

TESE

122

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



DETERMINAÇÃO DO CARREGAMENTO ADEQUADO
PARA CABOS UTILIZADOS EM TRANSMISSÃO
SUBTERRÂNEA

ROGÉRIO SILVEIRA MACHADO

1975

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO :

CAPÍTULO I : INTRODUÇÃO

I.1 - Motivação

I.2 - Objetivo

I.3 - Descrição

CAPÍTULO II : CÁLCULO DE AMPACIDADE

2.1 - Apresentação da fórmula utilizada

2.2 - Cálculo das perdas no circuito

2.3 - Cálculo das resistências térmicas

APÊNDICES

APÊNDICE I : Cabos tipo "pipe"

APÊNDICE II : Programa de computador

BIBLIOGRAFIA

1.1 MOTIVAÇÃO :

No Brasil, principalmente nos grandes centros urbanos torna-se cada vez mais imperiosa a necessidade do emprego de linhas subterrâneas de transmissão. À medida em que as grandes concentrações de carga crescem um percentual acima da média de crescimento do sistema como um todo, há congestionamento do meio ambiente, tornando quase impossível às companhias fornecedoras de energia supri-las adequadamente. Restando como única alternativa o sistema subterrâneo de energia.

Nos maiores centros urbanos tais como "Grande São Paulo" e "Grande Rio", o problema não é tão recente, uma vez que há aproximadamente quinze anos começamos com maior frequência a empregar linhas de transmissão subterrâneas como solução adequada aos problemas então surgidos.

Hoje em dia nestes centros já existem grandes redes de transmissão subterrânea interligadas sendo que até o final do século XX grandes investimentos serão feitos nesta área.

Há portanto uma tendência natural de crescimento quanto a necessidade de emprego desta técnica nos grandes polos de desenvolvimento e nas cidades onde o problema já começa a se fazer sentir.

Considerando este aspecto, procuramos desenvolver no trabalho técnicas que sirvam de real apoio aos profissionais cujas funções estejam diretamente ligadas a decisões técnicas tanto na área de projeto como na área comercial de transmissão subterrânea de energia.

2 OBJETIVO :

Nos sistemas subterrâneos de transmissão são empregados dois tipos de cabos.

- Cabos tipo "Oil Filled, (Origem Europeia).
- Cabos tipo "Pipe", (Origem Americana).

O primeiro devido ao seu uso bastante difundido e por ser mais antigo, possui técnicas mais desenvolvidas baseadas na experiência e no conhecimento de linhas já existentes. Basicamente o cabo tipo "Oil Filled" possui um canal de óleo no interior do núcleo do condutor; a finalidade

de do óleo é a de impregnar o papel que serve de isolamento. Este é o tipo utilizado na maioria dos sistemas brasileiros de transmissão subterrânea.

Já o cabo tipo "Pipe" de emprego recente possui técnica bem menos desenvolvida.

A instalação do cabo "Pipe" não é feita diretamente no subsolo e sim em linhas de duto de aço com o óleo circundando o cabo; geralmente as três fases ocupam o mesmo duto trazendo facilidades de instalação e manutenção embora seu carregamento fique bastante prejudicado.

Um dos grandes problemas enfrentados pelos engenheiros que trabam no ramo, diz respeito ao pouco acesso a informações técnicas, não sendo interesse de fabricantes a sua divulgação.

Tanto o planejamento como a execução de projetos e manutenção das linhas eram e ainda são feitos com base em informações de fabricantes (na maioria dos casos).

Há, portanto, necessidade do engenheiro possuir maiores e mais precisas informações sobre o assunto.

Não pretendemos aqui apresentar soluções para todos os problemas que envolvem a transmissão subterrânea, pois além da vastidão da matéria, ainda hoje em dia nos grandes centros desenvolvidos do mundo es tão sendo feitas pesquisas e ensaios visando um aprimoramento cada vez maior na transmissão de energia através de cabos subterrâneos.

Tanto para quem planeja como para aquele que executa este tipo de projeto, a maior dificuldade encontrada é a determinação da capacidade de transmissão das linhas subterrâneas.

Nosso trabalho visa exatamente a determinação da capacidade dos cabos neste tipo de sistema, levando-se em consideração tanto as características físicas inerentes à fabricação dos mesmos (tipo de material do isolamento, formato do núcleo, etc.) como as de projeto (tipo de sistema, condições do subsolo, tensão de serviço, etc.).

I.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Procuramos apresentar de modo prático e objetivo um método comple

to do cálculo da capacidade de cabos em sistemas subterrâneos de transmissão baseado em condições térmicas do sistema, independente de considerações sobre o carregamento econômico dos mesmos.

De fato, enquanto que os cálculos de corrente nominal já são feitos em vários países de acordo com os métodos normais, ainda se apresentam pequenas divergências nestes processos. O método aqui apresentado procura ser o mais genérico possível.

As fórmulas empregadas a seguir contêm parâmetros que variam de acordo com o projeto da linha e materiais usados na construção dos cabos. Alguns destes valores são obtidos de tabelas e gráficos; alguns - deles são os adotados internacionalmente, por exemplo: resistividades, elétricas, resistências variando com a temperatura, etc.. Outros aceitos na prática, como: resistividade térmica, permissividade de certos materiais, etc..

Aconselhamos sempre que possível que se obtenha com precisão o maior número de dados através de ensaios que quase sempre são feitos ou podem ser feitos pelos fabricantes.

Valores relacionados com as condições de operação dos sistemas podem variar bastante de um projeto para outro. Por exemplo, no que diz respeito a temperatura do solo ambiente, resistividade térmica do mesmo, valores de temperatura do condutor em operação normal ou em emergência, etc.

Em resumo, três tipos de parâmetros devem ser utilizados no processo:

- parâmetros relativos à construção do cabo.
- parâmetros relativos às condições ambientes e de projeto.
- parâmetros obtidos através de normas, entendimentos com os fabricantes, (podendo envolver margem de segurança de operação do sistema).

Capítulo II - CÁLCULO DA AMPACIDADE

2.1 - Apresentação da fórmula utilizada:

A capacidade de um cabo utilizado em transmissão subterrânea é deduzida da seguinte expressão:

$$\Delta\theta = (I^2 R + 1/2 Wd) T_1 + [I^2 R(1+\lambda_1) + Wd] n T_2 + [I^2 R(1+\lambda_1) + Wd] n (T_3 + T_4)$$

Daí temos:

$$I = \left\{ \frac{\Delta\theta - Wd [1/2 T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1+\lambda_1) T_2 + nR(1+\lambda_1) (T_3 + T_4)} \right\}^{1/2}$$

Na equação acima, basicamente, os valores de R , Wd e λ_1 , são considerados perdas no cabo e os valores T_1 , T_2 , T_3 e T_4 resistências térmicas das várias partes componentes do circuito

2.2 - Cálculo das perdas no circuito:

2.2.1 - Perdas na resistência do condutor: (C.A.) - $R [\Omega/\text{cm}]$

Para o cálculo desta resistência utilizamos a seguinte fórmula que nos fornece seu valor por unidade de comprimento do cabo na temperatura em que está sendo feito o cálculo, normal ou emergência.

$$R = R' (1 + Y_s + Y_p)$$

NOTA: Para o caso de cabo tipo "pipe" a fórmula então deverá ser:

$$R = R' [1 + 1.7(Y_s + Y_p)]$$

2.2.1.a - R' - Resistência em corrente contínua do condutor, considerando sua temperatura de operação.

