

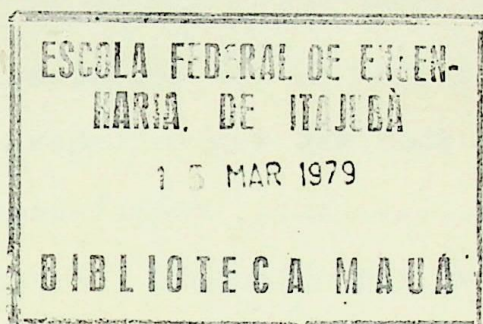
TESE

194

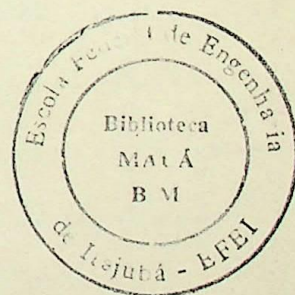
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO



ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE
SISTEMA DE ATERRAMENTO



José Wagner Cabral de Azevedo

Orientador: Hecctor Arango

CLASS. 621.3.053:621.316.9:519.6

CUTT. #094a

TOMBO 194

ÍNDICE

1. GENERALIDADE	1.1
2. FINALIDADE	2.1
3. SISTEMÁTICA DO ESTUDO	3.1
4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO	4.1
4.1. Potencial produzido por um eletrodo puntiforme	4.1
4.2. Potencial produzido por uma rede em um ponto	4.4
4.2.1. Considerações	4.4
4.2.2. Potencial produzido por um condutor linear	4.6
4.2.3. Potencial produzido por uma rede	4.13
4.2.4. Definição das variáveis	4.13
5. PROGRAMA COMPUTACIONAL	5.1
5.1. Finalidade	5.1
5.2. Classificação de tipos geométricos de rede	5.1
5.3. Descrição do algoritmo	5.5
5.4. Entrada de dados e saída do programa	5.7
5.5. Fluxograma simplificado	5.8
6. ANÁLISE NUMÉRICA	6.1
7. CONCLUSÃO	7.1

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE SISTEMA DE ATERRAMENTO

1. GENERALIDADES

Muito se tem pesquisado na área de sistema de aterramento, principalmente no que se refere ao comportamento do solo nos períodos de falta para a terra de um sistema elétrico aterrado. Entretanto, devido complexidade das condições de contorno que envolvem tais estudos, ainda há muito campo na área da pesquisa, onde nem todos fatores estão sob controle científico.

As dificuldades apresentadas pelos circuitos de terra são mais complexas que as apresentadas pelos circuitos puramente metálicos, uma vez que o aspecto heterogêneo da terra e sua extensão não permitem o emprego exclusivamente da teoria dos campos eletromagnéticos, acrescentando-se também que o solo, que é um eletrólito, está sujeito a ionização devido a grandes correntes, originando-se não linearidades e forças eletromotri- zes adicionais.

O comportamento elétrico de um meio contínuo é caracterizado pelo valor de três constantes físicas em cada um de seus pontos, exprimindo-se respectivamente a capacidade do meio para:

- a) acumulação de energia sob forma magnética
- b) acumulação de energia sob forma eletrostática
- c) dissipação de energia por efeito Joule.

No caso de solos, que é o meio condutor onde se processa todo o sistema de aterramento, tem-se, sob o ponto de vista elétrico, as seguintes particularidades:

- Permeabilidade: é a característica que permanece constante e igual a unidade.
- Constante dielétrica: varia de acordo com a natureza do solo, de 1 a 80.
- Resistividade: varia de 1 a 10.000 ohmsxmetro e é o elemento fundamental na análise do sistema de a-

terramento.

1.1 - Utilização do Sistema de Aterramento

O sistema de aterramento tem as seguintes aplicações básicas:

- Aterramento do sistema elétrico para proteção contra surtos de manobra e/ou origem atmosférica.
- Aterramento dos neutros para estabilizar os circuitos de potencial em relação à terra e propiciar meios para os circuitos de relês de proteção detectarem e eliminarem as faltas para a terra.
- Aterramento das partes metálicas não energizadas e estruturas de equipamentos elétricos para segurança do pessoal.
- Limitar os gradientes de potencial, como os potenciais de passo e de toque, durante as faltas para a terra, para proteção do pessoal na área de equipamentos elétricos.

1.2 - Conveniência de Sistemas Aterrados

São bastantes conhecidas as razões de se terem os sistemas elétricos nos níveis de transmissão, distribuição e industrial devidamente aterrados. Este assunto foi polêmico no início do século, porém hoje não é mais motivo de discussões, entretanto as vantagens e tipos de aterramento são analisados por D. L. Beeman [1.7]¹ e na Norma IEEE Std. 142 - 1972 [2.2].

1.3 - Requisitos de um Sistema de Aterramento

Os sistemas de aterramento devem apresentar, devido à sua construção, os seguintes requisitos:

- baixa resistência de aterramento
- alta capacidade de condução de corrente
- valor de resistência de aterramento constante nas diversas estações do ano, isto é, não ser influenciado com as condi-

¹ Os números entre colchetes se referem a bibliografia relacionada no final deste trabalho.

ções climáticas e meteorológicas.

- apresentar a melhor segurança ao pessoal.

1.4 - Definições Básicas

1.4.1 - Sistema de Aterramento

É o conjunto de cabos condutores e hastes, interligados por conectores, circundados diretamente pelo solo, ou por outro elemento, com a finalidade de dissipar para terra as correntes que sejam impostas a este conjunto.

O sistema de aterramento é também denominado rede de terra. A rede é formada por malhas, que são os espaços abertos entre os nós da rede.

Todo o conjunto que entra em contacto direto com o solo, ou seja, os cabos, hastes e conexões, é denominado eletrodo.

1.4.2 - Potencial de Passo

É a diferença de potencial que aparece, no momento de uma falta para a terra, entre dois pontos, situados no chão, distanciados de um metro. Esta tensão é responsável pela circulação de uma corrente através do corpo de um homem, que caminha sobre o chão, sendo que esta entra por um dos pés e sai pelo outro.

1.4.3 - Potencial de Toque e Potencial de Malha

Potencial de toque é a diferença de potencial, no instante de uma falta à estrutura, entre o ponto tocado por um homem e os seus pés, considerados a um metro da estrutura.

Esta tensão é responsável pela circulação de uma corrente através do corpo de um homem; ao tocar a estrutura no instante de falta, sendo que esta corrente caminha entre as mãos e os pés.

Caso o homem esteja na superfície do terreno na

vertical de um cabo e a estrutura no meio da malha, ou vice-versa, este potencial de toque é denominado Potencial de Malha.

1.4.4 - Potencial de Transferência

É a diferença de potencial que aparece, devido à passagem de corrente de falta à terra, entre um ponto do sistema de aterramento e um ponto remoto. O ponto é considerado como remoto, quando se localiza a uma distância superior a dez vezes a maior dimensão do sistema de aterramento.

1.4.5 - Curvas Equipotenciais

É o lugar geométrico, no solo, com relação ao sistema de aterramento, no qual se verificam os mesmos potenciais.

1.4.6 - Gradiente de Potencial

É a relação entre a diferença de potencial entre dois pontos e a distância que separa estes dois pontos.

1.4.7 - Resistência de Aterramento

É a resistência oferecida à passagem da corrente elétrica quando é aplicada uma tensão ao sistema de aterramento.

A resistência de aterramento é composta de:

- a) resistência própria de conexões, cabos, eletrodos e hastes.
- b) resistência de contacto entre o sistema de aterramento e o meio circundante, ou seja, o solo.
- c) resistência que circunda o sistema de aterramento, ou seja, a resistência do próprio solo.

O primeiro componente é praticamente desprezível nas frequências industriais. Em caso de descarga de origem atmosférica esta resistência pode ter seu valor considerado, devido ao aumento da reatância indutiva. Por este motivo o comprimento dos circuitos de cabos de guarda e de pára-raios deverão ser minimizados.

O segundo componente pode também ser considerado

como pequeno, desde que os elementos do sistema de terra sejam imunes à oxidação.

O terceiro componente depende do formato e dimensões do sistema de aterramento e da resistividade do terreno.

1.4.8 - Resistividade

Resistividade, também denominada resistência específica, é a resistência elétrica de um material de secção e comprimento unitário.

O valor da resistividade, expressa no sistema MKS em ohms x metro, é numericamente igual a resistência de um cubo de 1.00 m de aresta, medida entre suas faces opostas.

Salientam-se as seguintes propriedades da resistividade do solo:

- aumenta com a idade, da formação geológica.
- a resistividade próxima à superfície, a uma profundidade em torno de 1.00 m, pode variar consideravelmente com a umidade, variando, por conseguinte, de estação para estação do ano.
- varia com a temperatura.
- varia com a compactação do terreno.

Os valores numéricos de resistividade de diversos materiais são indicados no Anexo II.

1.4.9 - Gradiente de Resistência de Aterramento

É a relação entre a diferença do valor da resistência de aterramento entre dois pontos e a distância que separa estes dois pontos.

1.5 - Histórico dos Estudos de Sistema de Aterramento

As primeiras publicações especificamente sobre aterramento, surgiram no começo deste século. A primeira publicação "Measurements of Lightning, Aluminum Lightning Arresters, Earths Resistances, Current Resistances, and Kindred Tests" -

E.E.F. Creighton, Trans. AIEE, 1908. O autor analisa os processos de medição de resistência de aterramento e os fatores que influenciam no seu valor, tais como distância entre eletrodos e o tratamento químico do solo com sal e a duração de seu efeito.

Em 1916, F. Wenner publica, no Bulletin of Bureau of Standard, o método para medição de resistividade com quatro eletrodos.

Em 1918, C. S. Peters "Grounding Connections for Electric Systems" - U.S. Bureau of Standard, Technical Paper nº 108, apresenta fórmula para o cálculo de resistência de aterramento de um eletrodo metálico, além de discussões sobre práticas de aterramento, variações da resistividade do solo com a umidade e temperatura.

Em 1928, é publicado o livro "Ground Currents", F. Ollendorff, Springer e Verlag. É uma das excelentes publicações sobre conceitos básicos de problemas de aterramento, abrangendo praticamente todos os pontos correlacionados com aterramento, tais como, por exemplo, equação do potencial em coordenadas retangulares e curvilíneas; equação do potencial para uma fonte puntiforme de corrente em solo homogêneo, para pontos distantes da fonte; introdução do método das imagens para obtenção do campo de uma fonte de corrente localizada sob a superfície do solo; definição dos potenciais de passo e de toque; aplicação da equação de Laplace a uma fonte da corrente em um meio; raio equivalente de uma placa plana; equação da distribuição de potencial e potencial de passo na superfície do terreno usando método das imagens; fórmula para a máxima corrente no corpo humano; emprego do cabo de guarda das linhas de transmissão para reduzir a resistência de aterramento da subestação; método das imagens para determinação da resistência de aterramento de cabos próximos ou na superfície do solo; princípio da imagem tridimensional; indução de corrente alternada de terra em circuitos de comunicação. Vê-se, pois, que em "Ground Currents" foram abordados os tópicos ainda reestudados até a presente data, tendo em vista que ainda não se chegou a uma simplificação teórica que represente todos fenômenos físicos envolvidos nos sistemas de

aterramento.

Em novembro de 1928 é publicado o Paper, na G.E. Review, "Impulse Characteristics of Driven Ground", H.M. Towne, onde é analisado, com o auxílio de um oscilograma, a influência da frequência na resistência de aterramento, comprovando que a resistência decresce com a frequência.

Em março de 1932, é publicado o Paper, na G.E. Review, "Lighting Arrester Ground", H. M. Towne, onde é feita uma análise prática do sistema de aterramento, destacando-se que:

- a) a resistividade aumenta bruscamente quando a umidade é abaixo de 22% por peso;
- b) a resistividade aumenta bruscamente quando a temperatura cai abaixo de 0°C, mostrando que os eletrodos devem ficar abaixo da linha de congelamento do solo;
- c) as hastes são economicas entre 2,40 e 3,00 metros de comprimento e seu diâmetro tem pouco significado na resistência de aterramento;
- d) as hastes devem ser espaçadas de uma distância superior a 1,80 metros.

Em 1936 H.B. Dwight [3.1] publica uma relação de fórmulas, com aceitáveis aproximações, para cálculo de resistências de aterramento para diversas formas e configurações de eletrodos. Estas fórmulas são ainda utilizadas na Norma IEEE - Std 142 - 1972 [2.2]. Também em 1936, L.P.Ferris, B.G.King, P.W.Spen se, H.B.Williams publicam o Paper "Effect of Electric Shock on the Heart" - AIEE Trans. May, onde já se conclui que é a corrente, não a tensão, que é a responsável pela fibrilação ventricular nos animais e ser humano e o dano é função do tempo. Este trabalho seria a base para as pesquisas de Charles F. Dalziel, na última versão, de 1972.

Em 1937, V.E. Manilov e A.K. Torpov apresentam na publicação do CIGRE - Report nº 332 - "Measurement of the Resistance of Ground Connections of 220 - 110 kV Substation with Short-Circuit Currents" o resultado da medição de resistência de aterramento com voltímetro e amperímetro e a mesma resistência medida com grandes correntes, da ordem de milhares de am

peres. Tais medições apresentaram o mesmo resultado. Também em 1937, A.E.W.Asten, H.G.Taylor, apresentam na publicação do CIGRE - Report nº 210 - "Protection to Animals from Voltage Gradients Around the Earth Electrodes" soluções para aterramento do neutro de transformadores afim de reduzir os gradientes que se apresentam durante as faltas para a terra. A solução básica consiste em aterrar o neutro em um ponto inacessível ao toque ou ao caminhamento.

Em 1940, Fawcett, Grimmet, Sholter e Taylor, publicam no IEE Journal - October, "Practical Aspects of Earthing", onde apresentam os aspectos práticos de um sistema de aterramento, que são as então Regulamentações Britânicas aplicadas a geração, transmissão e uso da eletricidade.

Em 1941, J.R.Eaton publica, G.E.Review - Vol 44- "Grounding Electric Circuits Effectively - Calculations and Installation", considerações sobre resistências de hastes em solo homogêneo, observando que a não uniformidade do terreno pouca influência teria na resistência. Chega também as seguintes conclusões:

- a) a conexão à terra é essencialmente um resistor, praticamente, confinado ao volume de terra que envolve o eletrodo;
- b) o aumento do comprimento de haste no solo corresponde, para efeito de resistência, a praticamente o mesmo comprimento em paralelo na horizontal.
- c) hastes em paralelo tem a resistência total diminuída com a diminuição do espaçamento entre elas;
- d) grandes correntes passando através de eletrodos, por tempo apreciável, provocam a desumidificação do solo, resultando num rápido aumento da resistividade e que o aumento da temperatura é inversamente proporcional à raiz quadrada da resistividade do solo.

Em 1942, R.E.Armington, A.E.Snowden - AIEE-Trans, Vol. 61, apresentam as equações para a resistência de impulso.

Em 1945, W.R.Bullard apresenta Elec.Eng. Vol.64, "Grounding Principles and Practice IV - System Grounding", recomendações de ordem práticas tais como:

- a) uma rede de terra, constituída de cabos e hastes, é o mais e conômico sistema de aterramento;
- b) é aconselhável, quando a resistividade do solo é elevada, tra tar o terreno com produtos químicos;
- c) se o terreno é extremamente sêco é conveniente canalizar ã gua para umedecê-lo;
- d) é preferível que se tenha só um sistema de aterramento na subestação, não se devendo ter terras para pãra-raios e neutro de transformador separados dos demais equipamentos;
- e) recomenda o uso de placas aterradas junto aos equipamentos, onde o operador se localiza sobre as mesmas;
- f) os cabos devem ser dimensionados para não se fundirem pela corrente de falta à terra;
- g) os equipamentos devem ter dois ou mais circuitos ligando-os ao sistema de terra.

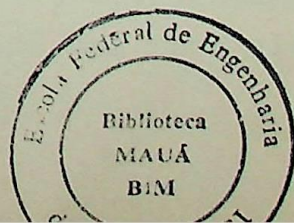
Em 1946, Charles F. Dalziel, publica seu estudo "Dangerous Electric Currents" - AIEE Trans. Vol. 65, onde apresenta a equação da corrente suportada pelo homem, ou seja, $I = 0,165/t^{1/2}$, que por sua vez será modificada pelo autor em 1972 para $I = 0,116/t^{1/2}$, sendo t o tempo em segundo e I em Ampères.

Em 1946, K. Berger - "Comportment des Prises de Terre Sous Courants de Choc de Grand Intensité", CIGRE Report 215 - conclui que:

- a) resistência para impulso é a mesma medida por método convencional desde que a intensidade de campo não apresente mais que 2,5 a 3 KV por centímetro;
- b) quando a intensidade de campo é alta a resistência se apresenta de uma maneira não linear;
- c) a resistência para impulso é superior a resistência para bai xa frequência.

Em 1948, C.C. Jones e C.R. Jager - "Potencial Gradients Within and Around Substation Ground Fields", Paper AIEE do Southern Distric Meeting - concluem que:

- a) o desempenho do sistema de aterramento depende da resistividade, profundidade das hastes, área coberta e corrente de falta à terra;



- b) o diâmetro, resistência de contacto e variações pelas estações do ano pouca influência têm;
- c) a forma de rede para o sistema de aterramento minimiza o gradiente;
- d) através de testes, prova que a colocação de cabos intermediários numa rede, isto é, reduzindo as malhas, há uma redução do potencial máximo no centro.

Em 1949, E.D.Sande [1.1], publica um livro no qual faz um detalhado estudo matemático dos fenômenos de sistema de aterramento, incluindo, dentre outros tópicos, conceitos básicos de eletromagnetismo, resistividade de solo não uniforme com até três estratificações e resistência de aterramento. Esta publicação é reeditada em 1967, pelo Dover Publications, N.Y.

Em 1951, M.G.Badier - "Prospection Systematique des Gradients de Potencial au Voisinage et aL'Interieur d'un Poste de Transformation", Bulletin Societé Française des Electriciens, Julho - apresenta uma séria de recomendações, teóricas e práticas, onde se destacam:

- a) conveniência de utilização dos cabos de guarda das linhas de transmissão interligados à rede de terra da subestação;
- b) a variação do potencial em torno de uma rede é a mesma que em uma placa de mesma área;
- c) a presença de estruturas metálicas enterradas e não conectadas ao sistema de aterramento deformam o gradiente.

Em 1953, E.T.B.Gross [3.3] trata da resistência de rede de terra, onde o uso de hastes é impraticável, baseado na fórmula $R = \rho/4.\pi.C$, onde ρ é resistividade e C é a capacitância combinada do sistema de eletrodo e sua imagem. O autor chega as seguintes conclusões:

- a) a resistência diminui com o aumento da área da rede, com o aumento do diâmetro dos condutores utilizados, com a profundidade dos condutores;
- b) o número de malha não deve exceder dezesseis numa rede econômica.

