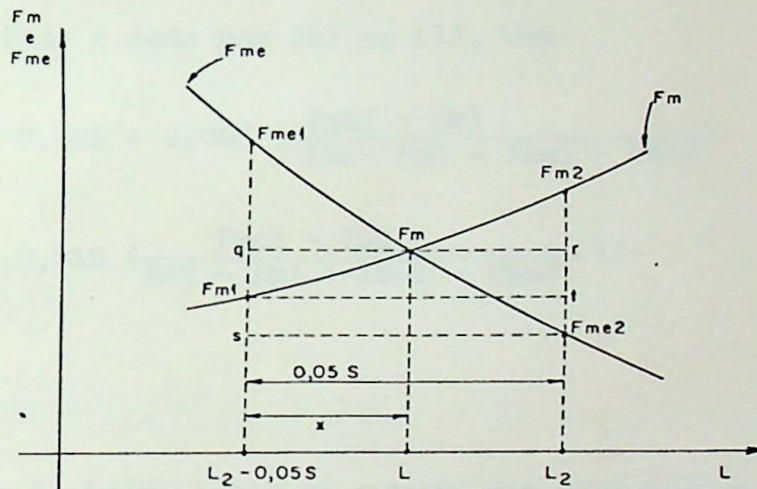


FIGURA 1

Da figura 1 podemos escrever que:

$$L = L_2 - 0,05S + x \quad (1)$$

Considerando, em aproximação, os trechos das curvas F_m e F_{me} entre $L_2 - 0,05S$ e L_2 como retas, teremos:

$\Delta F_{me1} F_{me2} S \sim \Delta F_{me1} F_m q$, então

$$\frac{F_{me1} - F_m}{x} = \frac{F_{me1} - F_{me2}}{0,05S}$$

$$F_m = F_{me1} - x \left(\frac{F_{me1} - F_{me2}}{0,05S} \right) \quad (2)$$

$\Delta F_{m2} F_{m1} t \sim \Delta F_{m2} F_{m2} r$, portanto

$$\frac{F_{m2} - F_m}{0,05S - x} = \frac{F_{m2} - F_{m1}}{0,05S}$$

$$F_m = F_{m1} + x \left(\frac{F_{m2} - F_{m1}}{0,05S} \right) \quad (3)$$

$$F_m = F_{m1} - x \left(\frac{F_{m1} - F_{m2}}{0,05H} \right) \quad (6)$$

e -

$\Delta F_{m1} F_{m2} \sim \Delta F_{m1} F_{m1}$, portanto

$$\frac{F_{m1} - F_m}{x} = \frac{F_{m1} - F_{m2}}{0,05H}$$

$$F_m = F_{m1} - x \left(\frac{F_{m1} - F_{m2}}{0,05H} \right) \quad (7)$$

Igualando (6) e (7)

$$F_{m1} - x \left(\frac{F_{m1} - F_{m2}}{0,05H} \right) = F_{m1} - x \left(\frac{F_{m1} - F_{m2}}{0,05H} \right)$$

$$x = 0,05H \left(\frac{F_{m1} - F_{m1}}{F_{m1} - F_{m2} + F_{m2} - F_{m1}} \right) \quad (8)$$

Substituindo x dado por (8) em (5), vem:

$$b = b_2 - 0,05H + 0,05H \left(\frac{F_{m1} - F_{m1}}{F_{m1} - F_{m2} + F_{m2} - F_{m1}} \right)$$

$$b = b_2 + 0,05H \left(\frac{F_{m1} - F_{m1}}{F_{m1} - F_{m2} + F_{m2} - F_{m1}} - 1 \right)$$

BIBLIOGRAFIA

- 1 - ELECTRICAL ENGINEERING HANDBOOK - Siemens
- 2 - VDE - 103 - "LEITSATZE FUR DIE BEMESSUNG UON
STARKSTROMANLAGEN AUF MECANISCHE
KURZSCHLUSSFESTIGKEIT"
- 3 - DYNAMIC BEHAVIOR OF A 220-kV DEAD-END SUSPENSION
BUS DURING SHORT CIRCUIT - A.T. Atwood, Jr, M.H. Mills
D. I. Downs, H. M. Stone - AIEE Transactions - Junho 1962 - (PAS)
- 4 - MECHANICAL EFFECTS OF HIGH SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN SUBSTATION - J. I.
Landin, C.I. Lindqvist, L.R. Bergstrom, G.R. Cullen - AIEE Transactions -
Setembro/Outubro 1975 (PAS)
- 5 - MATHEMATICAL HANDBOOK FOR SCIENTISTS AND ENGINEERS
Korn and Korn - Mc Graw Hill Book Company, Inc.
- 6 - STANDARD HANDBOOK FOR ELECTRICAL ENGINEERS -
A. E. Knowlton - Mc Graw Hill Book Company, Inc.
- 7 - STANDARD MATHEMATICAL TABLES - Samuel M. Selby - The Chemical Hubber Co.
- 8 - TRANSIENT CURRENT CAPACITY OF ALUMINUM - CLAD STEEL GROUND WIRES WITH AS
STRANDS - AIEE Transactions 1970 - pg 1493-1498 (PAS)