Fórmula:

$$R' = R_0 [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

Daí temos:

R_0 - Resistência em corrente contínua do condutor a 20°C
 $[\Omega/\text{cm}]$

Este valor para ser obtido com precisão deve resultar de ensaio do cabo em laboratório, portanto esta informação deve ser exigida do fabricante. Há entretanto outra alternativa, consultar IEC Publication 228 "NOMINAL CROSS-SECTION AREAS AND COMPOSITIONS OF CONDUCTORS OF INSULATED CABLES".

α_{20} = Coeficiente térmico de massa constante a 20°C

$\alpha_{20} = 0.00393$ (IEC PUBLICATION 28)

$\alpha_{20} = 0.00403$ (IEC PUBLICATION III)

θ = Temperatura de operação $[\text{C}]$

2.2.2.b - Y_s - Fator do efeito pelicular.

Fórmula:

$$Y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4}$$

$$\Rightarrow x_s^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-9} K_s$$

Onde:

f - frequência de serviço $[\text{Hz}]$

K_s - 0.435 para cabos com núcleo segmental utilizando material impregnado no isolamento.

K_s - 1.0 para todos os outros tipos de cabos exceto aqueles que possuem canal de óleo no núcleo.

No caso de cabos à óleo tipo "Oil filled" onde o núcleo

é vazado em seu eixo pelo canal de óleo, utilizamos a fórmula:

$$K_s = \frac{d'_c - d_i}{d'_c + d_i} \left(\frac{d'_c + 2d_i}{d'_c + d_i} \right)^2$$

Onde:

d_i - Diâmetro interno do canal central [cm]

d'_c - Diâmetro externo do núcleo, considerando um condutor sólido com mesmo canal central. [cm]

2.2.1.c - y_p - Fator do efeito de proximidade.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \left[0.312 \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right]$$

Onde:

d_c - Diâmetro externo do condutor [cm]

s - Distância entre os eixos dos condutores [cm]

$$X_p^2 = \frac{8\pi f}{R'} 10^{-9} K_p$$

$K_p = 0.8$ - para cabos com núcleo em strans, compacto ou setorial, desde que seja isolado a papel impregnado. Também utilizado em cabos cujo canal de óleo se apresenta no interior do núcleo.

$K_p = 1.0$ - para cabos com núcleo em strands, compactado ou setorial desde que não apresente isolamento com papel impregnado.

$K_p = 0.37$ - para cabos com núcleo segmental isolado com material impregnado e que apresente ou não canal para óleo impregnante.

2.2.2 - Perdas no dielétrico W_d

As perdas no meio dielétrico passam a assumir maior importância, geralmente quando a tensão fase-terra do sistema excede os 30kV para cabos isolados a papel impregnado e 6kV para cabos que possuem isolamento tipo sêco.

A perda W_d por unidade de comprimento em cada fase é dada por:

$$W_d = \omega C E_0^2 \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-6} \left[W/cm \right]$$

Onde:

C - Capacitância - $\left[\mu F/cm \right]$

$$C = \frac{0.0241 \epsilon}{\log_{10} D_i/d_e} 10^{-5} \left[\mu F/cm \right]$$

- Permissividade relativa do isolamento.

$\epsilon = 3.0$ - Cabo isolado com EPR

$\epsilon = 4.0$ - Cabo tipo sólido, isolamento pré-impregnado

$\epsilon = 3.3$ - Cabo à óleo, baixa pressão

$\epsilon = 3.5$ - Cabo à óleo, alta pressão ou à gás (pressão exter
na)

$\epsilon = 3.7$ - Cabo tipo pipe

$\epsilon = 3.4$ - Cabo à gás (pressão interna)

$\epsilon = 8.0$ - Cabo isolado com PVC.

ROGÉRIO SILVEIRA MACHADO

$\epsilon = 2.3$ - Cabo isolado com polietileno simples.

$\epsilon = 2.5$ - Cabo isolado com polietileno reticulado.

D_i - Diâmetro externo do isolamento. [cm]

d_e - Diâmetro do núcleo, incluindo a fita metálica
(caso exista) [cm]

No cálculo de W_d (Perdas no dielétrico), temos ainda a de
terminar:

E_o - Tensão fase-terra [V]

$Tg\delta$ - Fator de perda do isolamento

- Valores a serem atribuídos a. $Tg\delta$

$Tg\delta$ Tipos de cabos

0.01 - Cabo tipo sólido, isolamento pré-impregnado

0.004 - Cabo à óleo baixa pressão

0.0045 - Cabo à óleo alta pressão

0.0045 - Cabo tipo pipe

Cabo a gás;

0.0045 - Pressão interna

0.0040 - Pressão externa

2.2.3 - Fator de perda na blindagem λ_1

Este fator é composto por duas parcelas:

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''$$

λ_1' - Perdas devido à correntes de circulação.

λ_1'' - Perdas devido à correntes parasitas.

Para cabos monofásicos blindados só são consideradas as perdas devido à corrente de circulação.

Para cabos trifásicos, porém, só são consideradas também as perdas devido à correntes parasitas presentes na blindagem.

NOTA: Cabos trifásicos são aqueles que possuem, além da blindagem de cada fase, uma blindagem externa envolvendo as três fases. Formando uma só unidade.

2.2.3.a - Cabos singelos; formação em trifólio.

Neste tipo de formação, um corte transversal na linha apresentará a configuração de um triângulo.

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}$$

Onde:

R_s - Resistência por unidade de comprimento da blindagem externa $[\Omega/\text{cm}]$

X - Reatância por unidade de comprimento da blindagem externa $[\Omega/\text{cm}]$

$$X = 4.6 \omega \log_{10} \frac{2s}{d} \cdot 10^{-9} \quad [\Omega/\text{cm}]$$

Onde:

s - Distância axial entre condutores, $[\text{cm}]$

d - Valor médio do diâmetro da blindagem que em caso de ser oval é dado por $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ onde d_M e d_m são respec

tivamente os diâmetros máximo e mínimo, em

$$\omega = 2\pi f \left[1/s \right]$$

$$\lambda_1'' = 0.$$

2.2.3.b - Cabos singelos; formação em esteira (multi-aterrado)

A formação esteira, vem a ser a denominação da linha que apresenta as fases numa disposição horizontal.

A fórmula utilizada a seguir considera que o sistema possui o cabo do meio equidistante dos extremos e que haja transposição, sendo a blindagem aterrada em cada três transposições.