Ainda em 1953, H.R.Armstrong [3.4] apresenta seu trabalho baseado em modelo reduzido, na realidade uma cuba ele-

trolítica com os eletrodos de testes. Tais resultados podem ser comprovados por métodos analíticos desenvolvidos posteriormente.

Em 1954 o AIEE Committee Report publica o "Application Guide on Methods of Substation Grounding" [3.5], resumindo as até então informações sobre os sistemas de aterramento, sem entretanto em se preocupar com o cálculo analítico destes sistemas. Também neste ano, S.J.Schwarz [3.6] apresenta fórmulas para o cálculo de resistência para rede e hastes.

Em 1955, S.J.Schwarz [3.7] apresenta uma série de sugestões, como se fossem "dicas", para construção de um sistema de aterramento. Neste ano também, S.J.Litrides [3.8] apresenta a viabilidade de sistemas de aterramento totalmente em aço, onde podem ser minimizados os problemas de corrosão, prática esta até hoje ainda não em uso no Brasil.

Em 1955, E.T.B. Gross [3.9] publica a segunda parte do artigo de 1953 para o cálculo de resistência de rede de terra, que entretanto exige um esforço computacional muito grande para considerações práticas. Também neste ano de 1955, J.Zaborzky [3.10] apresenta um estudo sobre o sistema de aterramento em terreno não uniforme, isto é, com considerações sobre solo com estratificações.

Em 1956, E.T.B. Gross [3.11] publica a terceira parte de seu artigo [3.9], com a análise do sistema de terra pelas subáreas.

Em 1958, o AIEE Committee Report [3.12] publica uma coletânea de informações, que complementam sua publicação de 1954 [3.5]. Esta publicação é praticamente o conteúdo da publicação IEEE [2.1] que se encontra em vigor atualmente. Nesta publicação [3.5] são desenvolvidos os métodos de cálculo, com as devidas aproximações, que entretanto possibilitam o seu uso em aplicações práticas. Resulta-se que são dignas de atenção as discussões por diversos especialistas, sobre o material apresentado, cujas soluções ainda hoje, são discutíveis. Também neste ano, L.S.Palmer [3.13] apresenta um estudo sobre resistividade, em várias estratificações, aplicada à pesquisa geolétrica, visando, inclusive, a detecção de cavernas no sub-solo.

Em 1959, A.L.Kinyon, "Correlation of Measured and Calculated Substation Ground Resistance" - AIEE Trans., Vol. 78, publica um dos métodos mais científicos desenvolvidos para o projeto de rede de terra tendo em vista a importância da medição de resistividade. Recomenda medições, pelo método de quatro hastes de Wenner, com distâncias entre hastes de cinco, dez, vinte, cem pés, devendo chegar para grandes subestações até 200 pés.

Em 1960, H.R.Armstrong [3.14] publica os resultados dos testes em modelo reduzido, em cuba eletrolítica, com a utilização de um voltímetro de alta impedância para as medições. Suas conclusões são:.

- a) em áreas pequenas, as hastes não tem interferência no potencial de passo e toque, isto é, não alteram o gradiente de potencial;
- b) a utilização de hastes somente tem interferência na resistência de aterramento, principalmente se a camada superior do terreno está seca ou congelada;
- c) a única maneira de analisar as variações de potencial sobre o terreno para as diversas configurações de rede de terra é o modelo reduzido.

Em 1961, R.F.Stevens, "Optimum Diameter, Spacing, and Burial Depth of Ground-Grid Conductor" - IEEE Trans., apresenta uma sugestão de um programa para computação a fim de se obter a otimização de um sistema de aterramento, em termos econômicos, condicionados às exigências de potenciais mínimos permissíveis, desde que se conheçam todos os custos unitários de material e mão de obra envolvidos na construção de um sistema de aterramento, tais como abertura de valas, lançamento de cabos, conexões, etc. Também em 1961, A.L.Kinyon [3.15], apresenta uma série de resultados de experiências de campo, efetuados pela Bonneville Power Administration System, sobre medições de resistividade. Suas principais conclusões são:

- a) as medições efetuadas com hastes espaçadas de grande distância, em torno de 30,00 m, englobam um grande volume do solo com conseqüente maior profundidade e o valor obtido é o melhor para ser utilizado no cálculo do sistema de terra;

- b) o pátio da subestação deverá possuir de dois a quatro locais de medições;
- c) os espaçamentos das hastes de medição, pelo método de quatro eletrodos, deverão se iniciar com 1,5 a 3,0 m e serem incrementados até 30,00 ou 60,00 m;
- d) para a determinação da resistência próxima à superfície do terreno, podem-se tomar os valores mais baixo de resistividade encontrados nas medições.

Em 1963, E.T.B.Gross [3.16] publica a IV série de seu estudo, com um defasamento de dez anos com relação ao primeiro [3.3]. Neste trabalho o autor desenvolve seu estudo levando em consideração a não uniformidade do solo, assumindo, para efeito de estudo, o terreno com duas estratificações, com resistividades ρ_1 e ρ_2 .

Em 1966, A.L. Kinyon [3.17] apresenta um desenvolvimento teórico e resultados de campo para análise do comportamento do solo perante o retorno, em um sistema de transmissão de corrente contínua em E.H.V., através da terra. Entre os vários assuntos abordados, conclue-se que:

- a) há o aparecimento de corrosão galvânica em estruturas enterradas entre os eletrodos;
- b) os eletrodos de C.C. e C.A. devem ser independentes;
- c) os gradientes de tensão nas circunvizinhanças dos eletrodos podem ser minimizados dentro das condições de segurança.

Também nesse ano, o mesmo autor publica "Direct Current Ground Electrode Behavior" - IEEE Trans. P.A.S., onde continua o estudo sobre o sistema de aterramento específico para sistema de transmissão em corrente contínua, concluindo que:

- a) a resistência de aterramento utilizada para a determinação das condições de segurança de proteção de falta, descargas atmosféricas e aumento do potencial não é confiável para o estudo do comportamento de um sistema de C.C. operando com retorno pela terra por longo período;
- b) densidade de corrente permissível entre face do eletrodo e terra varia aproximadamente com a recíproca da raiz quadrada da resistividade do solo.

Também neste ano é publicado por S.G.Pann [3.18] um estudo sobre esse mesmo assunto de comportamento do sistema de aterramento para transmissão em EHV em corrente contínua. Conclui o autor que os eletrodos devem ser localizados na região oceânica, em se tratando de área metropolitana .

Em 1967, R.F.Harrington [3.19] publica um trabalho de caracter científico, não de sistema de aterramento, mas sim de cunho geral, que é uma poderosa ferramenta matemática para o desenvolvimento computacional da teoria do eletromagnetismo. O tratamento matricial dos fenômenos envolvidos no sistema de aterramento permite uma análise das singularidades resultantes de descontinuidades de distribuição de correntes nos eletrodos e devido a forma dos mesmos.

Também em 1967, B. Thapar [3.20] publica a comparação entre os resultados obtidos em modelo reduzido com utilização de cuba eletrolítica, e as fórmulas aproximadas recomendadas pelo AIEE Committee [3.12], [2.1], concluindo que as aproximações são aceitáveis sob o ponto de vista prático.

Em 1969, G.F.Tagg [3.21], publica seu processo para determinação da resistência de um sistema de aterramento, de dimensões consideráveis, e composto de cabos e hastes, ou seja, de uma rede de terra como é requerida para subestações.

Em 1970, E.J.Fagan, "The Use of Concrete Enclosed Reinforcing Rods as Grounding Electrodes" - IEEE Trans. in Industry and General Applications, Vol.4, publica um estudo sobre a viabilidade de utilização de hastes metálicas envolvidas por concreto, bem como a utilização dos ferros de armação das estruturas de concreto como um componente do sistema de aterramento. Este assunto é ainda polêmico no que se refere, principalmente, ao aterramento ou não da ferragem estrutural do concreto das casas de força de usinas hidroelétricas.

Em 1972, C.F.Dalziel, "Electric Shock Hazard" - IEEE Spectrum, reformula sua teoria sobre a corrente que provoca a fibrilação ventricular, em função da duração de sua atuação no corpo humano na região torácica. A equação para corren-

te suportável, em Ampères e em frequência industrial, passa para $I = 0,116/t^{1/2}$, para t em segundos.

Ainda em 1972, T.Giao [3.23] apresenta um estudo analítico sobre o comportamento do potencial e seu gradiente na circunvizinhança dos eletrodos de terra para sistema HVDC. O autor chega às seguintes conclusões:

- a) as considerações, aceitas até esta data, da distribuição uniforme de corrente sobre a superfície do eletrodo é inaceitável para as configurações práticas de eletrodos para HVDC;
- b) a máxima densidade de corrente, no caso de eletrodos em forma de estrêla e anel-estrêla, é da ordem de duas ou três vezes a densidade de corrente média;
- c) a não uniformidade de densidade de corrente afeta o potencial e o gradiente de potencial somente nas imediações do eletrodo;
- d) sob o ponto de vista de corrosão local do eletrodo a forma mais aconselhável é a de anel.

Neste mesmo ano, o mesmo autor [3.24], apresenta um estudo também sobre os eletrodos de sistema de HVDC, levando em consideração duas estratificações do solo, para os fenômenos analisados em [3.23] com solo homogêneo. O estudo é desenvolvido pelo método das múltiplas imagens combinado com o método das matrizes [3.19]. As principais conclusões do autor são:

- a) a influência de duas estratificações do solo pode ser muito significativa, dependendo da condutividade relativa μ e a relação entre a espessura da primeira estratificação e a dimensão do eletrodo (condutividade relativa é definida como a relação entre as condutividades de cada estrato):
- b) no caso da estratificação superior possuir maior condutividade que a inferior, há uma tendência para as correntes fluírem mais para esta parte do eletrodo, resultando um aumento do potencial e do gradiente;
- c) uma nova configuração de eletrodo, com interior em anel e braços radiais, apresenta um melhor desempenho.

Em 1972 também é publicado a Norma IEEE | 2.2 | on

de são relacionadas recomendações de ordem prática de aterramento, principalmente para sistemas industriais.

1973 é um ano marcado por importantes publicações no setor de sistema de aterramento, D.Mukhedkar [3.25] publica os resultados de modelo reduzido e suas comparações com métodos analíticos [3.16] para solo não homogêneo, válido para C.C. e C.A. O autor chega a erros inferiores a dez por cento, sendo os valores calculados sempre superiores aos medidos, o que demonstra que o processo analítico é conservativo. Neste ano também, D. Mukhedkar - F.Dawalibi [3.26], apresentam os resultados de modelo reduzido para avaliação de distribuição de potencial em torno de eletrodos, considerando o solo com duas e três estratificações. O autor conclue:

I) para duas estratificações que:

- a) para uma dada configuração de eletrodo ou qualquer forma de eletrodo usual, o aspecto das linhas equipotenciais é idêntico, a uma distância de três a quatro vezes a dimensão máxima do eletrodo;
- b) próximo ao eletrodo, as linhas equipotenciais seguem a forma do eletrodo;
- c) próximo do eletrodo, o gradiente de potencial depende somente da resistividade da primeira camada, desde que o eletrodo esteja envolvido somente por esta camada e próximo da superfície do solo;
- d) o gradiente do potencial apresenta valor máximo próximo do eletrodo;

II) para três estratificações que:

- e) variações locais na resistividade da primeira camada ocasionam mudanças nas linhas equipotenciais, para uma mesma forma de eletrodo;
- f) havendo descontinuidade local no valor da resistividade com relação a da primeira camada, haverá descontinuidades nas linhas equipotenciais.

Ainda no ano de 1973, S.S.Devgan - E.R.Whitehead [3.27], apresentam um modelo analítico para o estudo do comportamento de sistema de terra na presença de surtos. O autor conclue que a não homogeneidade do solo e o rompimento do seu die

lêtrico tornam o estudo mais complexo, entretanto aconselham com configurações especiais para o aterramento das torres de linha de transmissão. Neste ano também, F. Dawalibi - D.Mukhedkar [3.28] apresentam um trabalho sobre a medição de resistência de eletrodos em solo não homogêneo. Para solo com duas estratificações o autor faz uma série de consideração para que se obtenham valores de resistência e apresenta o desenvolvimento teórico do seu método, levando em consideração o espaçamento da haste de medição de corrente, a variação de resistividade, a dimensão e forma do eletrodo.

Em 1974, R.M.liuey - K.Rajaratnan [3.29] publicam um desenvolvimento teórico para a determinação dos parâmetros de um sistema de terra, que possibilite o cálculo da distribuição de correntes entre os diversos sistemas interligados, levando em consideração a reatância e a resistência do sistema. Baseado nos parâmetros determinados, o autor constroe um modelo e faz as medições de distribuição de corrente.

Ainda no ano de 1974, A.E.Hermeto [3.30] apresenta um desenvolvimento teórico para o cálculo de resistências de aterramento para as diversas configurações de eletrodos e para cálculo dos gradientes de potencial na superfície do solo sob as condições de falha à terra. O autor conclue que:

- a) o melhor rendimento de resistência de aterramento se dá para um eletrodo retilíneo, seguindo-se a forma quadrada e circular;
- b) a presença de eletrodos em cruz reduz a resistência de aterramento de uma configuração;
- e) a forma circular apresenta melhores condições para minimizar a corrosão;
- d) noventa por cento da resistência de aterramento de um condutor está confinada em um raio de 1,50 m;
- e) a resistência de aterramento de uma estrutura é tanto menor quanto maior o volume de terra por ela envolvido;
- f) o decréscimo de resistência de aterramento de uma rede é desprezível a partir da 16.^a malha;
- g) as hastes verticais decrescem, no máximo, 10% a resistência de aterramento, porém diminuem os gradientes superficiais e

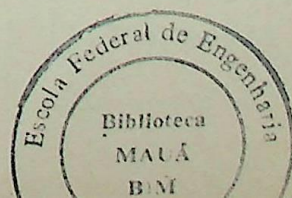
de resistência de aterramento no caso de solos estratificados;

- h) para resistência de aterramento é válido a consideração de densidade de corrente uniforme nos eletrodos, porém para distribuição de potencial é razoável nas áreas externas à rede de terra e muito alterada na área interna.

Em 1975, D. Mukhedkar - F. Dawalibi [3.31],[3.32] [3.33] publicam uma sequência de três artigos sobre a otimização do projeto do sistema de aterramento de subestação em solo com duas estratificações. Na primeira parte é feito um desenvolvimento matemático e a comparação dos resultados analíticos obtidos da aplicação desta teoria com resultados de medições em modelo reduzido. O autor conclui que há uma variação inferior a dez por cento entre os valores calculados e os medidos, erro este que corresponde a precisão dos instrumentos de medição empregados. Na segunda parte é feito uma comparação entre resultados teóricos e experimentais, com diferentes configurações construtivas de rede de terra, bem como uma atribuição de distribuição de corrente nos diversos eletrodos da rede. Esta distribuição de corrente é considerada em três hipóteses:

- A - densidade de corrente uniforme nos eletrodos;
- B - densidade não uniforme, com lei de distribuição considerando valores de distribuição "lógicos" intuitivos;
- C - densidade não uniforme, com distribuição linear do centro para a periferia.

O autor conclui que: as fórmulas de Laurent e Schwarz são pessimistas e dão valores de resistência maiores que os do autor, havendo coerência entre a fórmula de Schwarz e do autor somente para o caso de uma rede de uma única malha. Para o potencial de malha, o método IEEE [2.1] apresenta valores pessimistas para uma rede de uma única malha e valores otimistas para um maior número de malhas (superior a quatro), apresentando valores absurdos para rede com mais de quarenta malhas. Na terceira parte é feito um estudo do desempenho do sistema de aterramento e apresentadas novas configurações para construção de rede de terra. O autor conclui que:



- a) se o sistema for estudado com três estratos, o tempo computacional aumenta de vinte vezes com relação ao mesmo estudo com dois estratos;
- b) a resistência varia linearmente com a espessura da primeira camada estratificada, quando esta varia de 1,0 até o raio equivalente da rede de terra; o potencial de malha depende principalmente da resistividade da primeira camada;
- c) a resistência de aterramento decresce lentamente com o aumento do número de malhas;
- d) o potencial de malha aumenta lentamente com o aumento do número de malhas;
- e) a configuração física do eletrodo da rede tem influência no potencial de malha;
- f) as hastes provocam um aumento do potencial de malha, isto devido a uma maior diferença de potencial entre a região profunda das hastes e a superfície do terreno, maior que a diferença de potencial exercida pelos cabos horizontais. Tal assertiva, constestada por D.A.Edwardson (Northeast Utilities Serv. Comp.) na própria publicação, é justificada pelo autor como válida para o caso em estudo;
- g) é possível determinar o fluxo de corrente de falta à terra entre os diversos sistemas fisicamente distanciados;
- h) na determinação da resistência de aterramento pode-se considerar a densidade de corrente uniforme nos eletrodos da rede de terra;
- i) na determinação do potencial de malha deve ser levado em consideração a variação da densidade de corrente nos diversos eletrodos, sendo aceitável uma distribuição linear do centro para a extremidade, com mínima corrente no centro.

Em 1975, T.H. Dodels - H.E.Spindle [3.34] publicam um trabalho destinado exclusivamente a aterramento de subestações tipo isolamento a gas (SF_6), cujas exigências de aterramento são peculiares. O autor conclue que as normas estabelecidas pelo IEEE [2.1] não se aplicam a este tipo de subestação, onde é de fundamental importância a determinação da reatância indutiva, em função da configuração da subestação e sua blindagem. Também neste ano de 1975, S.L.Larsen - D.E.Nordell [3.35] publi

cam um trabalho sobre a medição da resistência de aterramento e sua influência nos circuitos metálicos de comunicação. O autor recomenda a instalação de um transformador de isolamento, classe 15 KV, com o neutro do secundário conectado diretamente ao sistema de aterramento da subestação, a fim de se obter um sistema de proteção para o aterramento da rede de comunicação.

Em 1976, F. Dawalibi - D. Mukhedkar [3.36] publicam o método "Multi Step Analysis" para a determinação da distribuição de corrente nos eletrodos, quer para um sistema isolado quer para um sistema complexo de eletrodos interconectados, como nos sistemas de potência interligados. O método considera três tipos de interconexão: eletrodos próximos, eletrodos distantes e eletrodos remotos. O autor conclue que o método de "Multi Step" apresenta as seguintes vantagens:

- a) resultados mais precisos que o método das matrizes;
- b) permite o cálculo simultâneo da distribuição de corrente e da resistência de aterramento;
- c) requer menor tempo de computação que outros métodos;
- d) pode ser utilizado a sistemas complexos interligados por cabos de guarda das linhas de transmissão.