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + (R_s/X_1)^2}$$

Onde:

X_1 - Reatância por unidade de comprimento da blindagem.

$$X_1 = 4.6 \omega \log_{10} \frac{2.52 \times S}{d} 10^{-9} \left[\Omega/cm \right]$$

$$\lambda_1'' = 0.$$

2.2.3.c - Cabos singelos; formação em esteira sem transposição com blindagem aterrada nos extremos.

Caso que ocorre raríssimas vezes, utilizamos as seguintes fórmulas:

Condutores externos:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \frac{3/4 \frac{P^2}{R_s^2 + P^2}}{R_s^2 + P^2} + \frac{1/4 \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}}{R_s^2 + Q^2} \pm \frac{2 R_s P Q X_m}{\sqrt{3} (R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)}$$

Condutor central:

$$\lambda_1' = \frac{R_s}{R} \left(\frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2} \right)$$

Nas fórmulas acima:

$$P = X + X_m, \quad e \quad Q = X - \frac{X_m}{3}$$

Onde:

X - Reatância por unidade de comprimento da blindagem do cabo monofásico, considerando formação em trifólio.

$$X = 4.6 \omega \log_{10} \left(\frac{2s}{d} \right) 10^{-9} \quad [\Omega/\text{cm}]$$

X_m - Reatância mútua por unidade de comprimento entre a blindagem de um cabo externo e os outros dois condutores. (Formação esteira).

$$X_m = 4.6 \omega \log_{10} 2 \times 10^{-9} = 4.608 \times 10^{-5} [\Omega/\text{cm}] \text{ a } 60\text{Hz}$$

$$\lambda_1'' = 0.$$

Considerações:

— Convém ressaltar aqui que na prática ao serem instalados os cabos, podem ocorrer alguns imprevistos e nem sempre as distâncias acaais de projeto são mantidas. Recomenda-se nestes casos como precaução um acréscimo de 25% do valor calculado para o fator de perda na blindagem.

2.2.3.d - Cabos singelos, com blindagem aterrada em um só ponto ou "cross-bonded".

$$\lambda_1'' = A_1 \frac{R_s}{R} \frac{\left(\frac{d}{2s}\right)^2}{\left(\frac{R_s \cdot 10^9}{\omega}\right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{2s}{d}\right)} + A_2 \left(\frac{d}{2s}\right)^2$$

Valores de A_1 e A_2 :

A_1	A_2	Tipo de formação
3.0	0.417	Cabos em trifólio Cabos em esteira simétrica
1.5	0.27	Condutores externos
6.0	0.083	Condutor interno

Notas:

- I - Podemos observar que para este tipo de aterramento, independentemente do tipo de formação, a perda na blindagem se deve às correntes parasitas, sendo $\lambda_1' = 0$ (fator de perdas devido às correntes que circulam na blindagem é igual a zero).
- II - Em alguns casos porém, quando apesar de aterrado em um só ponto (cross-bonded), não houver as transposições no circuito, será criada uma tensão residual devido ao desbalanço entre fases. Esta tensão pode provocar então uma corrente de circulação gerando perdas.

Recomendamos nestes casos os seguintes valores de λ_1' =

Cabos diretamente enterrados $\lambda_1' = 0.03$

Cabos instalados em dutos $\lambda_1' = 0.05$

2.2.3.e - Cabos trifásicos com blindagem única.

$\lambda_1' = 0$ (sempre)



- Para condutores circulares ou ovais

$$\lambda_1'' = \frac{3R_s}{R} \left[\left(\frac{2c}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} + \left(\frac{2c}{d} \right)^4 \frac{1}{1 + 4 \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2} \right]$$

Onde:

R_s - Raio médio geométrico

c - Distância entre o eixo de um condutor e o eixo do cabo [cm]

d - Diâmetro médio da blindagem [cm]

f - frequência [Hz]

- Para condutores circulares ou ovais, onde $R_s > 1.0$ [$\mu\Omega/\text{cm}$]

$$\lambda_1'' = \frac{3.2 \omega^2}{R \cdot R_s} \left(\frac{2c}{d} \right)^2 10^{-18}$$

- Para condutores setoriais (sector shaped), qualquer valor de R_s

$$\lambda_1'' = 0.94 \frac{R_s}{R} \left(\frac{2r_1 + t}{d} \right)^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{159 R_s 10^6}{f} \right)^2}$$

Onde:

r_1 - raio do circuito circunscrito aos condutores [cm]

t - Espessura do isolamento entre condutores [cm]

Notas:

I - No caso do cabo possuir armadura de aço, ou quando o cabo trifásico possuir blindagem isolando cada fase, recomendamos consultar a norma IEC-287, não trataremos do assunto neste trabalho.

lho pois este tipo de cabo tem aplicação pouco difundida no mundo.

II - Para os cabos tipo "pipe" devemos adotar o mesmo raciocínio - do item 2.2.3.a.

2.3 - Cálculo das resistências térmicas:

2.3.1 - Resistência térmica do isolamento t_1

2.3.1.a - Cabos de núcleo singelo

$$t_1 = 0.366 \rho_t \log_{10} \left[1 + \frac{2t_1}{d_c} \right]$$

Onde:

d_c - Diâmetro do condutor [cm]

t_1 - Espessura do isolamento [cm]

ρ_t - Resistividade térmica do isolamento [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm/W}$]

Valores de ρ_t =

Materiais isolantes	[$^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm/W}$]
Papel isolante (cabo sólido)	600
Papel isolante (cabo "oil-filled")	500
Papel isolante (cabo à gás interno)	600 a 650
Papel isolante (cabo à gás externo)	550
Polietileno (qualquer tipo)	350
Polivinil clorido	600
EPR	500
Borracha (qualquer tipo)	500

Coberturas protetoras

Materiais compostos de juta e fibra	600
Borracha protetora	600
Policloroprene	550

Materiais utilizados em dutos

Concreto	100
Fibra	480
Arbestos	200
PVC	700
Polietileno	350

2.3.I.b - Cabos trifásicos cintados:

$$T_1 = \frac{\rho_t}{2\pi} G$$

Onde:

G - Fator geométrico

Valores de G :

- Para condutores circulares G é obtido da figura 1.