Ainda em 1977, J.G.Sverak [3.37] publica um trabalho, cujo fundamento teórico é o da Norma IEEE [2.1], onde é sugerido um afastamento variável, menor nas periferias e aumentando à medida que se caminha para o centro da rede, mantendo uma simetria em relação aos eixos da subestação. Com esta prática se consegue uma diminuição do gradiente de potencial na superfície do terreno. Apesar de ser delineado um programa computacional, o autor não apresenta o algoritmo da lei de variação deste espaçamento variável.

Em 1977, F. Dawalibi - D. Mukhedkar [3.38] publicam um método para a determinação da resistência de aterramento de sistemas de aterramento interligado, não utilizando o método do potencial médio, e considerando o solo com duas estratificações. O autor conclue que:

- a) o método apresentado permite o cálculo da resistência de eletrodos de várias formas pelo uso de uma única técnica;

- b) o método é isento de aproximação, pode ser utilizado para solo de uma ou duas estratificações;
- c) pode ser empregado também para eletrodos curvilíneos, apesar de ser mais simples para retilíneo;
- d) o tempo computacional varia com o quadrado do número de condutores.

Ainda em 1977, C.H. Markovits - J.A. Leon [3.39] apresentam uma série de recomendações para medições e critérios de projeto de sistema de aterramento. Destaca-se uma metodologia para a obtenção das resistividades das diversas estratificações baseado nas medições, com diversos espaçamentos entre hastes pelo tradicional método de Wenner, com utilização de curvas padrão.

Em 1978, F.Dawalibi - D. Mukhedkar [3.40] publicam um estudo sobre o estudo analítico do potencial de terra transferido. Este é um dos pontos mais receados quando se tem uma instalação complexa de sistema de aterramento. O autor enfatiza que a Norma IEEE [2.1] indica os perigos deste potencial, porém não apresenta soluções para a sua determinação numérica. O autor conclui que:

- a) quando há tubulações metálicas enterradas a distribuição de corrente é irrealista quando a falta à terra é próxima do sistema de aterramento;
- b) a presença de estruturas metálicas enterradas na área de subestação modificam consideravelmente o gradiente de potencial na superfície do terreno.

O histórico abrangeu as principais publicações feitas sobre o assunto. Há, entretanto, uma listagem de vasta bibliografia sobre sistema de aterramento catalogada na publicação "Bibliography on Ground Resistance and Potential Gradient Measurements", AIEE Committee Report, AIEE Trans. April 1960.

CAPÍTULO 2

FINALIDADE

2. FINALIDADE

A presente Dissertação, de caracter monográfico, tem como finalidade o estudo analítico do comportamento de um sistema de aterramento, para subestações transformadoras de alta tensão. Neste estudo são considerados:

a) Análise Tridimensional

A rede de aterramento é analisada nas suas três dimensões, ou seja, com o desenvolvimento matemático utilizando as coordenadas x, y e z.

b) Camadas Estratificadas

O solo é considerado como constituído de dois estratos, sendo finita a profundidade da primeira camada e infinita a profundidade da segunda. A consideração de somente duas estratificações é recomendada para estudos de aterramento, exigindo-se além de duas exclusivamente para prospecções geológicas.

c) Densidade de Corrente

Distribuição uniforme de corrente nos cabos que compõem a rede de terra, isto é, Ampères/metro constante em todo os condutores. Esta consideração não introduz erros apreciáveis desde que a localização da falta à terra se dê em um ponto distante da subestação.

d) Configuração Física

Variação do arranjo físico dos cabos, que compõem a rede, dentro de uma mesma área, com variações de espaçamentos e configuração. Com esta variação será analisada a economia que advém, com a redução do material da rede, para se obter, na superfície do terreno, uma minimização das diferenças de potencial de ponto para ponto, com conseqüente menor gradiente de potencial.

Ressalta-se que os processos de cálculo que têm

sido aplicados, até a presente data, para dimensionamento de sistemas de aterramento, seguem as recomendações do "IEEE Guide for Safety in Substation Grounding", Std. 80 - 1976. Esta Norma faz o desenvolvimento matemático baseado na hipótese de um solo homogêneo, constituído de uma única camada, e os fenômenos são analisados em um único plano xy, além de somente considerar o potencial produzido por uma série de cabos paralelos, não se levando em conta os cabos perpendiculares aos considerados ou outros que por ventura venham a ser instalados de uma maneira geométrica diferente. Observa-se também que esta Norma, ainda na edição de 1976, mantém imutáveis os princípios estabelecidos pelo AIEE Committee Report, publicado no Transaction - October 1958, sob o título "Voltage Gradients Through the Ground Under-Fault Conditions".

Tendo em vista as necessidades de se atualizar esta Norma, o IEEE, durante o Winter Meeting, de fevereiro de 1979 em Nova York, através do Working Group 69.2, oficializará as providências para a sua revisão e posterior publicação em 1981.

Em vista do exposto acima, pode-se afirmar que o presente estudo desenvolve um método de análise muito mais preciso que o convencional, apesar de exigir um esforço computacional relativamente grande. Mas como o objetivo do presente estudo visa uma análise de conceitos básicos, o esforço computacional é plenamente justificável. Deve-se, entretanto, salientar que o presente trabalho, com características próprias da área de pesquisa, não fará as simplificações necessárias para que o estudo, de imediato, tenha uma aplicação conveniente sob o ponto de vista de custos computacionais, para sua utilização comercial. Porém, os resultados e conclusões apresentados indicam a possibilidade de se chegar a um programa-produto, onde as economias obtidas no projeto, resultado do modelo mais complexo adotado, superem, com resultados expressivos, os maiores custos computacionais resultantes.

CAPÍTULO 3

SISTEMÁTICA DO ESTUDO

3. SISTEMÁTICA DO ESTUDO

O presente estudo é feito em três etapas distintas, sendo:

a) Primeira Etapa

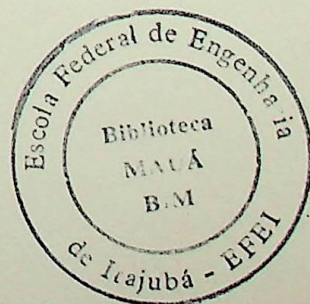
Desenvolvimento do modelo matemático.

b) Segunda Etapa

Desenvolvimento de um programa computacional, para o cálculo do potencial na superfície do terreno, sobre a rede de terra.

c) Terceira Etapa

Estabelecimento de modelos geométricos básicos de rede de terra e sua respectiva análise numérica, com as conclusões e recomendações de ordem prática para a configuração física dos condutores, tendo em vista a economia e segurança do elemento humano que milita na área.



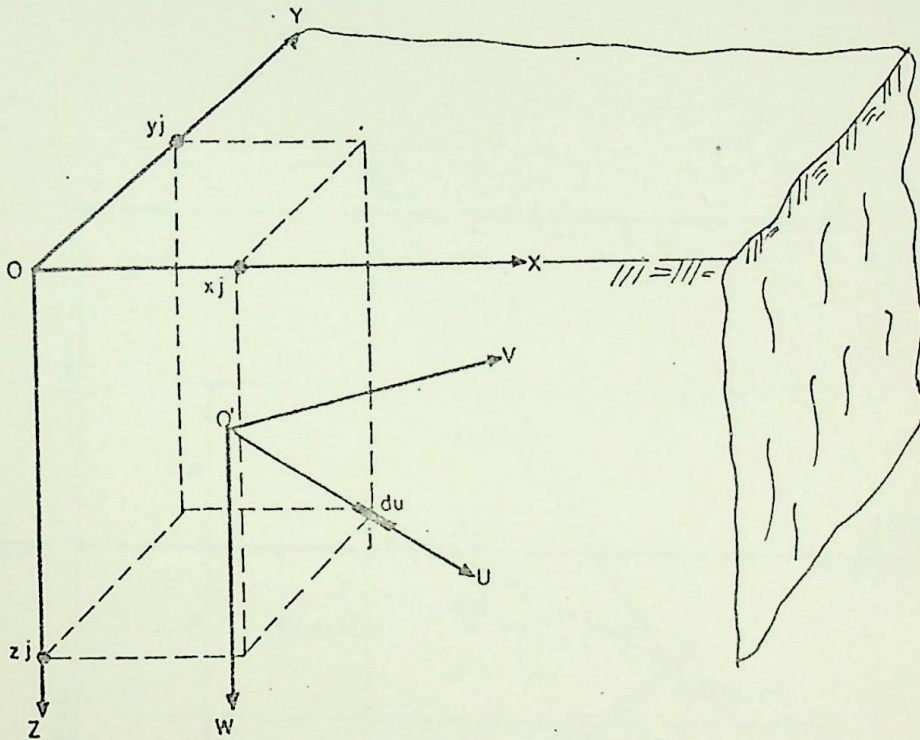
CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DO MODELO
MATEMÁTICO

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

4.1 - Potencial Produzido por um Eletrodo Puntiforme

É considerado um eletrodo infinitesimal "j", cujas coordenadas, nos eixos x, y, z , são x_j, y_j, z_j , respectivamente, conforme Fig. 4.1.1.



ELETRODO INFINITESIMAL
FIG. 4.1.1.

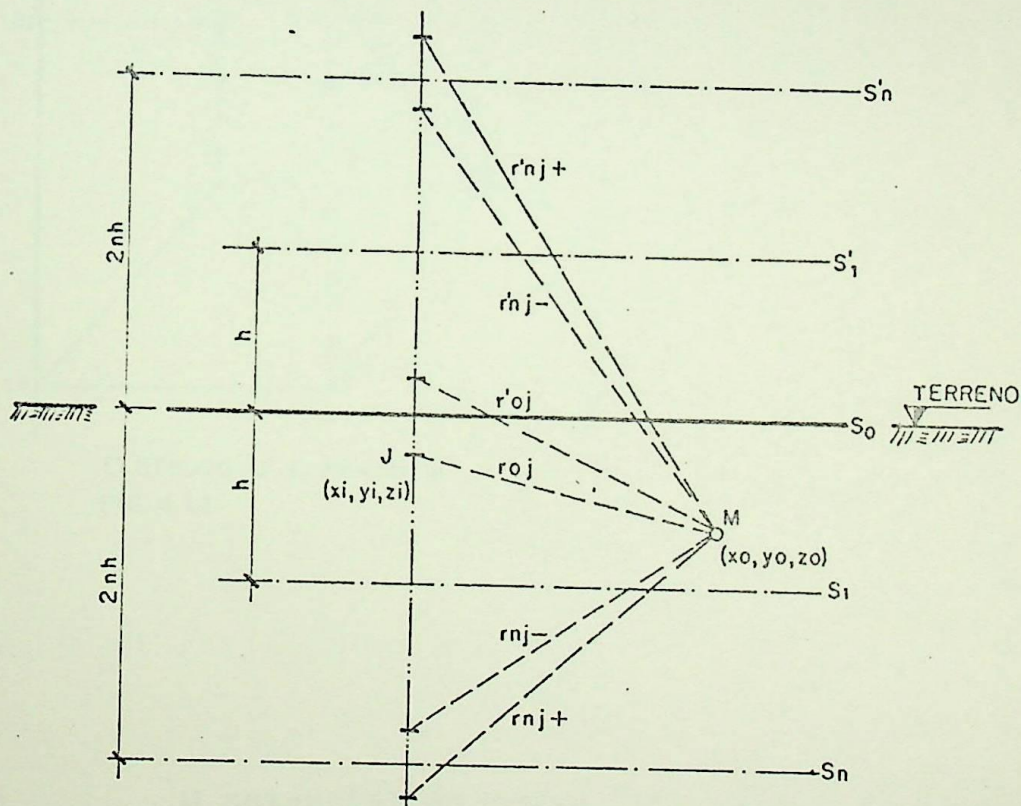
LEGENDA: j - eletrodo infinitesimal
 du - comprimento do eletrodo j

Considerando que o eletrodo "j" injeta uma corrente I_j no solo. Sendo i_j a densidade de corrente por metro, tem-se

$$I_j = i_j \cdot du \quad (4.1.1)$$

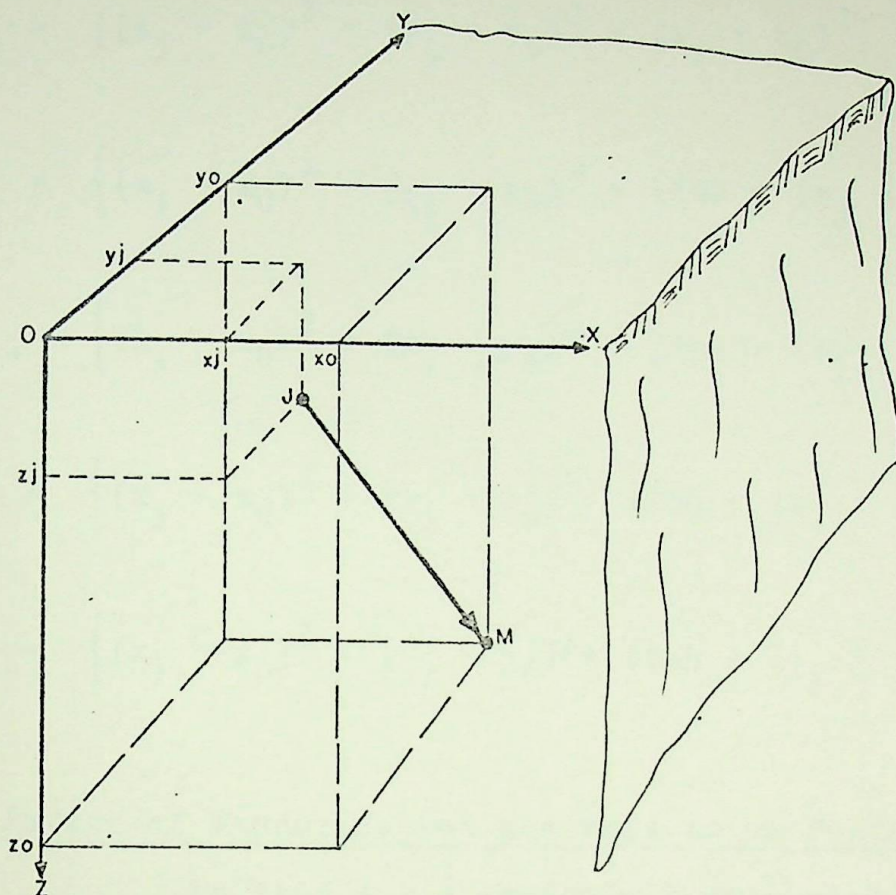
Dimensionalmente, tem-se I_j em Amperes; i_j em Amperes/metro. O potencial num ponto M cujas coordenadas são x_0, y_0, z_0 , nas coordenadas X, Y, Z, ou u_0, v_0, w_0 , nas coordenadas U, V, W, pode ser determinado pelo método das imagens.

O método das imagens pode ser visualizado num único plano, conforme indicado na Fig. 4.1.2, e a indicação de eletrodo "j" e ponto "M" é feita, nas três dimensões, na Fig. 4.1.3.

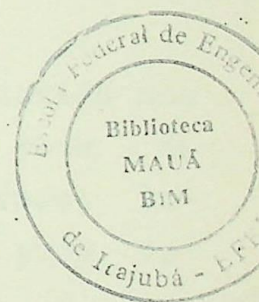


MÉTODO DAS IMAGENS PARA SOLO DE DUAS ESTRATIFICAÇÕES.

FIG. 4.1.2.



ELETRODO "J" E PONTO "M"
FIG. 4.1.3.



O potencial no ponto "M", devido ao eletrodo "j" é dado pela equação (4.1.2), a qual é deduzida no Anexo I, onde também são discriminadas suas variáveis.

$$dv_j = \frac{\rho_l \cdot I_j}{4\pi} \left[\sum \frac{1}{r} \right] \quad (4.1.2)$$

sendo:

$$\sum \frac{1}{r} = \frac{1}{r_{0j}} + \frac{1}{r'_{0j}} + \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right)$$

$$r_{0j} = [(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j - z_0)^2]^{1/2}$$

$$r'_{0j} = [(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + (z_j + z_0)^2]^{1/2}$$

$$r_{nj+} = \left\{ (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh + (z_j - z_0)]^2 \right\}^{1/2}$$

$$r'_{nj+} = \left\{ (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh + (z_j + z_0)]^2 \right\}^{1/2}$$

$$r_{nj-} = \left\{ (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh - (z_j + z_0)]^2 \right\}^{1/2}$$

$$r'_{nj-} = \left\{ (x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 + [2nh - (z_j - z_0)]^2 \right\}^{1/2}$$

4.2 - Potencial Produzido por uma Rede em um Ponto

No item 4.1 é indicado o potencial produzido num ponto M por um único eletrodo infinitesimal. Como uma rede de terra é constituída por uma sucessão infinita de eletrodos infinitesimais, o potencial num ponto M pode ser obtido pela somatória ou integração da equação (4.2.7).

4.2.1 - Considerações

a) Método

É de toda conveniência que seja desenvolvido o método da integração, pois a precisão é aumentada nos resultados e se consegue uma enorme redução de tempo em termos computacionais.

b) Distribuição de Corrente na Rede

Considerando uma rede com comprimento total de

cabos condutores L e uma corrente total I fluindo para a terra, tem-se a densidade de corrente i , em Amperes/metro:

$$i = \frac{L}{I} \quad (4.2.1)$$

Da Equação (4.1.1):

$$I_j = i_j \cdot du$$

$$I_j = \frac{i_j}{i} \cdot i \cdot du$$

Fazendo:

$$\frac{i_j}{i} = \delta_j$$

onde:

δ_j = fator numérico o qual leva em consideração a não uniformidade da distribuição da corrente nos cabos condutores.

Logo:

$$I_j = \delta_j \cdot i \cdot du$$

Portanto:

$$\delta_j = \frac{I_j}{i \cdot du} \quad (4.2.2)$$

Porém:

$$\sum_{j=1}^m \delta_j = \sum_{j=1}^m \frac{I_j}{i \cdot du} = \frac{1}{i \cdot du} \sum_{j=1}^m I_j = \frac{I}{i \cdot du}$$

Mas:

$$\frac{I}{i} = L$$

Logo:

$$\sum_{j=1}^m \delta_j = \frac{L}{du}$$

Sendo:

$$\frac{L}{du} = m = n^{\circ} \text{ de elementos}$$

Tem-se:

$$\sum_{j=1}^m \delta_j = m \quad (4.2.3)$$

Quanto à distribuição das correntes na rede, deve-se levar em consideração a localização da falta fase-terra e a forma da rede. Como este parâmetro não afeta o objetivo do presente estudo, será considerado δ_j igual a m . Observe-se que a Norma IEEE n° 80, de 1976, recomenda que i seja tomado de 1 a 2 vezes o valor de I/L .

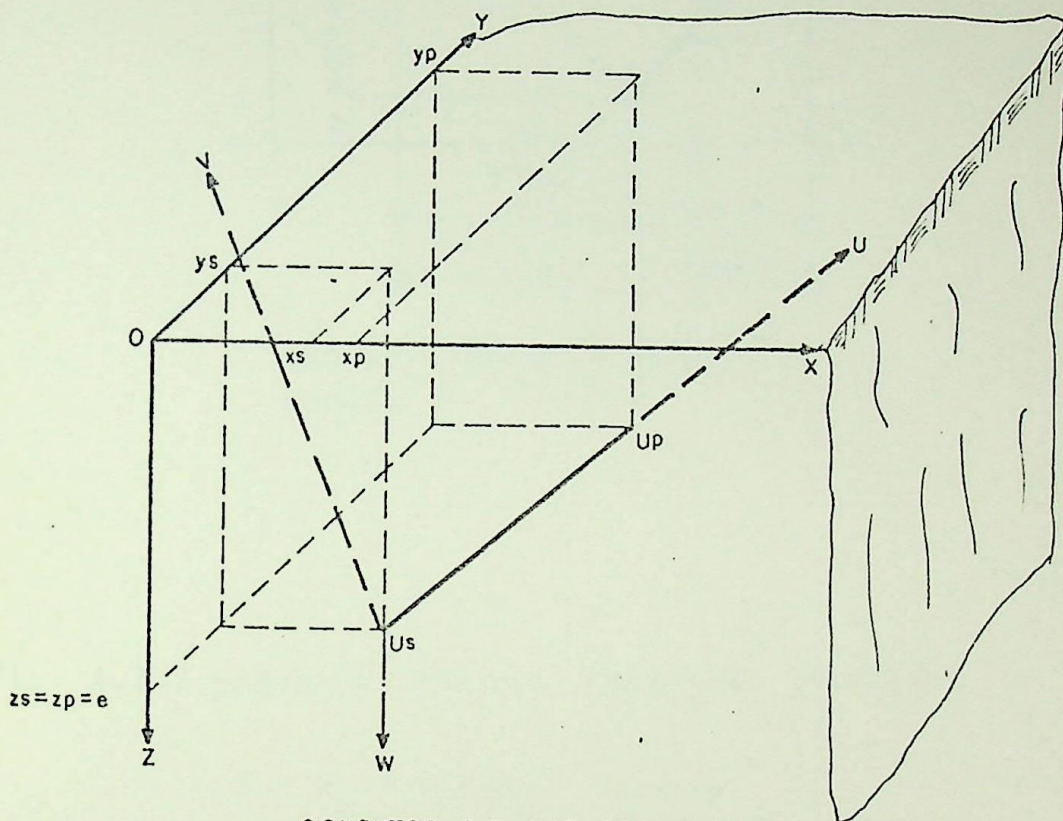
Estudos, em modelos físicos, têm mostrado que não há grandes variações do cálculo, considerando o valor de i igual a relação I/L e o valor obtido das medições do modelo para as diversas localizações do ponto de falta fase-terra.

No presente estudo será considerada a distribuição uniforme de corrente, e igual a relação I/L , isto é, a corrente que será injetada no solo por metro linear de condutor será igual à corrente total de falta fase-terra dividida pelo comprimento total de condutores da rede.

4.2.2 - Potencial Produzido por um Condutor Linear

Seja um condutor linear S-P, enterrado a uma pro

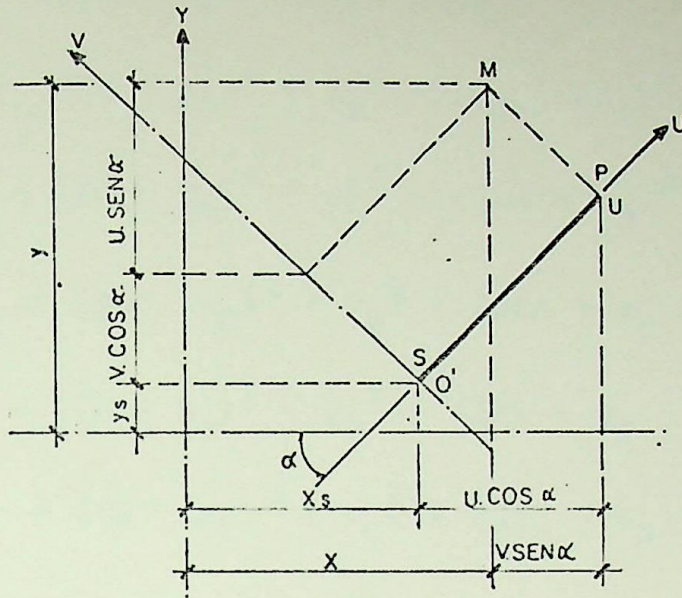
fundidade "e" no primeiro estrato, e localizado no eixo U do sistema de coordenadas UVW, conforme indicado na Fig. 4.2.1.



CONDUTOR S-P NAS COORDENADAS X. Y. Z.

FIG. 4.2.1.

Na Fig. 4.2.2 é indicada a vista em planta do Condutor S-P, a fim de facilitar a interpretação gráfica da transformação de coordenadas do sistema U,V,W para o X,Y,Z.



VISTA EM PLANTA DO CONDUTOR S-P
FIG. 4.2.2.

Da Fig. 4.2.2 podem-se obter as seguintes relações:

$$x = x_s + u \cdot \cos \alpha - v \cdot \sin \alpha \quad (4.2.4)$$

$$y = y_s + u \cdot \sin \alpha + v \cdot \cos \alpha \quad (4.2.5)$$

$$z = z_s + w = e \quad (4.2.6)$$

Substituindo as equações (4.2.4/5/6) na equação 4.1.2, tem-se:

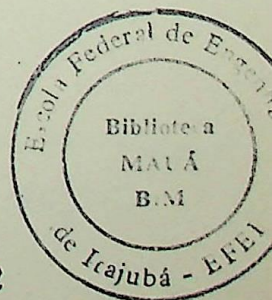
$$(x_j - x_0)^2 = [(u - u_0) \cos \alpha + v_0 \sin \alpha]^2$$

$$(y_j - y_0)^2 = [(u - u_0) \sin \alpha + v_0 \cos \alpha]^2$$

$$(z_j - z_0)^2 = w_0^2$$

$$(z_j + z_0)^2 = (2 \cdot z_s + w_0)^2$$

$$(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2 = (u - u_0)^2 + v_0^2$$



Portanto:

$$r_0 = [(u - u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2]^{1/2}$$

$$r'_0 = [(u - u_0)^2 + v_0^2 + (w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}$$

$$r_{nj+} = [(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2]^{1/2}$$

$$r'_{nj+} = [(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}$$

$$r_{nj-} = [(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0 - 2z_s)^2]^{1/2}$$

$$r'_{nj-} = [(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2]^{1/2}$$

A equação (4.2.1) pode ser escrita sob a seguinte forma:

$$dv = \theta(w_0) + \theta(w_0 + 2z_s) \quad (4.2.7)$$

onde:

$$\begin{aligned} \theta(w_0) = & \frac{\rho_1 \cdot i \cdot du}{4\pi} \left\{ \frac{1}{[(u - u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2]^{1/2}} + \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \frac{1}{[(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2]^{1/2}} + \\ & \left. + \frac{1}{[(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2]^{1/2}} \right\} \end{aligned}$$

$$\theta(w_0 + 2z_s) = \frac{\rho_1 \cdot i \cdot du}{4\pi} \left\{ \frac{1}{[(u - u_0)^2 + v_0^2 + (w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}} + \right.$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\frac{1}{(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0 + 2z_s)^2} \right]^{1/2} +$$

$$+ \frac{1}{(u - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0 - 2z_s)^2} \right]^{1/2} \Bigg]$$

O potencial no ponto M é dado pela integração da equação 4.2.7:

$$V = \int_{u_s}^{u_p} dv = \int_{u_s}^{u_p} \theta(w_0) + \int_{u_s}^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s) \quad , \text{ para } u_s = 0$$

$$\int_0^{u_p} \theta(w_0) = \frac{\rho_1 \cdot i}{4\pi} \left\{ \int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k_1]^{1/2}} + \right.$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k_2]^{1/2}} + \right.$$

$$\left. \left. + \int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k_3]^{1/2}} \right] \right\}$$

$$\int_0^{u_p} \theta(w_0 + 2z_s) = \frac{\rho_1 \cdot i}{4\pi} \left\{ \int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k_4]^{1/2}} + \right.$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k_5]^{1/2}} + \right.$$

$$+ \left. \int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k_6]^{1/2}} \right] \Bigg\}$$

As integrais acima são de forma típica de:

$$\int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k]^{1/2}} = \ell_n \left\{ u_p - u_0 + [(u - u_0)^2 + k]^{1/2} \right\} \Bigg|_0^{u_p}$$

$$\int_0^{u_p} \frac{d_u}{[(u - u_0)^2 + k]^{1/2}} = \ell_n \frac{u_p - u_0 + [(u_p - u_0)^2 + k]^{1/2}}{-u_0 + (u_0^2 + k)^{1/2}}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$\begin{aligned} V = \frac{\rho_1 \cdot i}{4\pi} & \left\{ \ell_n \left[\frac{(u_p - u_0) + [(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + w_0^2]^{1/2}}{-u_0 + [u_0^2 + v_0^2 + w_0^2]^{1/2}} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(u_p - u_0) + [(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}}{-u_0 + [u_0^2 + v_0^2 + (w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}} \right] + \right. \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left[\ell_n \left[\frac{(u_p - u_0) + [(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2]^{1/2}}{-u_0 + [u_0^2 + v_0^2 + (2nh + w_0)^2]^{1/2}} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(u_p - u_0) + [(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh + w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}}{-u_0 + [u_0^2 + v_0^2 + (2nh + w_0 + 2z_s)^2]^{1/2}} \right] \right. \end{aligned}$$

$$\frac{(u_p - u_0) + [(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2]^{1/2}}{-u_0 + [u_0^2 + v_0^2 + (2nh - w_0)^2]^{1/2}}$$

$$\left. \frac{(u_p - u_0) + [(u_p - u_0)^2 + v_0^2 + (2nh - w_0 - 2z_s)^2]^{1/2}}{-u_0 + [u_0^2 + v_0^2 + (2nh - w_0 - 2z_s)^2]^{1/2}} \right\} (4.2.8)$$

O potencial V na expressão (4.2.8) está em função das coordenadas dos eixos U, V, W , o que dificulta a entrada de dados. Para o retorno as coordenadas X, Y, Z , tem-se as expressões abaixo, conforme se deduz facilmente através da Fig.4.2.3.

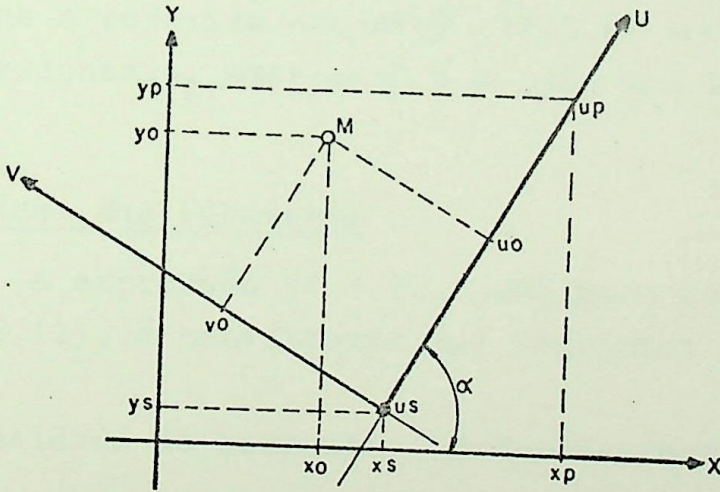


FIG. 4.2.3.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_p \cos \alpha = x_p - x_s + v_p \operatorname{sen} \alpha \\ v_p \cos \alpha = y_p - y_s - u_p \operatorname{sen} \alpha \end{array} \right\}$$

Resolvendo o sistema:

$$u_p = (x_p - x_s)\cos\alpha + (y_p - y_s)\sen\alpha \quad (4.2.9)$$

Analogamente, tem-se:

$$u_0 = (x_0 - x_s)\cos\alpha + (y_0 - y_s)\sen\alpha \quad (4.2.10)$$

$$v_0 = (y_0 - y_s)\cos\alpha - (x_0 - x_s)\sen\alpha \quad (4.2.11)$$

$$w_0 = z_0 - z_s \quad (4.2.12)$$

4.2.3 - Potencial Produzido por uma Rede

O potencial produzido por uma rede, em um determinado ponto, interno ou externo a mesma, é a somatória dos potenciais produzidos por todos os condutores que compõem a rede, conforme a expressão (4.2.8), qualquer que seja a forma da rede. Salienta-se que a referida expressão (4.2.8) foi deduzida para condutores horizontais, pois este é o caso que se apresenta na prática.

4.2.4 - Definição das Variáveis

A expressão (4.2.8), combinada com as equações (4.2.9) a (4.2.12), é constituída das seguintes variáveis:

i = densidade de corrente, em Ampères/metro

y_p = ordenada do extremo do condutor

y_s = ordenada do início do condutor

y_0 = ordenada do ponto onde há o potencial

x_p = abscissa do extremo do condutor

x_s = abscissa do início do condutor

x_0 = abscissa do ponto onde há o potencial

z_s = profundidade do condutor

- z_0 = distância vertical do condutor à superfície do terreno, para o ponto onde há o potencial
- h = profundidade do primeiro estrato
- k = coeficiente de reflexão
- ρ_1 = resistividade do primeiro estrato, em ohmsxmetro
- ρ_2 = resistividade do segundo estrato, em ohmsxmetro
- α = ângulo entre o condutor e o eixo X
- n = quantidade de imagens consideradas

CAPÍTULO 5

PROGRAMA COMPUTACIONAL

5. PROGRAMA COMPUTACIONAL

5.1 - Finalidade

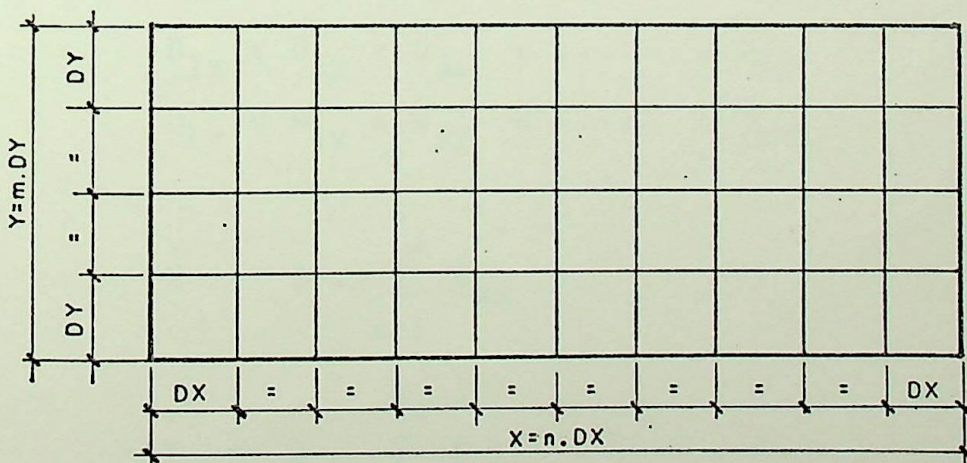
O programa computacional, em linguagem FORTRAN, visará à análise de Sistemas de Aterramento, quanto ao comportamento dos potenciais existentes, na área útil de uma instalação de equipamentos elétricos, durante o período de uma falta de uma ou mais fases à terra, considerando:

- . análise matemática em espaço tridimensional
- . solo constituído de dois estratos
- . influência da topologia da rede de terra no gradiente de potencial
- . influência das diversas imagens elétricas.

5.2 - Classificação de Tipos Geométricos de Rede

5.2.1 - Tipo 1

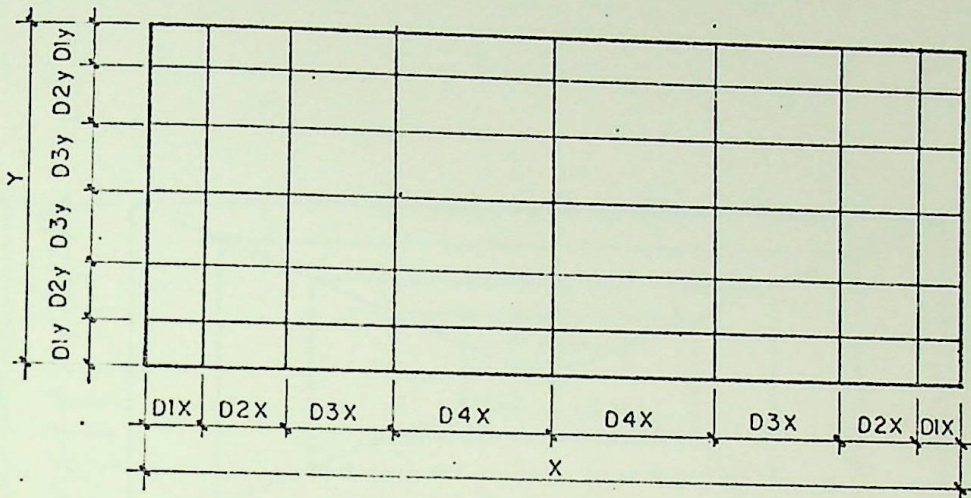
É o tipo tradicional, constituído de malhas de mesma dimensão, de forma quadrada ou retangular, como indica a Fig. 5.2.1.



TIPO-1
FIG. 5.2.1

5.2.2 - Tipo 2

É uma modificação do tipo tradicional, variando-se os espaçamentos entre condutores, aumentando-os na direção do centro da rede, conforme indica a Fig. 5.2.2.



TIPO-2
FIG. 5.2.2.