- Para condutores não circulares:

$$G = 6.9 \log_{10} \left(\frac{d_a}{2r_1} \right)$$

Onde:

d_a - Diâmetro externo do isolamento [cm]

r_1 - Raio do círculo circunscrito aos condutores [cm]

2.3.2 - Resistência térmica entre a blindagem e a armação T_2

2.3.2.a - Cabos singelos ou trifásicos com blindagem única.

$$T_2 = 0.366 \rho_t \log_{10} \left(\frac{D_a}{D_s} \right)$$

Onde:

D_a - Diâmetro interno da armadura [cm]

D_s - Diâmetro externo da blindagem [cm]

2.3.3 - Resistência térmica da proteção externa t_3

$$T_3 = 0.366 \rho_t \log_{10} \left(\frac{D_e}{D'_a} \right)$$

Onde:

D_e - Diâmetro externo total [cm]

D'_a - Diâmetro sem considerar a proteção externa [cm]

2.3.4 - Resistência térmica externa t_4

$$T_4 = 0.0125 \rho_e n' \cdot \left[\log_{10} \frac{D_x}{D_c} + (LF) \log_{10} \frac{4L}{D_x} F \right]$$

Onde:

ρ_e - Resistividade térmica do solo.

n' - Número de cabos compreendidos no diâmetro externo

D_x - Diâmetro fictício em que atua o fator de perda

$$D_x = 1.02 \sqrt{a}$$

Nota:

Recomenda-se a utilização de $\alpha = 2.75$, logo

$$D_x = 8.3$$

F - Produto de razões de distâncias.

$$F = \frac{d'_{p1}}{d_{p1}} \frac{d'_{p2}}{d_{p2}} \text{ ----- } \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \text{ ----- } \frac{d'_{pq}}{d_{pq}}$$

Nota:

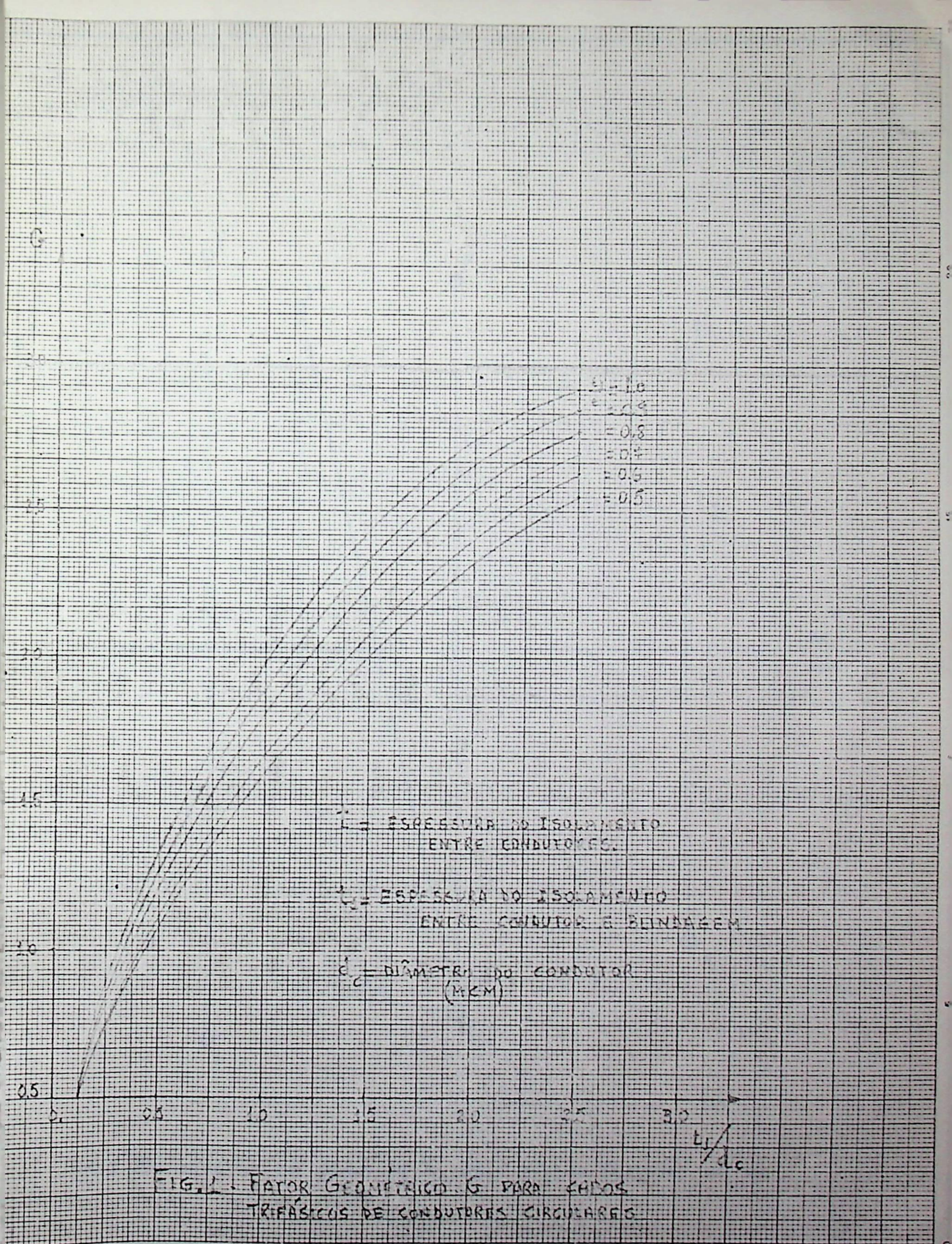
Os valores das distâncias utilizadas na fórmula anterior, são ob
tidos no projeto de acordo com o esquema da figura 2.

LF - Fator que introduz o fator de carga na
fórmula.

$$LF = 0.3 (lf) + 0.7 (lf)^2$$

Onde:

lf - fator de carga desejado.