Na Fig. 5.2.2, tem-se:

$$D_{1x} < D_{2x} < D_{3x} < \dots < D_{nx}$$

$$D_{1y} < D_{2y} < D_{3y} < \dots < D_{ny}$$

$$X = 2 \cdot \sum_{n=1}^{k_1} D_{nx}$$

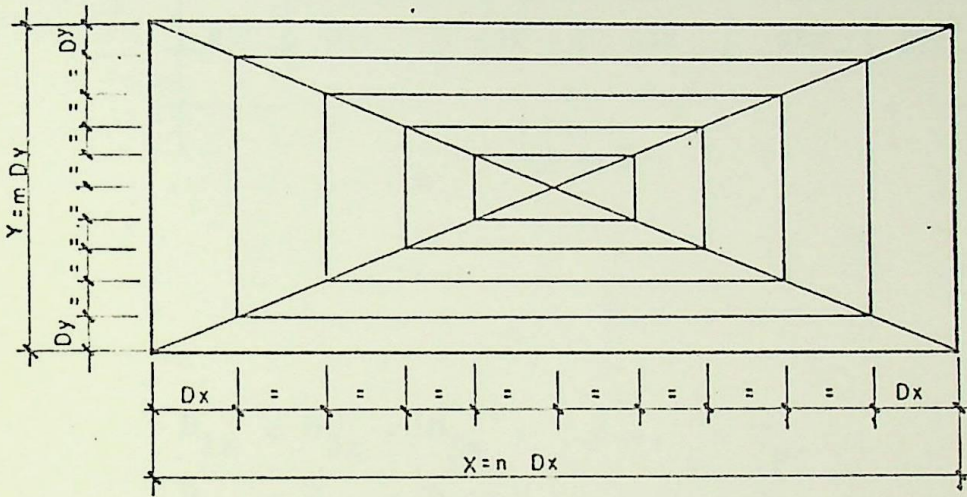
$$Y = 2 \cdot \sum_{n=1}^{k_2} D_{ny}$$

Os espaçamentos D_{nx} e D_{ny} são obtidos conforme a equação (5.3.1), para um valor de ℓ igual, respectivamente, $X/2$

e $Y/2$.

5.2.3 - Tipo 3

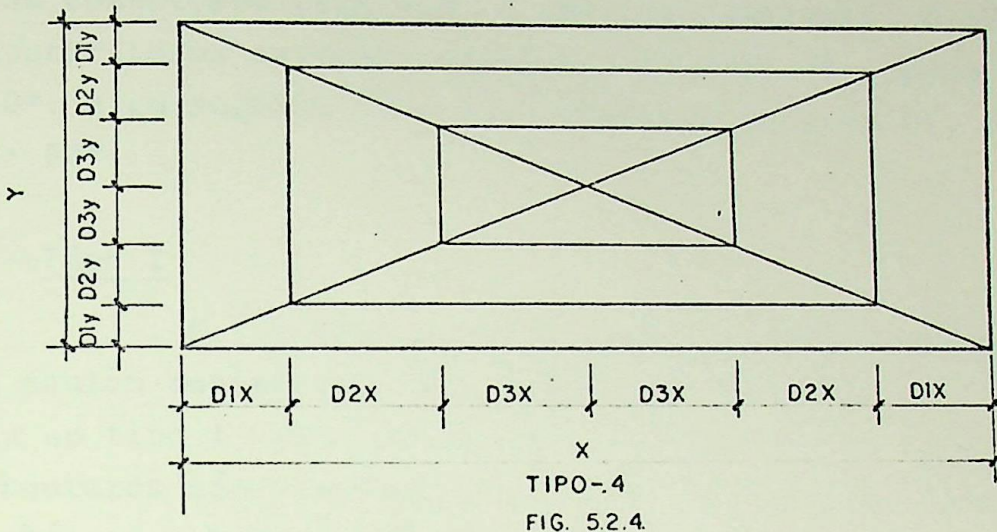
É uma nova configuração de sistema de aterramento, que, em ensaios de modelo, apresentou excelentes resultados. Este tipo, conforme indicado na Fig. 5.2.3, atende perfeitamente às necessidades de conexão de estruturas e equipamentos da subestação à rede de terra.



TIPO-3
FIG. 5.2.3.

5.2.4 - Tipo 4

É uma modificação do tipo 3, variando-se os espaçamentos entre condutores, aumentando-os na direção do centro da rede, conforme indica a Fig. 5.2.4.

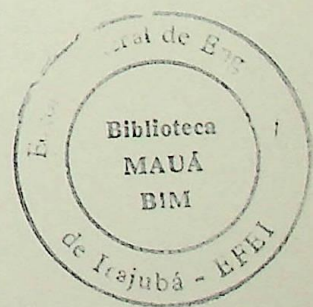


$$D_{1x} < D_{2x} < D_{3x} < \dots < D_{nx}$$

$$D_{1y} < D_{2y} < D_{3y} < \dots < D_{ny}$$

$$X = 2 \cdot \sum_{n=1}^{k_1} D_{nx}$$

$$Y = 2 \cdot \sum_{n=1}^{k_2} D_{ny}$$



Os espaçamentos D_{nx} e D_{ny} são obtidos conforme a equação (5.3.1), para um valor ℓ igual, respectivamente, $X/2$ e $Y/2$.

5.3 - Descrição do Algoritmo

5.3.1 - Tipo 1

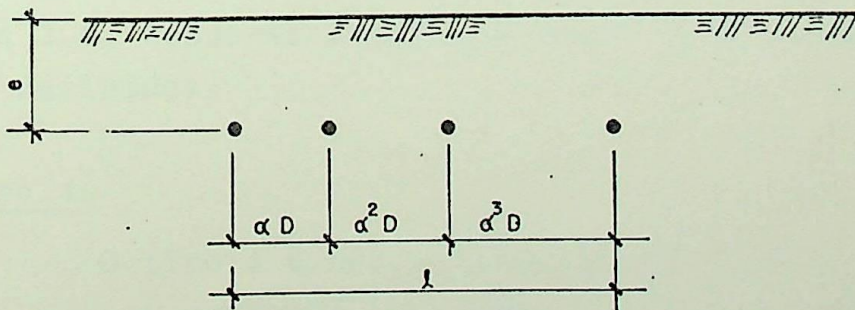
O tipo 1 é o mais simples, pois o espaçamento entre os condutores paralelos é mantido constante. O programa deve computar todos os cabos paralelos ao eixo XX, para um ângulo de 0° , e em seguida os cabos paralelos ao eixo YY, para um ângulo de 90° .

5.3.2 - Tipo 2

Neste tipo os espaçamentos entre condutores também se mantêm constantes. São computados os cabos de maneira análoga ao tipo 1, observando entretanto que os comprimentos dos condutores são variáveis em função da posição. São computados também os cabos com ângulos diferentes de 90° e 0° com o eixo XX.

5.3.3 - Tipo 3

O tipo 3 é semelhante ao tipo 1, porém os espaçamentos entre condutores são variáveis. É adotada a seguinte lei de variação de espaçamentos entre condutores, conforme indicado na Fig. 5.3.1.



ESPAÇAMENTOS VARIÁVEIS

FIG. 5.3.1

Da Fig. 5.3.1, tem-se:

$$D\alpha + D\alpha^2 + D\alpha^3 + \dots + D\alpha^{n-1} = \ell$$

$$D\alpha (1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-2}) = \ell$$

Porém, sendo uma progressão geométrica, tem-se:

$$1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^{n-2} = \frac{1 - \alpha^{n-1}}{1 - \alpha}$$

Logo:

$$\ell = D \cdot \alpha \cdot \frac{1 - \alpha^{n-1}}{1 - \alpha}$$

$$D = \frac{1 - \alpha}{\alpha(1 - \alpha^{n-1})} \cdot \ell$$

$$D = \frac{1 - \alpha}{\alpha - \alpha^n} \cdot \ell \quad (5.3.1)$$

Pela expressão (5.3.1) pode-se determinar a constante D em função do coeficiente α e do comprimento ℓ . O coeficiente α deve variar de maneira que os espaçamentos sejam aumentados a medida que se caminha para o centro, portanto com valores maiores que 1.0. Na prática, α deverá assumir valores entre 1.0 a 2.0, tendo-se para cada valor de α uma série de espaçamentos definidos.

5.3.4 - Tipo 4

O tipo 4 é uma combinação do tipo 2 com o tipo 3, ou seja, a rede possuirá uma forma do tipo 3, porém com espaçamentos variáveis entre condutores. A lei de variação entre estes espaçamentos é a mesma indicada na expressão 5.3.1.

5.4 - Entrada de Dados e Saída do Programa

5.4.1 - Entrada de Dados

Devem ser fornecidos os seguintes dados:

- XR01 - resistividade da primeira camada, ohmsxmetro
- XR02 - resistividade da segunda camada, ohmsxmetro
- H - profundidade da primeira camada, metros
- N - quantidade de imagens elétricas consideradas
- XI - corrente de curto-circuito fase-terra, Amperes
- XLX - comprimento da rede lado X, metros
- XLY - comprimento da rede lado Y, metros
- XOP - abscissa do primeiro ponto "0", onde se deseja o potencial, metros
- YOP - ordenada do primeiro ponto "0", onde se deseja o potencial, metros
- XOF - abscissa do último ponto "0", onde se deseja o potencial, metros
- YOF - ordenada do último ponto "0", onde se deseja o potencial, metros
- DELTP - distância entre os pontos "0", onde se deseja o potencial, metros
- XS - abscissa do início do primeiro cabo, metros
- YS - ordenada do início do primeiro cabo, metros
- XP - abscissa do final do primeiro cabo, metros
- YP - ordenada do final do primeiro cabo, metros
- ZS - profundidade dos cabos no solo, metros
- ALFAG - ângulo entre o condutor e o eixo X, graus
- Tipo 1 - malhas retangulares com espaçamento constante
 - . DELTX - distância entre cabos lado X, metros
 - . DELTY - distância entre cabos lado Y, metros
- Tipo 2 - malhas trapezoidais com espaçamento constante
 - . DELTD - distância entre cabos na diagonal, metros
- Tipo 3 - malhas retangulares com espaçamento variável
 - . ALFAX - coeficiente α de variação lado X
 - . ALFAY - coeficiente α de variação lado Y

- . NX - quantidade de cabos lado X
- . NY - quantidade de cabos lado Y

- Tipo 4 - malhas trapezoidais com espaçamento variável

- . ALFAD - coeficiente α de variação diagonal
- . ND - quantidade de divisões na diagonal

5.4.2 - Saídas

- . XC - comprimento total da rede, metros
- . XLP, YLP - espaçamentos entre condutores, lado X e Y, % do comprimento e largura, respectivamente
- . XOP, XOF - coordenada do primeiro ponto onde se é verificado o potencial
- . TIPO - tipo da rede em estudo
- . PMESH - Potencial max. de malha, isto é, entre sobre o condutor e o centro da malha, volts
- . AP - potencial max. positivo, volts
- . AN - potencial max. negativo, volts
- . PPEX - Diferença de potencial entre o contorno e um ponto a 1.00 m da periferia, volts
- . DCP - diferença de potencial entre o contorno e o centro da rede, volts
- . EPMAX - potencial max. de passo, volts

5.5 - Fluxograma Simplificado

No anexo III é indicado o fluxograma simplificado do Programa TERESPAC, o qual possui três Sub-rotinas denominadas INCRE, CARAC e DELDV.

A sub-rotina INCRE tem como finalidade, nos tipos 3 e 4, fornecer os incrementos dos pontos onde se mede o potencial, de uma maneira tal que, mesmo variando α , haja sempre uma medição também sobre o cabo transversal da rede, para efeito de determinação do potencial de passo.

A sub-rotina CARAC determina todos os potenciais que se deseja conhecer, tais como de malha, máximo positivo,

máximo negativo, de passo interno, de passo externo, e a diferença do contorno ao centro, partindo do cálculo do potencial de ponto por ponto, ao longo de uma reta, determinado pelo programa principal.

A sub-rotina DELDV determina os incrementos, que são os espaçamentos entre cabos, nos tipos 3 e 4, onde estes espaçamentos variam conforme a posição e o valor de alfa.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE NUMÉRICA

6. ANÁLISE NUMÉRICA

6.1 - Dados Comuns a Diversos Tipos

Podem ser analisados os quatro tipos de configuração física de rede, conforme identificação feita no item 5.2, com a aplicação do Programa Computacional, descrito no item 5.

Fundamentalmente, devem ser definidas todas as grandezas que possam ser comuns aos quatro tipos de rede, com o mesmo valor numérico, havendo, por conseguinte, somente variação no que se refere a configuração física dos condutores, o que caracteriza a identificação dos tipos.

Os valores numéricos comuns, cujas variáveis são definidas no item 5.4.1, podem ser os seguintes:

XR01 - 200 ohmsxmetro
XR02 - 800 ohmsxmetro
H - 4,000 m
N - 5 imagens
XI - 1.000 Ampères
XLX - 200,00 m
XLY - 100,00 m
DELTP - 1,00 m
XOP - 100,00 m
YOP - 0,00 m
XOF - 100,00 m
YOF - 101,00 m
ZS - 0,60m

Todos os tipos devem ser analisados com uma variação da quantidade de cabos longitudinais e transversais, sendo o espaçamento entre eles uma porcentagem das dimensões externas, ou seja, se forem considerados dois cabos o espaçamento é de 100% da dimensão externa, se três cabos o espaçamento é de 50%, e assim sucessivamente.

Os valores numéricos dos potenciais são sempre medidos sobre uma reta, paralela ao eixo YY, localizado na meta de do espaçamento entre o ponto central da rede e o próximo condu

tor, passando pelo ponto A, cuja abscissa é determinada para cada caso.

6.2 - Análise Numérica - Tipo 1

O tipo 1 é um caso particular do tipo 2, para o coeficiente α , definido pela expressão 5.3.1, com o valor unitário. Esta Análise deve ser feita como o item 6.4.

6.3 - Análise Numérica - Tipo 3

O tipo 3 é um caso particular do tipo 4, para o coeficiente α , definido pela expressão 5.3.1, com o valor unitário. Esta análise deve ser feita como no item 6.5.

6.4 - Análise Numérica - Tipo 2

Os resultados numéricos são indicados na Tabela 6.4.1. Salienta-se, entretanto, que devido ao tempo computacional ser excessivamente elevado para a obtenção de uma gama muito grande de espaçamentos percentuais, foram levantados em consideração somente os casos de 25% e 12,5%. Corresponde a uma malha de 5x5 e 9x9 cabos respectivamente, com variação de alfa de 1,0; 1,05; 1,10; 1,15; 1,25; 1,30; 1,35; 1,40.

6.5 - Análise Numérica - Tipo 4

Com as mesmas considerações do item 6.4, feitos para o tipo 3, os resultados numéricos deverão ser também obtidos. Porém, como este caso exige um tempo computacional apreciável, não foram levantados os valores numéricos. Entretanto, são dadas, no item 7.3, as diretrizes para se desenvolver uma pesquisa completa, onde se poderão dispor de horas de computação específicas para tal trabalho, o que foge aos objetivos do escopo do presente estudo.

R E D E D E 2 0 0 x 1 0 0 m

ALFA	ESPAÇAMENTO				COMPRIMENTO		POTENCIAL VOLTS				DIF. POTENCIAL VOLTS		ABSCISSA PONTO A
	LADO X		LADO Y		CABOS	REDE	DE MALHA	MAX. POS.	MAX. NEG.	MAX. PASSO	A 1,0m da PERIFERIA	CONTORNO AO CENTRO	
	m	%	m	%									
					m								
1,00	50	25	25	25	1.500,00		299,72	2.291,77	-	35,48	43,68	356,95	75,00
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		215,61	2.381,78	-	31,25	36,26	457,36	87,50
1,05	50	25	25	25	1.500,00		289,82	2.277,99	-	39,09	43,63	342,16	74,39
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		197,46	2.344,86	-	30,20	36,11	425,96	86,57
1,10	50	25	25	25	1.500,00		280,58	2.265,13	-	34,39	43,58	336,01	-
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		712,63	2.253,01	-	678,93	81,66	239,92	85,66
1,15	50	25	25	25	1.500,00		271,94	2.253,10	-	38,91	43,54	326,44	73,26
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		695,56	2.228,10	-	669,36	79,79	217,65	84,77
1,20	50	25	25	25	1.500,00		263,84	2.241,82	-	34,94	43,51	317,40	72,73
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		660,55	2.205,22	-	659,57	76,92	196,55	83,90
1,25	50	25	25	25	1.500,00		632,31	2.203,40	-	614,11	94,88	225,52	72,22
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		652,44	2.183,91	-	651,79	75,32	176,52	83,06
1,30	50	25	25	25	1.500,00		249,10	2.221,45	-	34,40	43,48	300,72	71,74
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		644,95	2.164,12	-	644,59	73,70	157,49	82,25
1,35	50	25	25	25	1.500,00		625,98	2.187,80	-	607,91	93,63	212,88	71,28
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		638,04	2.146,15	-	637,99	72,05	139,80	81,45
1,40	50	25	25	25	1.500,00		623,09	2.180,62	-	605,09	93,04	206,95	70,83
	25	12,5	12,5	12,5	2.700,00		631,00	2.131,76	-	631,93	70,36	125,24	80,69

Tipo 3

TABELA 6.4.1

6.6 - Observações Gerais

6.6.1 - Comparação entre os Tipos 1 e 2

A comparação entre os tipos 1 e 2 é feita referenciada em % ao valor básico do tipo 1, para espaçamento de 50% da dimensão externa.

A variação de comprimento total de cabos é indicada na Fig. 6.6.1.1, onde se observa que a medida que se aproximam os cabos, isto é, se diminui o espaçamento dos cabos da rede, no tipo 2, há uma diminuição do comprimento total para o correspondente espaçamento do tipo 1.

6.6.2 - Variação do Espaçamento

O tipo 3 é analisado para as diversas variações de alfa, que corresponde a um espaçamento variável entre condutores, conforme indicado nas Figuras 6.6.2.1 e 6.6.2.2, respectivamente, para rede de 5x5 cabos e 9x9 cabos, que correspondem a espaçamentos de 25% e 12,5% da dimensão externa. Observa-se que há uma instabilidade numérica, para ambos os casos que se acentua no potencial de passo. Tal variação, até certo ponto considerada como brusca, se deve a variação do gradiente do potencial em função de alfa, que faz com que a inclinação da curva do potencial entre dois pontos, afastados de 1,00 m, se altere desta maneira. É interessante que se faça um estudo em modelo analógico, isto é, em cuba eletrolítica, do comportamento do potencial em função dos espaçamentos variáveis, para confirmação de resultados do processo numérico.



CURVA 1 - TIPO 1.
CURVA 2 - TIPO 2.

TODOS OS VALORES SÃO REFERENCIADOS
EM % AO VALOR BÁSICO DO TIPO 1,
PARA ESPAÇAMENTO DE 50% DA
DIMENSÃO EXTERNA.

%
COMP.

600

400

200

100

0

0

10

20

30

40

50

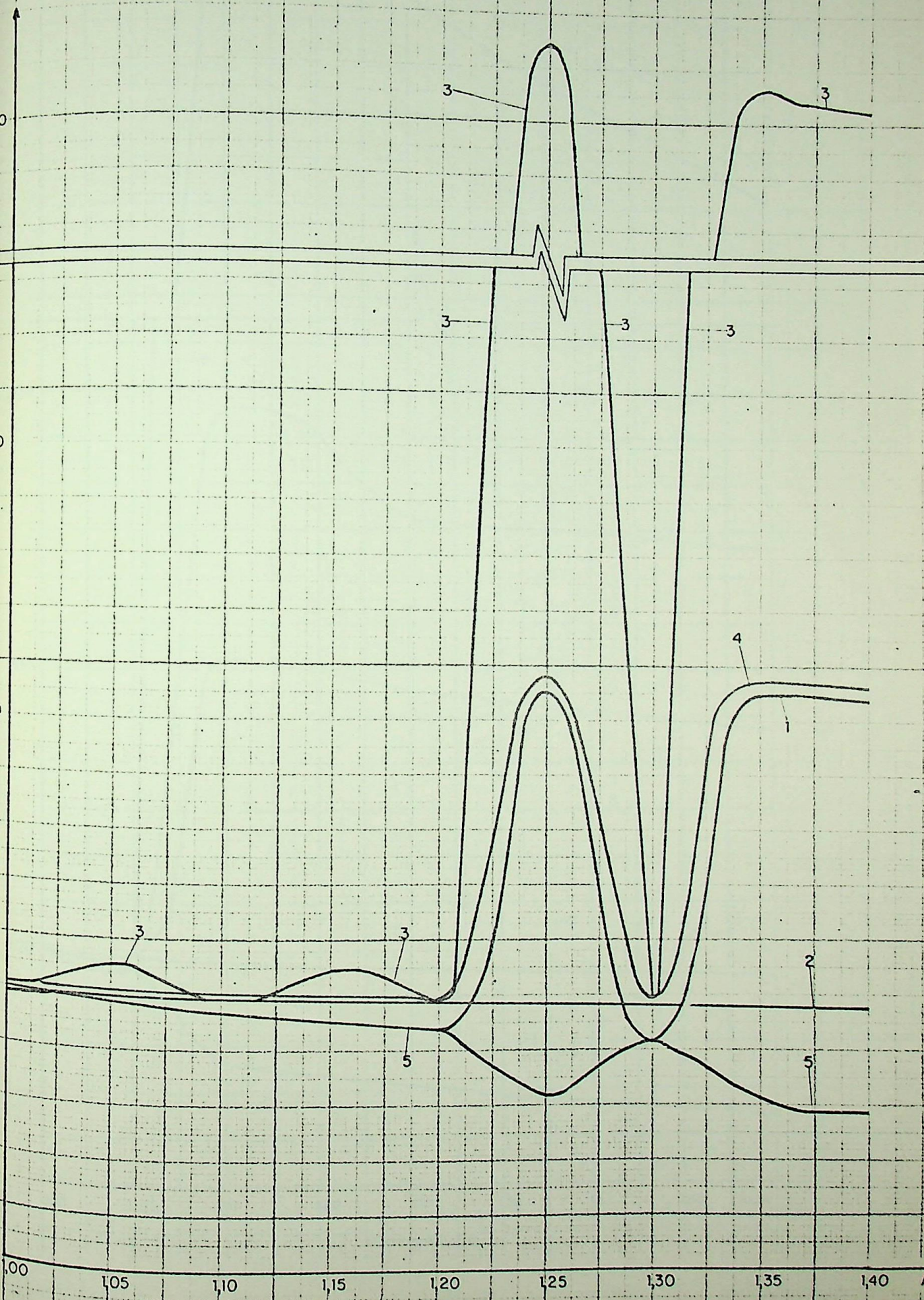
% DIMENSÃO

FIGURA-6.6.11

TODOS OS VALORES SÃO REFERENCIADOS EM % AO VALOR BASICO CORRESPONDENTE A ALFA UNITARIO.

REDE DE 100x200, COM 5x5 CABOS.

ENCIAL %



4-DIF. POT. A 1,00m DA PERFERIA.

5-DIF. POT. DO CONTORNO AO CENTRO.

TODOS OS VALORES SÃO REFERENCIADOS
EM % AO VALOR BÁSICO CORRESPONDENTE
A ALFA UNITÁRIO

REDE DE 100x200m, COM 9x9 CABOS.

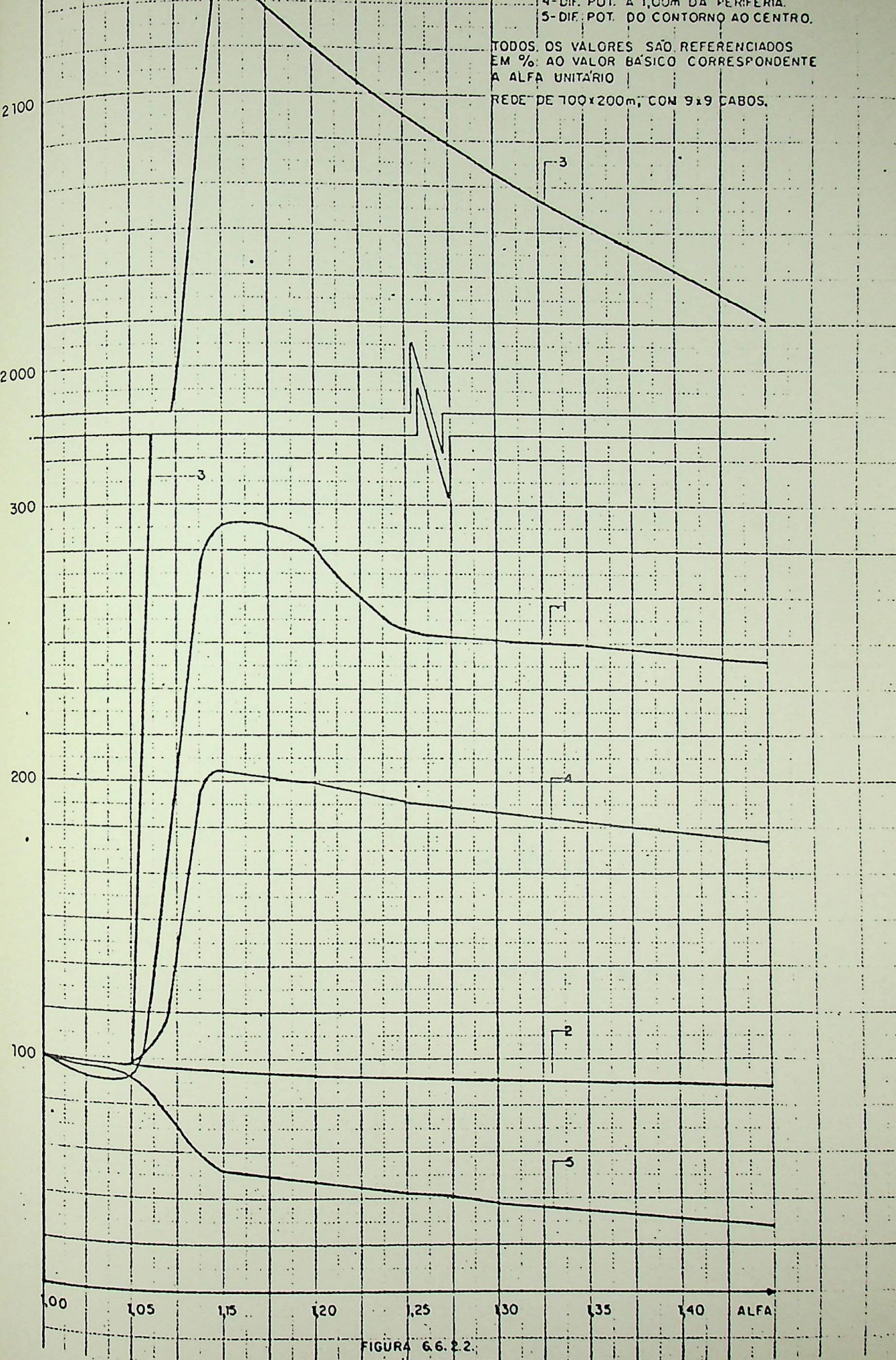


FIGURA 6.6.2.2.

CAPÍTULO 7

C O N C L U S ã O

7. CONCLUSÕES

7.1 - Geral

O presente estudo demonstrou que se pode analisar um sistema de rede de terra, levando em consideração os seguintes parâmetros normalmente não utilizados no estudo clássico atualmente empregado em nível de engenharia de projetos:

- . solo com duas estratificações
- . influência de todos os condutores existentes
- . espaçamentos variáveis entre condutores
- . diferentes conformações geométricas da rede

7.2 - Aplicabilidade

Os resultados computacionais obtidos na presente análise permitem-nos tirar conclusões básicas sobre o comportamento matemático dos potenciais gerados por um sistema de aterramento no solo que o circunda.

Para que as conclusões obtidas sejam extendidas a um nível compatível de um programa computacional, comercialmente aplicável e com margem de confiabilidade, esta análise deverá ser complementada por uma pesquisa exaustiva. Tal pesquisa requer, entretanto, dezenas de horas-máquina do TR-86 empregado neste estudo, o que não se justifica pela natureza acadêmica deste trabalho. Na hipótese de se desejar o desenvolvimento do referido programa, são dadas a seguir as diretivas para o desenvolvimento de uma pesquisa exaustiva.

7.3 - Diretivas para Pesquisa

7.3.1 - Levantamento de Curvas

Deveriam ser traçadas, para cada um dos tipos de rede apresentados, as seguintes famílias de curvas: Diversos potenciais (de malhas máximo positivo, máximo de passo interno, máximo de passo externo, e diferença do contorno ao centro) em função do espaçamento percentual das dimensões externas, para cada valor de alfa.

Aconselha-se que se determine , inicialmente, o potencial com espaçamento percentual iguais para os dois lados, ou seja, na largura e no comprimento, o que corresponde a uma relação de espaçamentos percentuais unitários. Como segunda etapa, devem ser escolhidas outras relações e determinadas as mesmas curvas.

É conveniente que o estudo seja feito totalmente em termos de valores percentuais, tomando os potenciais de 100% para o valor de 100% de espaçamento.

A N E X O S



POTENCIAL NUM PONTO

Consideremos um solo com duas estratificações paralelas, conforme indicado na Fig. 4.1.2, com a primeira camada de profundidade h e a segunda com profundidade infinita, ρ_1 e ρ_2 , respectivamente, as resistividades da primeira e segunda camada.

Fazendo-se uma analogia à ótica, o coeficiente de reflexão solo/ar será $(\infty - \rho_1)/(\infty + \rho_2)$ onde é assumido que a resistividade do ar sobre o solo é infinito.

O coeficiente de reflexão k entre as duas estratificações será:

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (I.1)$$

A imagem elétrica do eletrodo com corrente $2.I_j$, será de intensidade $2k.I_j$ há uma distância $2h$ sobre e abaixo da interseção solo/ar. Estas imagens primárias produzirão imagens secundárias de intensidade $2.k^2.I_j$ há uma distância $4h$ sobre e abaixo da superfície de intersecção, e assim sucessivamente.

Estas fontes adicionais contribuirão para o potencial no ponto "M", situado há uma distância " r_{0j} " da fonte.

Tendo em vista que o potencial a uma distância r_{0j} a fonte I_j , em um meio homogêneo de resistividade ρ_1 é $\rho_1 I / 4\pi r_{0j}$, tem-se:

$$dV_j = \frac{\rho_1 \cdot I_j}{4\pi} \left[\sum \frac{1}{r} \right] \quad (I.2)$$

onde:

$$\sum \frac{1}{r} = \frac{1}{r_{0j}} + \frac{1}{r'_{0j}} + \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj+}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj-}} \right) \quad (I.3)$$

sendo:

- ρ_1 = resistividade do primeiro estrato
- I_j = corrente injetada no solo pelo eletrodo infinitesimal d_u
- r_{nj}, r'_{nj} = distâncias do ponto M as imagens, conforme figura 4.1.2
- K = coeficiente de reflexão, conforme equação (I.1)
- n = quantidade de imagens a serem consideradas, valor que deve ser analisado para cada caso, pois quando n tende para infinito a somatória, em I.3, permanece constante.

ANEXO II

II.1 Resistividade média de diversos tipos de solo

VALORES USUAIS	
TIPO DE SOLO	ρ (Ω .m)
limo	20 a 100
humus	10 a 150
lama	5 a 100
terra de jardim com 50% de umidade	140
terra de jardim com 20% de umidade	480
argila com 40% de umidade	80
argila com 20% de umidade	330
argila seca	1.500 a 5.000
areia com 90% de umidade	1.300
areia comum	3.000 a 8.000
calcáreo fissurado	500 a 1.000
calcáreo compacto	1.000 a 5.000
granito	1.500 a 10.000
basalto	10.000 a 20.000

II.2 Resistividade de solo arenoso em diversas condições

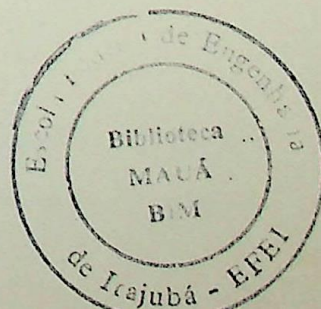
ADIÇÃO DE SAL		
Sal adicionado (% por peso de umidade)	resistividade (Ωxm) (solo arenoso) umidade 15% e 17°C	redução com rela ção à primeira medida (0%)
0,0	107,0	-
0,1	18,0	5,9
1,0	4,6	23,3
5,0	1,9	56,3
10,0	1,3	82,3
20,0	1,0	107,0

VARIAÇÃO DE UMIDADE		
Índice de umida de (% por peso)	Resistividade (Ωxm) solo arenoso (17°C)	Redução com rela ção à primeira medida (0%)
0,0	10.000	-
2,5	1.500	6.666
5,0	430	23.255
10,0	185	54.054
15,0	105	95.238
20,0	63	158.730
30,0	42	238.095

VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Temperatura (°C)	Resistividade ($\Omega \times m$) Solo arenoso	redução com rela- ção à 1. ^a medida (-15°C)
- 15	3.300	-
- 5	790	4,2
- 0	300	11,0
+ 0 (gelo)	138	23,9
10	33	33,3
20	72	45,8

B I B L I O G R A F I A



BIBLIOGRAFIA

1. LIVROS

- 1.1 - Earth Conduction Effects on Transmission Systems -
Erling D. Sunde
- 1.2 - Transient Performance of Electric Power Systems -
R. Rundenberg
- 1.3 - Electrical Transient in Power Systems -
Allan Greenwood
- 1.4 - Earth Resistance -
G.F. Tagg
- 1.5 - Corrosão -
V. Gentil
- 1.6 - Field Computation by Moment Methods -
Roger F. Harrington
- 1.7 - Industrial Power Systems Handbook -
D.L. Beeman

2. NORMAS TÉCNICAS

- 2.1 - IEEE Guide Safety in Substation Grounding -
IEEE Std. 80 - 1976
- 2.2 - IEEE Recommended Practice for Grounding of
Industrial and Commercial Power Systems - IEEE
Std. 142 - 1972 (The IEEE Green Book)
- 2.3 - National Electrical Safety Code -
ANSI-C2 - 1973

3. ARTIGOS

- 3.1 - Calculation of Resistances to Ground
H.B. Dwight - AIEE Trans. Dec. 1936
- 3.2 - Grounding Effectiveness at G. Coulee 230 KV
Conger, Seely and Clagett - Trans. AIEE - 1951
- 3.3 - Grounding Grids for High Voltage
Chitnis, Stratton and E.T. Gross - AIEEE Trans. 1953
- 3.4 - Grounding Electrode Characteristics from Model Tests

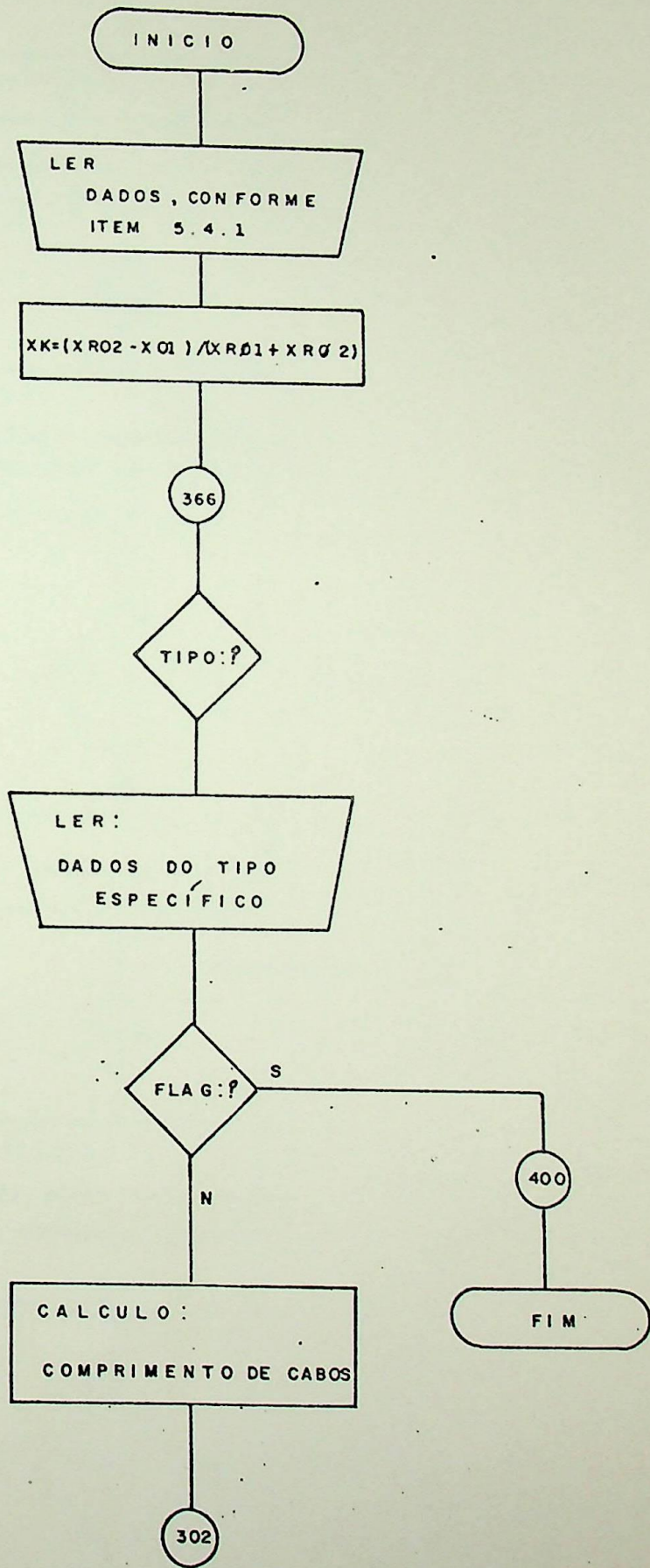
- H.R. Armstrong - AIEE Trans. - 1953
- 3.5 - Application Guide on Methods of Substation Grounding
AIEE Committee Report - AIEE Trans. 1954
- 3.6 - Analytical Expressions for the Resistance of
Grounding Systems - S.J. Schwarz - AIEE Trans. 1954
- 3.7 - Let's Look to Station Grounding
S.J. Schwarz - Electrical World - 1955
- 3.8 - All-Steel Network Grounds Substation
S.J. Litrides - Electrical World - 1955
- 3.9 - Grounding Grids for High Voltage Station II -
Resistance of Large Rectangular Plates
E.T.B. Gross and R. Wise - AIEE Trans. 1955
- 3.10- Efficiency of Grounding Grids with Nonuniform Soil
J. Zaborszky - AIEE Trans. 1955
- 3.11- Grounding Grids for HV Station III - Resistance of
Rectangular Grids - E.T.B. Gross - AIEE Trans. 1956
- 3.12- Voltage Gradients Through the Ground Under Faults
Condition - AIEE Committee Report - AIEE Trans. 1958
- 3.13- Examples of Geoelectric Surveys
L.S. Palmer - Proceedings IEE 1958
- 3.14- Grounding Electrode Potential Gradients from Model
Tests - H.R. Armstrong and L. Simpkin - AIEE Trans. 60
- 3.15- Earth Resistivity Measurements for Grounding Grids
A.L. Kinyon - AIEE Trans. 1961
- 3.16- Grounding Grids for HV Station IV - Resistance of
Grounding Grids in Nonuniform Soil
B. Thapar and E.T.B. Gross - IEEE Trans. PAS 1963
- 3.17- Grounding Current in HV Transmission I - Preliminary
Report on Columbia Basin Tests
Cantweel, Webb, Kinyon - IEEE Trans. PAS 1966
- 3.18- Electrode for EHV DC Transmission in a Metropolitan
Area - Pann, Galindo and G. Elder - IEEE PAS Trans.
1966
- 3.19- Matrix Methods for Fields Problems
R.F. Harrington - IEEE Proceedings Vol. 55 - 1967
- 3.20- Mesh Potential in High Voltage Grounding Grids
B. Thapar and K. Puri - IEEE PAS Trans. 1967