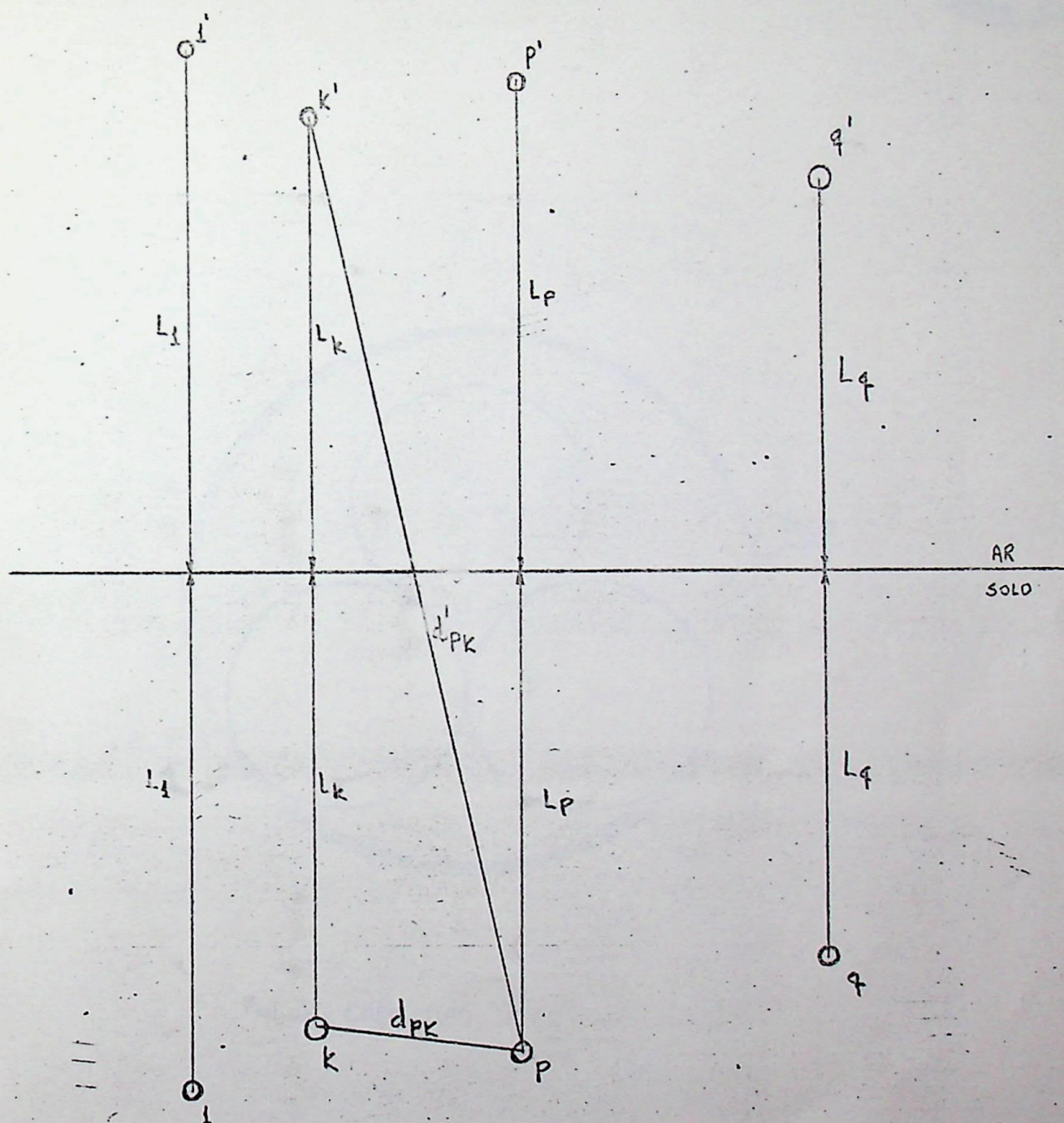


FIG. 2- DIAGRAMA DE UM GRUPO DE q CABOS E SUA REFLEXÃO NO AR.

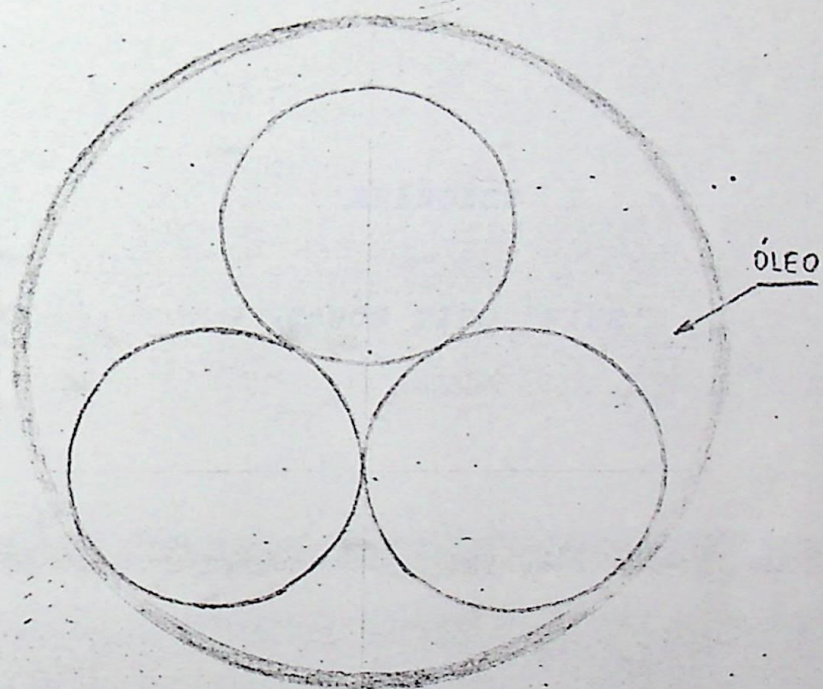


FIG. 3 CABO TIPO "PIPE"

APÊNDICE I

CABOS TIPO "PIPE"

CABOS TIPO "PIPE"

Largamente utilizado nos E.U.A. começa agora a penetrar no mercado europeu, onde até então predominavam os cabos tipo "oil-filled".

Apresenta grandes vantagens, principalmente no que diz respeito à manutenção e ao remanejamento.

Pode-se facilmente chegar a esta conclusão, pois o cabo "pipe" opera dentro de um tubo de aço conforme mostra a figura 3; em caso de defeito, seu remanejamento é possível, não sendo necessário abandonar a linha defeituosa, como ocorre na maioria das vezes com o cabo tipo O.F. que é diretamente enterrado.

O único inconveniente neste tipo de cabo é o surgimento de uma outra parcela de perdas, ocasionadas pela indução de campo nos tubos de aço.

I - Perdas nos tubos de aço λ_2 :

Estas perdas são obtidas com o emprego de duas fórmulas empíricas, uma para os cabos que possuem seus núcleos em trifólio e outra quando eles apresentam uma configuração chamada de "crandle"

I.1 - Formação trifólio:

$$\lambda_2 = \frac{0.0115 s - 0.001485 d_d}{R} 10^{-6}$$

I.2 - Formação "crandle":

$$\lambda_2 = \frac{0.00438 s + 0.00226 d_d}{R} 10^{-6}$$

Onde:

s - Espaçamento axial entre condutores adjacentes [cm]

d_d - Diâmetro interno do tubo, [cm]

R - Resistência A.C. do condutor por unidade de comprimento considerando a máxima temperatura de operação
 $[\Omega/\text{cm}]$

Nota:

Convém lembrar que o valor de λ_2 modificaria a equação básica do cálculo da ampacidade, passando a mesma a possuir a seguinte configuração:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta - W_d \quad 1/2T_1 + n (T_2 + T_3 + T_4)}{RT_1 + nR (1 + \lambda_1) T_2 + nR (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)} \right]^{1/2}$$

APÊNDICE II

PROGRAMA DE COMPUTADOR

PROGRAMA DE COMPUTADOR

O programa aqui apresentado foi confeccionado baseado nas fórmulas descritas no presente trabalho.

O caso teste aqui mostrado teve os seguintes dados de entrada.

CABO TIPO "OIL-FILLED"

TENSÃO DE SERVIÇO - 138KV

NÚCLEO DE COBRE

BITOLA - 600 mm²

FORMAÇÃO TRIFÓLIO

SISTEMA MULTI-ATERRADO

```

DIMENSION POT(8),QE(8),WD(8),J(18),ESPD(2),IT(2),LF(10),TA(2)
DIMENSION S(5,7),V(29),RTD(2),DED(2),IDU(35),IRH(2),FPI(2),XI(3)
READ(12,1)MHO
WRITE(1,300)MHO
FORMAT(6H DADOS,20I4)
DO 12 LMN=1,MHO
WRITE(1,400)LMN
FORMAT(//////,9H ** CASO ,12,3H **)
READ(12,1)(J(I),I=1,18)
FORMAT(20I4)
WRITE(1,300)(J(I),I=1,18)
FORMAT(8F10.4)
FORMAT(6H DADOS,8F10.4)
NNN=J(7)
IF(J(2).EQ.1)GO TO 78
READ(12,1)(IT(I),I=1,2),(LF(N),N=1,NNN),(IRH(K),K=1,2)
WRITE(1,300)(IT(I),I=1,2),(LF(N),N=1,NNN),(IRH(K),K=1,2)
READ(12,4)(TA(I),I=1,2),(FPI(N),N=1,2)
WRITE(1,301)(TA(I),I=1,2),(FPI(N),N=1,2)
IF(J(5).EQ.1)GO TO 79
READ(12,59)(V(I),I=10,14),V(21)
WRITE(1,301)(V(I),I=10,14),V(21)
IF(J(9).EQ.1)GO TO 16
READ(12,4)(V(I),I=1,8)
WRITE(1,301)(V(I),I=1,8)
DSM=V(6)+V(5)
READ(12,59)V(17),V(19),V(20),V(22),V(23)
WRITE(1,301)V(17),V(19),V(20),V(22),V(23)
READ(12,59)V(9),V(16),V(18)
WRITE(1,301)V(9),V(16),V(18)
FORMAT(7F11.3)
RJ=0.0
IF(J(10).EQ.0)GO TO 66
RJ=0.012*V(23)*ALOG10(V(3)/(V(3)-2.0*V(8)))
IF(J(13).EQ.0)GO TO 15
DSM=V(20)-V(19)
RL1=24451.564/(DSM*V(19))
IF(J(13).EQ.1)GO TO 71
RL=3064.51/(DSM*V(19))
GO TO 71
RL=0.0
IF(J(11).LT.6.AND.J(16).EQ.0)GO TO 16
READ(12,59)V(15),(V(I),I=24,29)
WRITE(1,301)V(15),(V(I),I=24,29)
TEMP=V(2)+V(15)
AKS=((V(2)-V(15))*((V(2)+2.0*V(15))**2))/(TEMP**3)
AKP=0.8
IF(J(11).EQ.6)GO TO 600
AKS=0.435
AKP=0.37
IF(J(16).EQ.0)GO TO 16
TEMP=V(3)-2.0*V(8)
RJ1=0.012*V(27)*ALOG10(TEMP/(TEMP-2.0*V(24)))
TEMP=V(3)-2.0*(V(8)+V(24)+V(25))
RJ2=0.012*V(27)*ALOG10(TEMP/(TEMP-2.0*V(26)))
RJ=RJ+RJ1+RJ2
TEMP=V(3)-2.0*(V(8)+V(24))
T1=TEMP-2.0*V(25)
RL2=(V(28)*(1.0+V(29)*10.0)*2546480.0)/(3281.0*(TEMP**2-T1**2))
T2=DSM

```

```

DSM=SQRT((T2**2+T3**2)/2.0)
IF(J(13).EQ.0) GO TO 500
RL=(RL1*RL2)/(RL1+RL2)
GO TO 16
RL1=0.0
XM=0.0
XNM=0.0
IF(J(13).EQ.0.AND.J(1).EQ.2)GO TO 21
XM=52.92*ALOG10(2.0*V(9)/DSM)
IF(J(8).GT.1) GO TO 20
XNM=52.92*ALOG10(2.0)
GO TO 21
IF(J(8).GT.3) GO TO 74
GO TO 21
XM=52.92*ALOG10(2.0*V(9)/DSM)
RI=0.012*V(22)*ALOG10((V(2)+2.0*V(4))/V(2))
K1=IFIX(TA(1))
K2=IFIX(TA(2))
IF(J(3).EQ.1) GO TO 18
IF(J(5).EQ.1) GO TO 81
READ(12,1) IWI,JB,J,KTL,MZN
WRITE(1,300) IWI,JB,J,KTL,MZN
DATA S/35*2H 0/
READ(12,4) (RTD(I),I=1,2),(DED(N),N=1,2),RCONG,(ESPD(K),K=1,2)
WRITE(1,301) (RTD(I),I=1,2),(DED(N),N=1,2),RCONG,(ESPD(K),K=1,2)
KLK=IWI*JB
READ(12,303) (IDU(I),I=1,KLK)
FORMAT(35I2)
WRITE(1,302) (IDU(I),I=1,KLK)
FORMAT(6H DADOS,35I2)
ITT=1
DO 82 N=1,KLK
IF(IDU(N).EQ.0) GO TO 82
ITT=ITT+1
CONTINUE
WRITE(1,101)
FORMAT(/,32X,47H** AMPACIDADE DE CABOS SUBTERRANEOS EM DUTOS **)
TEMP=2.3026*((0.5*(V(12)/V(13)))+(1.27324-(V(12)/V(13)))*ALOG10(1.
*0+((V(13)/V(12))**2))+ALOG10(V(12)/2.0))
RB=EXP(TEMP)
GB=ALOG10((V(14)/RB)+SQRT((V(14)/RB)**2-1.0))
IF(J(4).EQ.1) GO TO 23
RSD=13.8/(0.08465*V(3)+0.27)
GO TO 24
RSD=4.6/(0.03937*V(3)+0.27)
WRITE(1,102)
FORMAT(/,6H BANCO)
DO 25 I=1,IWI
WRITE(1,103) (S(I,N),N=1,JB,J)
FORMAT(1X,8A2)
CONTINUE
IF(V(16).GT.1.0) GO TO 67
WRITE(1,124)
FORMAT(/,22H NUMERO DE FATOR DE,35X,23HAMPERES (POTENCIA-KVA)
*)
GO TO 68
WRITE(1,104)
FORMAT(/,22H NUMERO DE FATOR DE,35X,23HAMPERES (POTENCIA-MVA)
*)
WRITE(1,105) IT(1),IT(2)
X,11HNORMAL TC ,12,27X,14HEMER