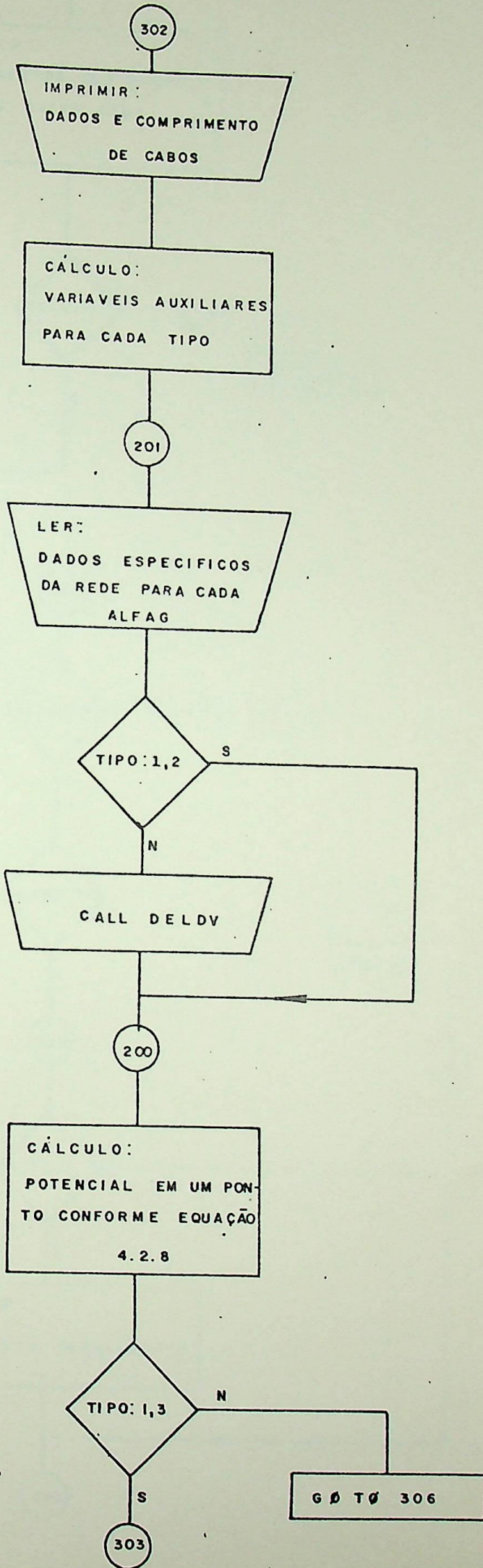
- 3.21- Measurement of the Resistance of Earth Electrode System Covering a Large Area
G.F. Tagg - PROC. IEE Vol 116 - 1969
- 3.22- Optimum Diameter, Spacing, and Burial Depth of Ground-Grid Conductor
R.F. Stevens - IEEE PAS - Trans. 1961
- 3.23- On the Potential and Field Distribution Around a Ground Electrode for HVDC Transmission
T. Giao and M.P. Sarma - IEEE PAS. Trans. 1972
- 3.24- Effect of a Two-Layer Earth on the Electric Field Near HVDC Ground Electrodes
T.Giao and M.P. Sarma - IEEE PAS Trans. 1972
- 3.25- Modelling of a Grounding Electrode
D. Mukhedkar, Y. Gervais, DeJean - IEEE PAS Trans. 1973
- 3.26- Modelling of Potencial Dist. Around a Grounding Electrode - D. Mukhedkar, Y. Gervais and F. Dawalibi - IEEE PAS Trans. 1973
- 3.27- Analytical Models for Distributed Grounding Systems
S. Devgan and E. Whitehead - IEEE PAS Trans. 1973
- 3.28- Ground Electrode Resistance Measurements in Non Uniform Soil
F.Dawalibi and D. Mukhedkar - IEEE PAS Trans. 1973
- 3.29- Identification of Electrical Parameters in Large Earth Grids - R. Huey and K. Rajaratnam - IEEE PAS Trans. 1974
- 3.30- Análise de Configurações de Aterramento - A.E.Hermeto Tese de Livre Docência - Escola Federal de Engenharia de Itajubá - 1974.
- 3.31- Optimum Design of Substation in Two Layer Earth Structure - Part I - Analytical Study
F. Dawalibi and D. Mukhedkar - IEEE PAS Trans. 1975
- 3.32- Idem - Part II - Comparison Between Theoretical and Experimental Results - Idem
- 3.33- Idem - Part III - Study of Grounding Grids Performance and New Electrodes Configuration - Idem

- 3.34- Grounding of Gas Insulated Substation
T. Dodds and H. Spindle - IEEE PAS Trans. 1975
- 3.35- The Measurement of Substation Ground Resistance and
its Use in Determining Protection for Metallic
Communication Circuits - Larsen, Nordell - IEEE
PAS Trans. 1975
- 3.36- Multi Step Analysis of Interconnected Grounding Elec
trodes - F. Dawalibi, D. Mukhedkar - IEEE PAS Trans.
1976
- 3.37- Optimized Grounding Grid Design Using Variable
Spacing Technique - J. Sverák - IEEE PAS Trans. 1976
- 3.38- Resistance Calculation of Interconnected Grounding
Electrodes - F. Dawalibi, D. Mukhedkar IEEE PAS
Trans. 1977
- 3.39- Critérios de Medições, Aterramento e Segurança em Su
bestações - C.H. Markovits, J.A. Leon - IV Seminário
Nacional de Produções e Transmissões de Energia Elé
trica - Rio de Janeiro - 1977
- 3.40- Transferred Earth Potentials in Power Systems - F.
Dawalibi - D. Mukhedkar - IEEE PAS Trans. 1978.

ANEXO III

PROGRAMA TERESPAC
FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO





303

CÁLCULO :
INCREMENTOS DOS ESPAÇAM-
ENTOS ENTRE CABO.

TÉRMINO:?

N

G Ø T Ø '200

S

306

ALFAG:90°

S

N

307

TIPO:2

S

CÁLCULO :
INCREMENTO ESPAÇA -
MENTO

397

N

ALFAG:0°

309

TIPO:2

N

CÁLCULO
INCREMENTO ESPAÇAMENTO

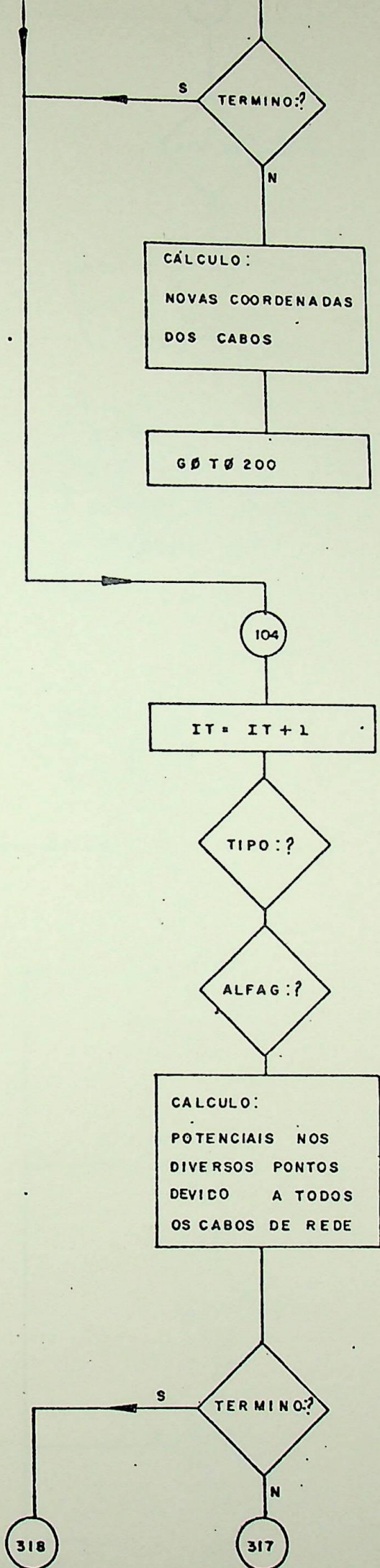
362

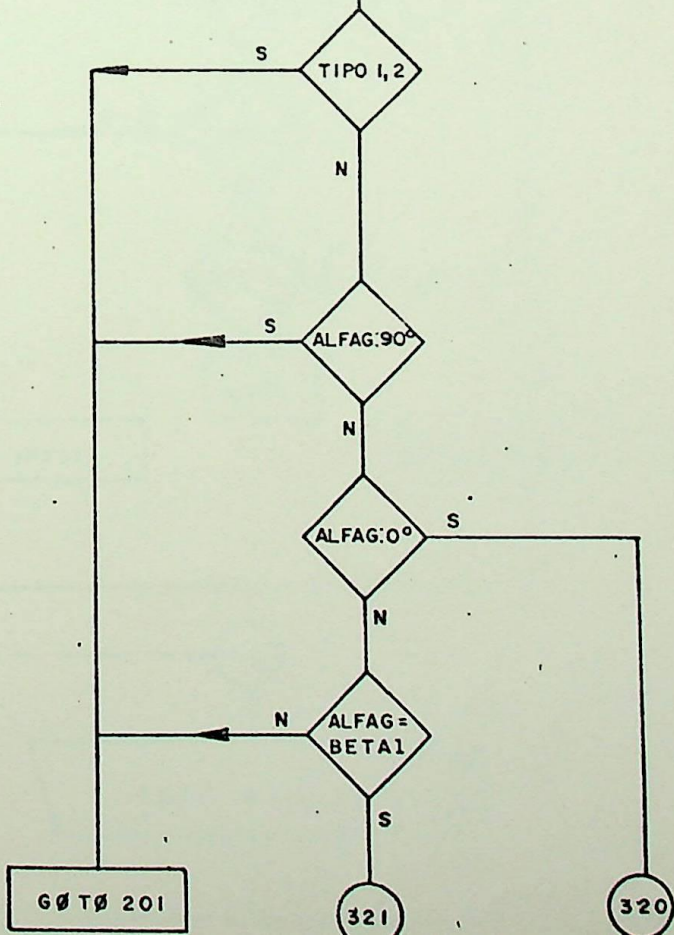
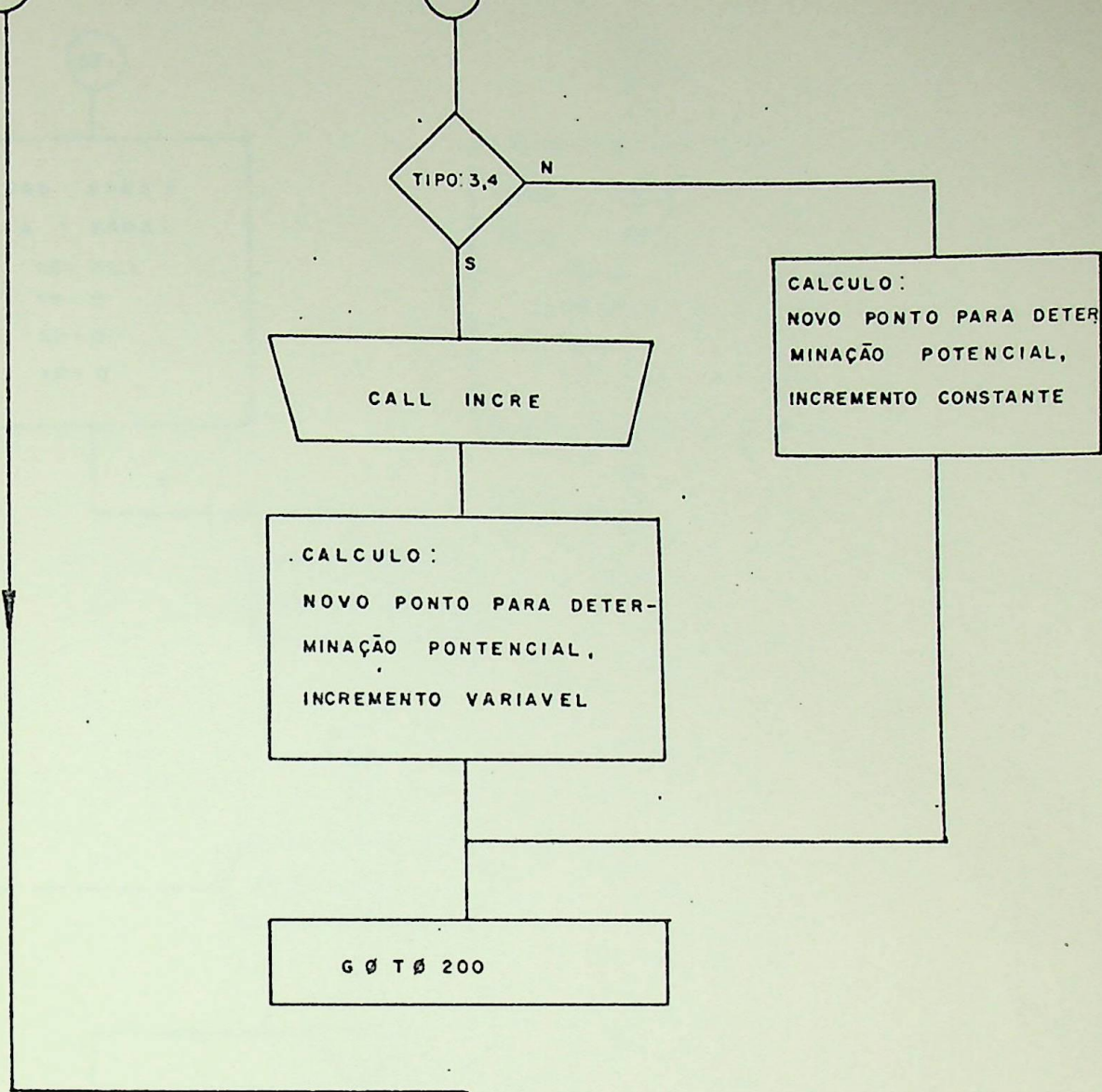
S