```

```

*GENCIA TC ,I3)
WRITE(1,106) K1,K2,K1,K2
FORMAT(/,9H NO BANCO,8X,2(11X,8HINVERNO ,I2,2H C,11X,6HVERAO ,I2,2
*H C))
IF(J(15).GT.0) GO TO 900
WRITE(1,107)
FORMAT(/,20X,4(6X,5H PVC ,6X,5HBARRD))
GO TO 26
IF(J(15).GT.1) GO TO 901
WRITE(1,905)
FORMAT(/,20X,4(6X,5H PVC ,6X,5HC.AM.))
GO TO 26
IF(J(15).GT.2) GO TO 902
WRITE(1,906)
FORMAT(/,20X,4(6X,5H PVC ,6X,5H PVC ))
GO TO 26
IF(J(15).GT.3) GO TO 903
WRITE(1,907)
FORMAT(/,20X,4(6X,5HBARRD,6X,5HC.AM.))
GO TO 26
IF(J(15).GT.4) GO TO 904
WRITE(1,908)
FORMAT(/,20X,4(6X,5HBARRD,6X,5HBARRD))
GO TO 26
WRITE(1,909)
FORMAT(/,20X,4(6X,5HC.AM.,6X,5HC.AM.))
GO TO 26
WRITE(1,108)
FORMAT(/,31X,48H** AMPACIDADE DE CABOS DIRETAMENTE ENTERRADOS **)
A = 0.0
RSD=0.0
RD=0.0
IF(J(6).GT.2) GO TO 29
DEXT=V(3)
F=((2.0*V(10))**2+V(9)**2)/(V(9)**2)
IF(J(6).EQ.2) GO TO 27
WRITE(1,109)
FORMAT(/,17H FORMACAO 0 0 0)
GO TO 28
TEMP=V(11)
DO 49 III=1,3
TEMP=TEMP+V(9)
F=(F*SQRT(TEMP**2+(2.0*V(10))**2))/TEMP
WRITE(1,110)
FORMAT(/,25H FORMACAO 0 0 0 0 0 0)
GO TO 28
DEXT=(V(3)/0.866)+V(3)
IF(J(6).GT.3) GO TO 30
F=1.0
WRITE(1,111)
FORMAT(/,13H FORMACAO 0)
WRITE(1,112)
FORMAT(11X,3H0 0)
GO TO 28
IF(J(6).GT.4) GO TO 72
WRITE(1,113)
FORMAT(/,1 FORMACAO 0 0)
WRITE(1,114)
FORMAT(13X,9H0 0 0 0)
F=(SQRT((2.0*V(10))**2+V(11)**2))/V(11)
GO TO 28

```

```

IF(J(6).GT.5) GO TO 128
WRITE(1,126)
FORMAT(/,27H FORMACAO      0      0      0)
WRITE(1,127)
FORMAT(13X,15H0 0 0 0 0)
F=((2.0*V(10))**2+V(11)**2)/(V(11)**2)
GO TO 28
IF(J(6).GT.6) GO TO 131
WRITE(1,129)
FORMAT(/,33H FORMACAO      0      0      0      0)
WRITE(1,130)
FORMAT(13X,1 0 0 0 0 0 0 0)
TEMP=(2.0*V(10))**2
F=(SQRT((2.0*V(11))**2+TEMP))*(V(11)**2+TEMP)/(2.0*(V(11)**3))
GO TO 28
WRITE(1,132)
FORMAT(/,39H FORMACAO      0      0      0      0      0)
WRITE(1,133)
FORMAT(13X,1 0 0 0 0 0 0 0 0 0)
TEMP=(2.0*V(10))**2
F=((2.0*V(11))**2+TEMP)*(V(11)**2+TEMP)/(4.0*(V(11)**4))
IF(V(16).GT.1.0) GO TO 69
WRITE(1,125)
FORMAT(/,10H FATOR DE,43X,23HAMPERES (POTENCIA-KVA))
GO TO 70
WRITE(1,115)
FORMAT(/,10H FATOR DE,43X,23HAMPERES (POTENCIA-MVA))
WRITE(1,116) IT(1),IT(2)
FORMAT(/,8H CARGA,25X,11HNORMAL TC ,I2,33X,14HEMERGENCIA TC ,I3)
WRITE(1,117) K1,K2,K1,K2
FORMAT(/,9X,2(13X,8HINVERNO ,I2,2H C,13X,6HVERAO ,I2,2H C))
WRITE(1,118) IRH(1),IRH(2),IRH(1),IRH(2),IRH(1),IRH(2),IRH(1),IRH(2)
FORMAT(/,13X,8(5X,4HRHO ,I3))
IN=1
MIM=0
DO 32 I=1,NNN
MIM=MIM+1
KM=0
FCA=FLOAT(LF(I))/100.0
ZLF=(0.3*FCA)+0.7*(FCA**2)
IF(MIM.GT.1.OR.J(3).EQ.1) GO TO 48
IF(J(14).EQ.0) GO TO 44
A=FLOAT(ITT)*FLOAT(J(4))*GB
IF(J(4).EQ.3) GO TO 64
IN=ITT/3
GO TO 65
IN=ITT
GO TO 65
A=FLOAT(IN)*FLOAT(J(4))*GB
F=1.0
TEMP=FLOAT(IN)
JJV=0
IF(J(4).EQ.1) GO TO 63
IF(IN.EQ.1) GO TO 48
ICONT=0
DO 45 KL=1,IWI
C=FLOAT(KL)
DO 45 JL=1,JBJ
JJV=JJV+1

```

```

ICONT=ICONT+1
IF(IDU(ICONT).EQ.0) GO TO 46
ITEMP=IN-1
IF(J(14).EQ.1) GO TO 47
IF(JJV.GT.ITEMP) GO TO 45
SA=FLOAT(KTL)-C
TB=FLOAT(MZN)-FLOAT(JL)
TEMP=SQRT((V(21)+V(11)*C)**2+(V(11)*TB)**2)
F=(F*TEMP)/SQRT((V(11)*SA)**2+(V(11)*TB)**2)
GO TO 45
JJV=JJV-1
CONTINUE
DO 33 K=1,2
TC=FLOAT(IT(K))
IF(J(18).EQ.1) GO TO 34
RDC=(1020.0*17241.0*(1.0+0.00393*(TC-20.0)))/(3281.0*V(1))
GO TO 35
RDC=(1020.0*28264.0*(1.0+0.00403*(TC-20.0)))/(3281.0*V(1))
IF(MIN.GT.1) GO TO 62
IF(J(11).GE.6) GO TO 36
AKP=1.0
AKS=1.0
IF(J(11).EQ.1.OR.J(11).EQ.3) GO TO 36
AKP=0.8
IF(J(11).EQ.0) GO TO 36
AKP=0.6
IF(J(11).EQ.2) GO TO 36
AKS=0.435
AKP=0.37
IF(J(11).EQ.4) GO TO 36
AKP=0.6
YCS=11.0/(((RDC/AKS)+((4.0*AKS)/RDC)-2.56*((AKS/RDC)**2))**2)
PFX=11.0/(((RDC/AKP)+((4.0*AKP)/RDC)-2.56*((AKP/RDC)**2))**2)
TEMP=(V(7)/V(9))**2
YP=PFX*TEMP*((1.18/(PFX+0.27))+(0.312*TEMP))
YT=1.0+YCS+YP
IF(J(1).EQ.2) GO TO 37
TEMP=(3.14159*((V(6)+2.0*V(5))**2-V(6)**2))/8.0
IF(J(1).EQ.1) GO TO 38
RL=(17241000.0*(1.0+0.00393*(TC-35.0)))/(TEMP*3281.0)
GO TO 501
RL=(28264000.0*(1.0+0.00403*(TC-35.0)))/(TEMP*3281.0)
IF(J(16).EQ.0) GO TO 39
T2=RL
RL=(T2*RL2)/(T2+RL2)
GO TO 39-
IF(J(13).NE.1.OR.J(16).EQ.1) GO TO 39
RL=RL1
YSE=0.0
YSC=0.0
IF(J(13).EQ.0.AND.J(1).EQ.2) GO TO 41
TEMP=DSM/(2.0*V(9))
TAB=((5.2*RL)/60.0)**2+(0.2/TEMP)
IF(J(8).GT.1) GO TO 75
T1=(1.5*RL*(TEMP**2)*(1.0+(0.27*(TEMP**2))))/(RDC*TAB)
T2=(6.0*RL*(TEMP**2)*(1.0+(0.083*(TEMP**2))))/(RDC*TAB)
T3=RL/(XM+XNM)
T4=RL/(XM-(XNM/3.0))
YSE=T2
GO TO 76
T3=RL/XM

```

```

T4=RL/XM
YSE=(3.0*RL*(TEMP**2)*(1.0+(5.0*(TEMP**2)/12.0)))/(RDC*TAB)
IF(J(8).EQ.1.OR.J(8).EQ.3) GO TO 40
IF(J(8).EQ.0.OR.J(8).EQ.2) GO TO 41
YSC=0.03
IF(J(3).EQ.1) GO TO 41
YSC=0.05
GO TO 41
T5=4.0*(T3**2)*(T4**2)+((T3+T4)**2)
T6=4.0*(T3**2+1.0)*(T4**2+1.0)
IF(J(8).EQ.1) GO TO 77
YSE=(YSE*T5)/T6
YSC=RL/(RDC*(1.0+((RL/XM)**2)))
GO TO 41
T1=(T1*T5)/T6
T2=(T2*T5)/T6
P=XM+XNM
Q=XM-(XNM/3.0)
T7=RL**2+P**2
T8=RL**2+Q**2
T9=(RL/(4.0*RDC))*(((3.0*(P**2))/T7)+(Q**2/T8)+(8.0*RL*P*Q*XNM/(SQ
RT(3.0)*T7*T8)))
T10=RL*(Q**2)/(RDC*T8)
YSE=T1
YSC=T9
TEMP=T1+T9
TP1=T2+T10
IF(TEMP.GE.TP1) GO TO 41
YSE=T2
YSC=T10
IZ1=KM+1
IZ2=KM+4
DO 61 KKK=IZ1,IZ2
QE(KKK)=1.0+((YSC+YSE)/YT)
WD(KKK)=(0.00092*(V(16)**2)*V(17)*FPI(K))/ALOG10((2.0*V(4)+V(2))/V
(2))
DO 33 M=1,2
DO 33 N=1,2
KM=KM+1
IF(J(3).EQ.1) GO TO 43
RD=0.0104*RTD(N)*FLOAT(J(4))*(ESPD(N)/(DED(N)-ESPD(N)))
DEXT=DED(N)
GO TO 73
RCONC=FLOAT(IRH(N))
RTER=FLOAT(IRH(N))
URE=0.012*RCONC*FLOAT(J(4))*(ALOG10(8.3*25.4/DEXT)+ZLF*ALOG10(4.0*
V(10)*F/210.8200))+0.012*(RTER-RCONC)*A*ZLF
WRE=0.012*RCONC*FLOAT(J(4))*(ALOG10(8.3*25.4/DEXT)+ALOG10(4.0*V(10)
)*F/210.8200))+0.012*(RTER-RCONC)*A
RCA=RI+QE(KM)*(RSD+RD+URE+RJ)
DTD=WD(KM)*((RI/2.0)+RSD+RD+WRE+RJ)
TEMP=(FLOAT(IT(K))-TA(M)-DTD)/(RDC*YT*RCA)
IF(TEMP.GT.0.0) GO TO 134
XI(KM)=0.0
GO TO 135
XI(KM)=1000.0*SQRT(TEMP)
POT(KM)=SQRT(3.0)*V(16)*XI(KM)
IF(V(16).LE.1.0) GO TO 33
POT(KM)=POT(KM)/1000.0
CONTINUE

```

```

F(MIM.GT.1) GO TO 54
WRITE(1,119) IN,LF(1),(XI(KKK),KKK=1,8)
FORMAT(/,4X,12,10X,I3,1X,8F11.1)
WRITE(1,122) (POT(KKK),KKK=1,8)
FORMAT(/,22X,8(3X,1H(,F6.2,1H)))
GO TO 32
WRITE(1,120) LF(1),(XI(KKK),KKK=1,8)
FORMAT(/,16X,I3,1X,8F11.1)
WRITE(1,122) (POT(KKK),KKK=1,8)
GO TO 32
WRITE(1,121) LF(1),(XI(KKK),KKK=1,8)
FORMAT(/,4X,I3,5X,8F12.1)
WRITE(1,123) (POT(KKK),KKK=1,8)
FORMAT(/,14X,8(3X,1H(,F7.3,1H)))
CONTINUE
IF(J(3).EQ.1.OR.J(14).EQ.1) GO TO 12
IN=IN+1
IF(IN.LE.ITT) GO TO 31
CONTINUE
STOP
END

```

FEHLERFREI
EICHERBEDARF: 6036 ZELLEN OHNE COMMON

BIBLIOGRAFIA

- "CALCULATION OF THE CONTINUOUS CURRENT RATING OF CABLES"
IEC - 287 - 1969
- GUIDE FOR APPLICATION OF AEIC MAXIMUM INSULATION
TEMPERATURES AT THE CONDUCTOR IMPREGNATED - PAPER -
INSULATED CABLES
- J.H. HEHER, M.H. McGRATH TRANS. PAPER; 57-660,
THE CALCULATIONS OF THE TEMPERATURES RISE AND LOAD
CAPABILITY OF CABLE SYSTEMS.
- F.C. VAN WORMER - AN IMPROVED APPROXIMATE TECHNIQUE
FOR CALCULATING CABLE TEMPERATURE TRANSIENTS
"AIEE TRANS." - VOL. 74 - PART. III - PAG. 277-281
- S. WHITE HEAD - E.E. HUTHINGS - CURRENT RATING OF
CABLES FOR TRANSMISSION AND DISTRIBUTION
"JOURNAL IEE" 29 SEM. 1938 - PAG. 516-565
- F.H. BULLER, J.H. NEHER AND F.O. WOLLASTON -
OIL FLOW AND PRESSURE CALCULATIONS FOR SELF-CONTAINED
OIL-FILLED CABLE SYSTEMS
"AIEE - TRANS." - VOL. 75 - PART III - 1956 - PAG. 180-190
- NOTAS DE AULA DO CURSO "SISTEMAS DE CABOS SUBTERRÂNEOS"
MINISTRADO PELO ENGº EDWARD D. EICH - PTI - SÃO PAULO 1973
- CATÁLOGOS DIVERSOS - PIRELLI, BICC, DAINICH - NIPPON CABLES;