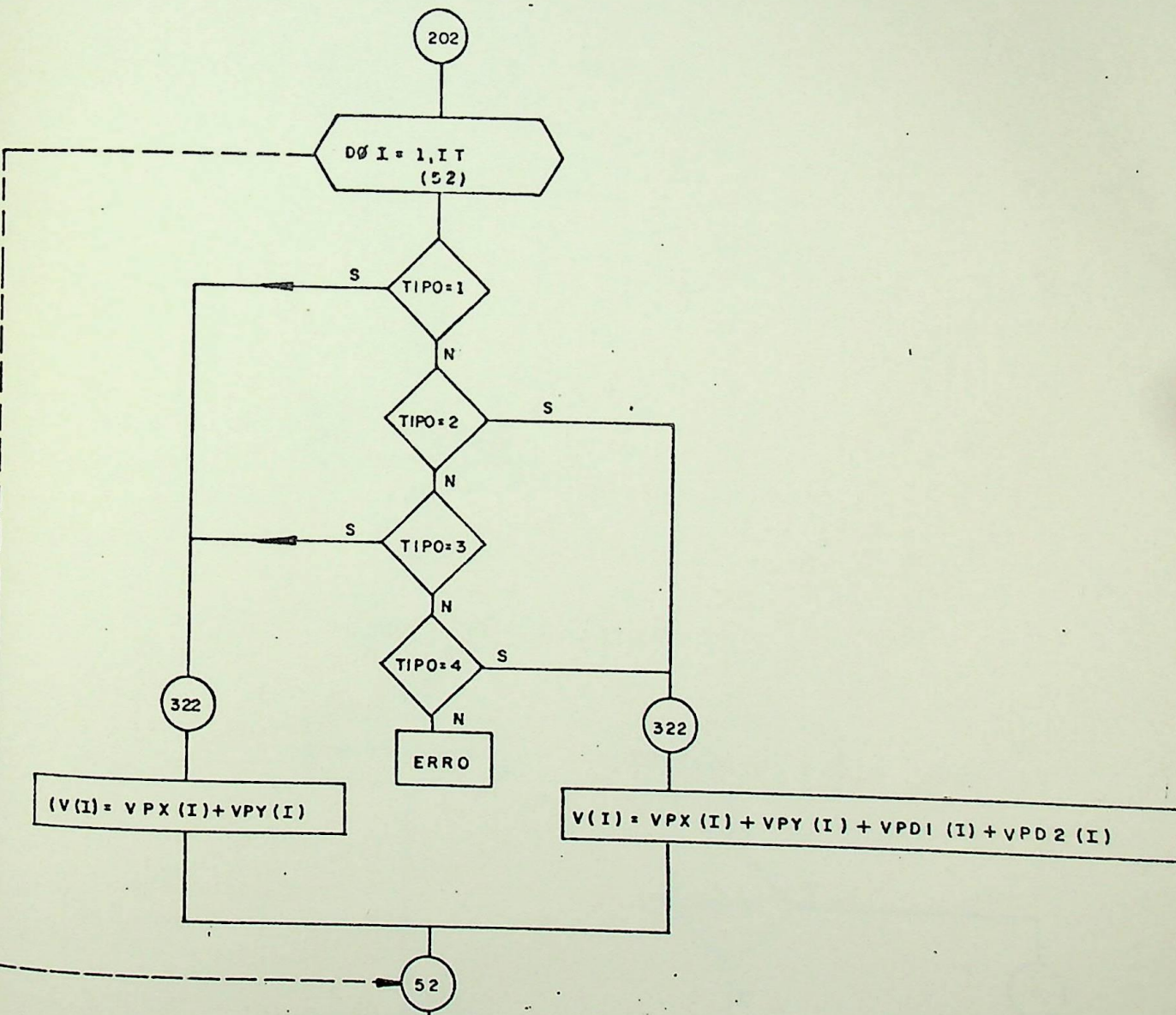
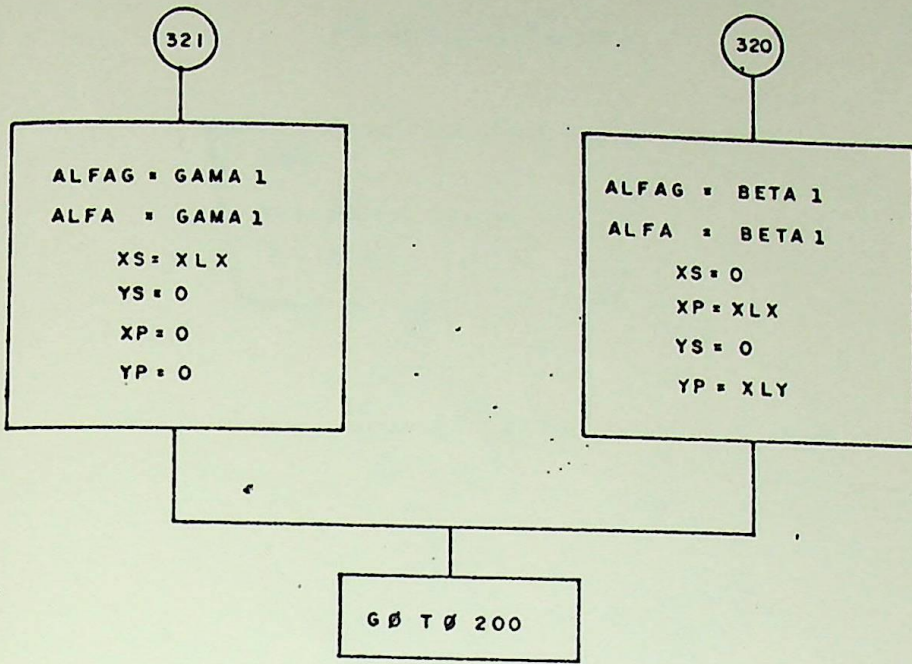
TERMINO
:?

N

ERRO





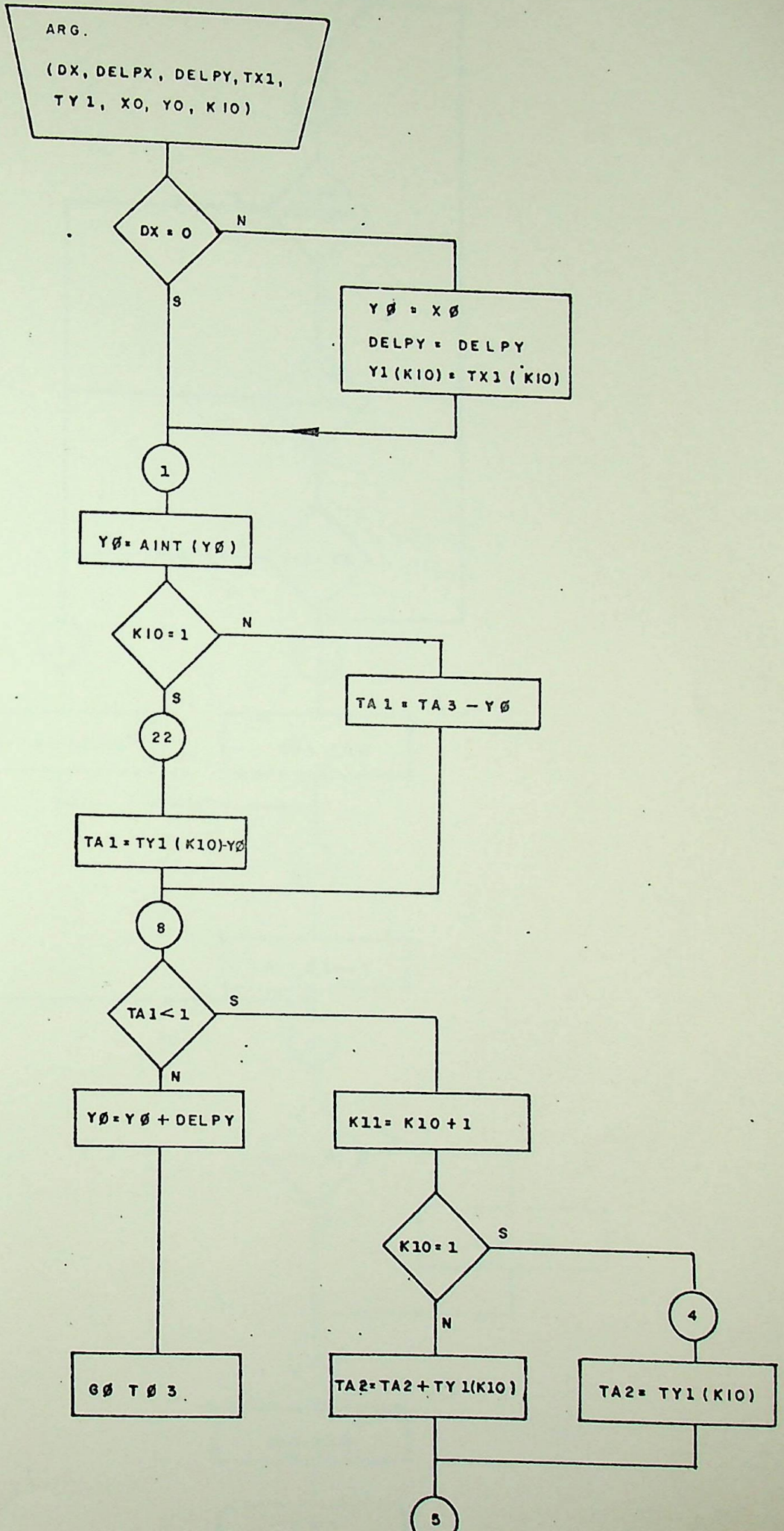


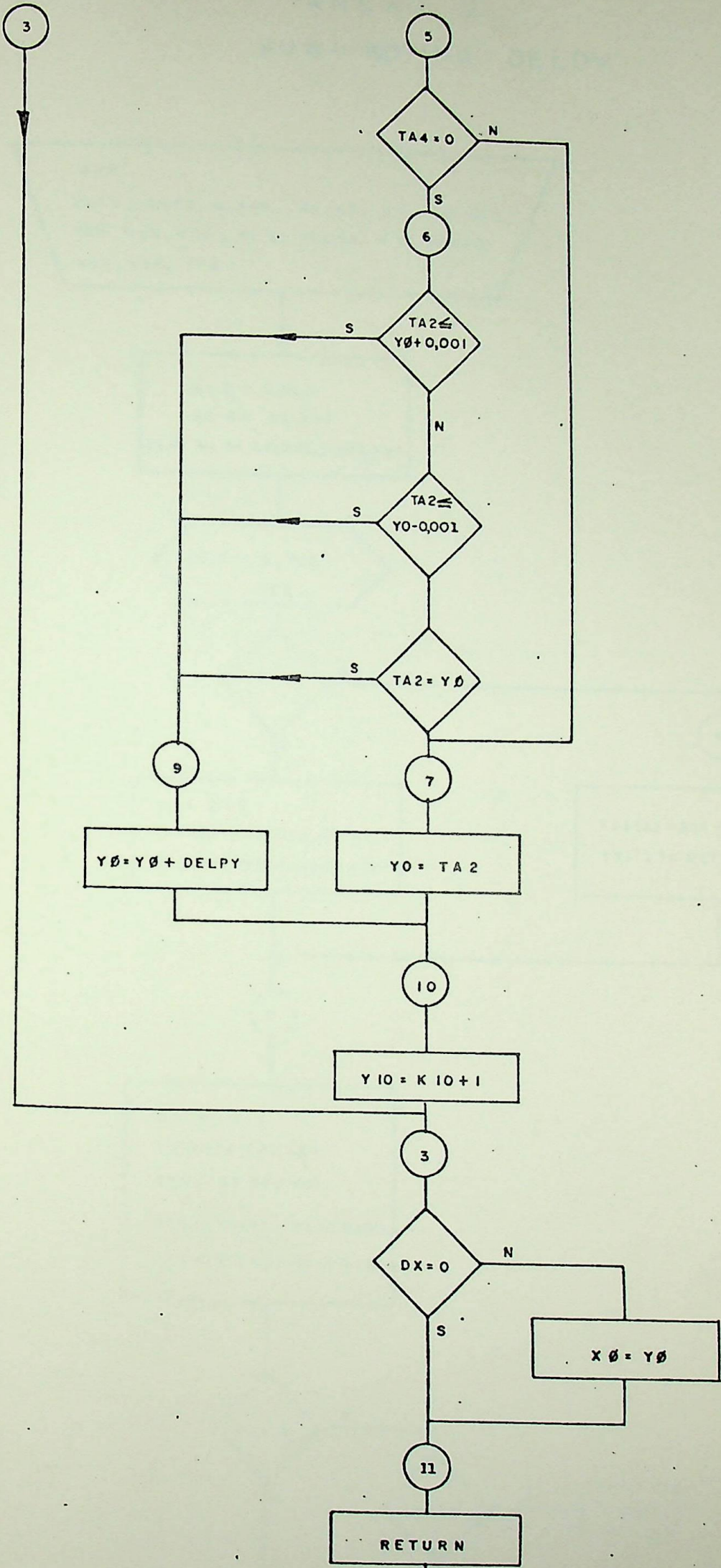
CALL CARAC

GØ TØ 200



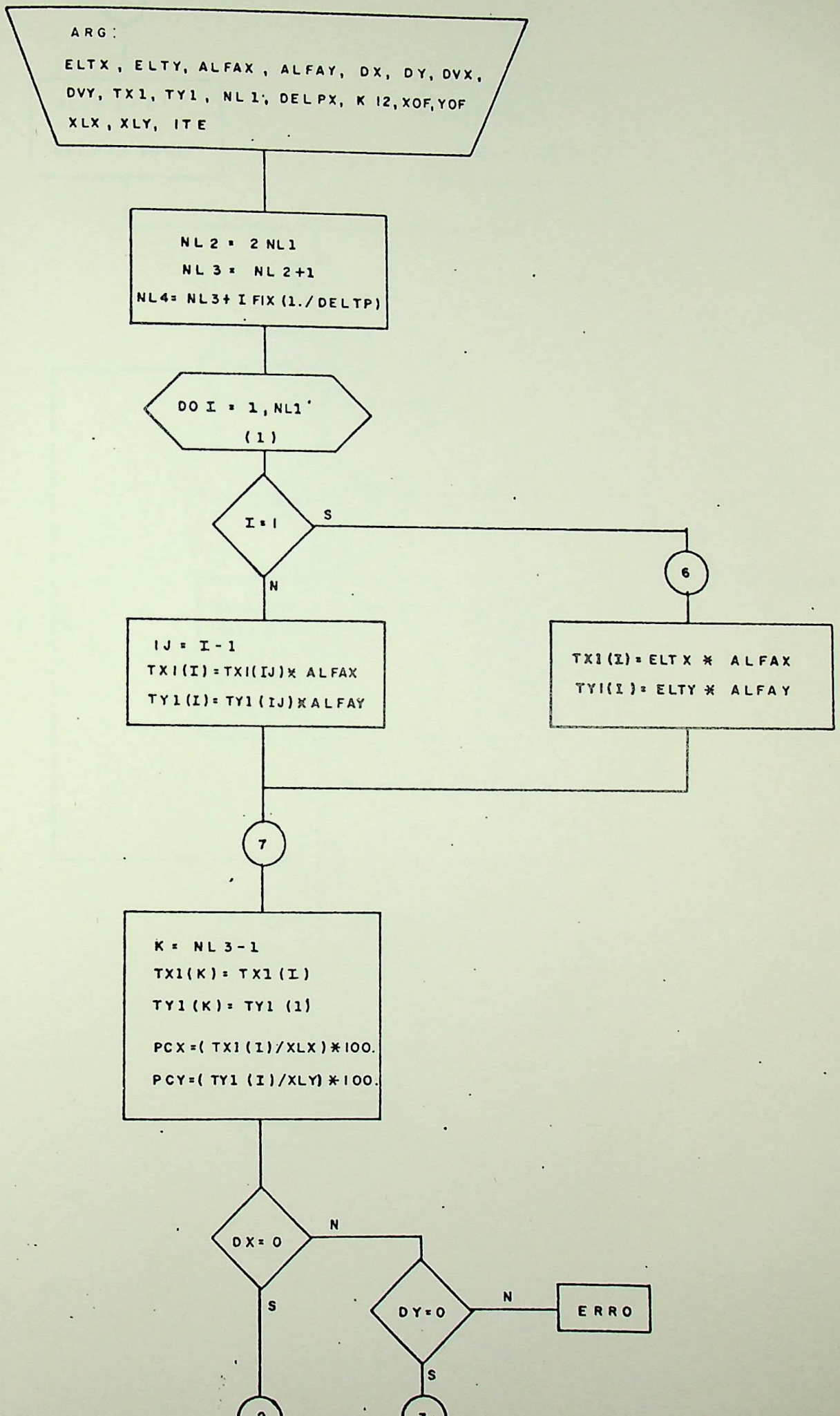
ANEXO IV
 SUB - ROTINA INCRE
 FLUXOGRAMA

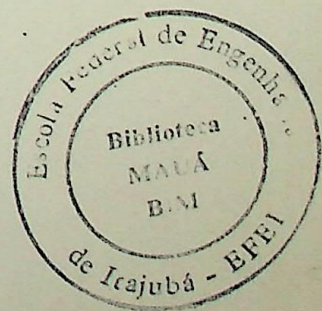
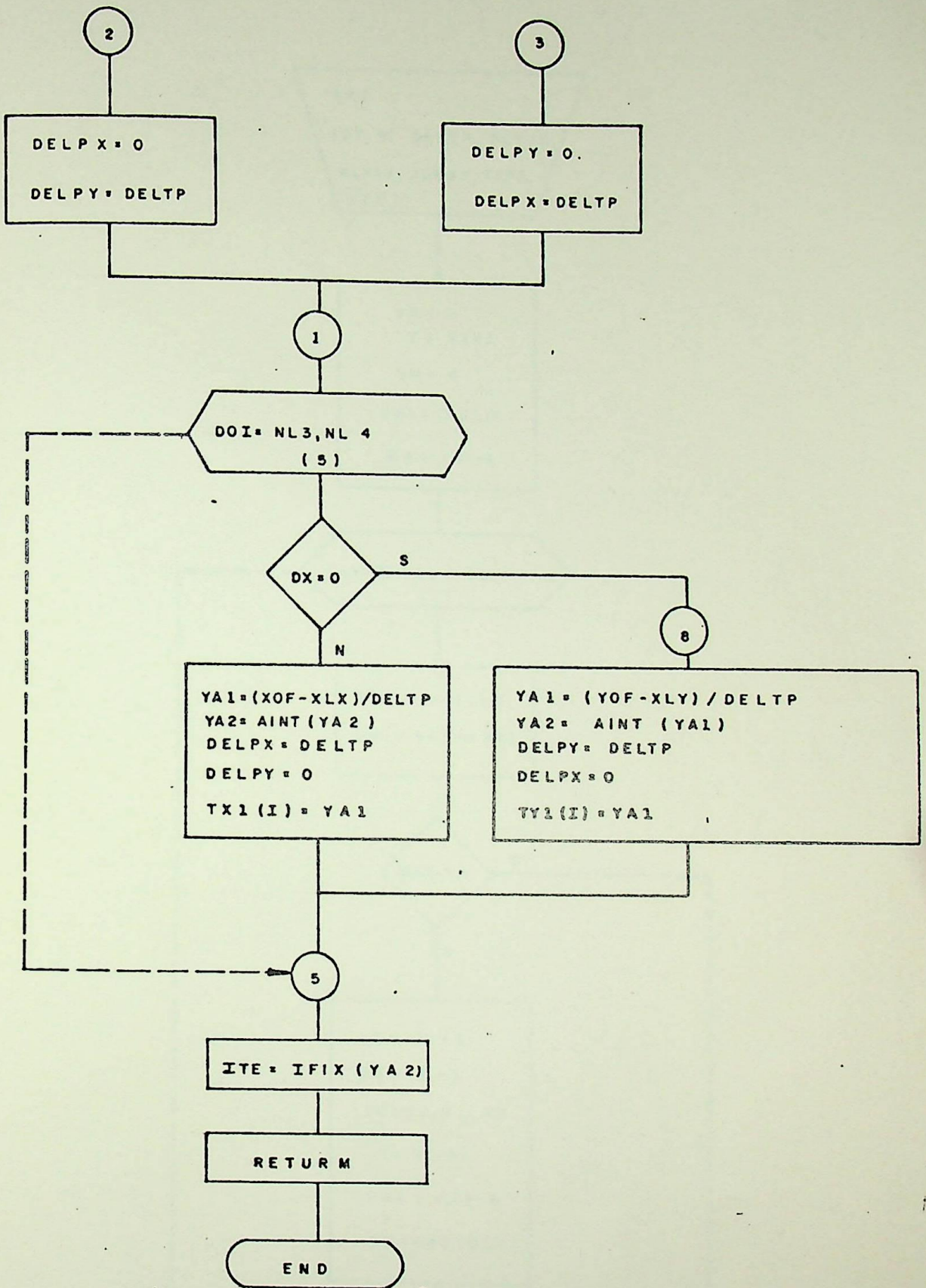




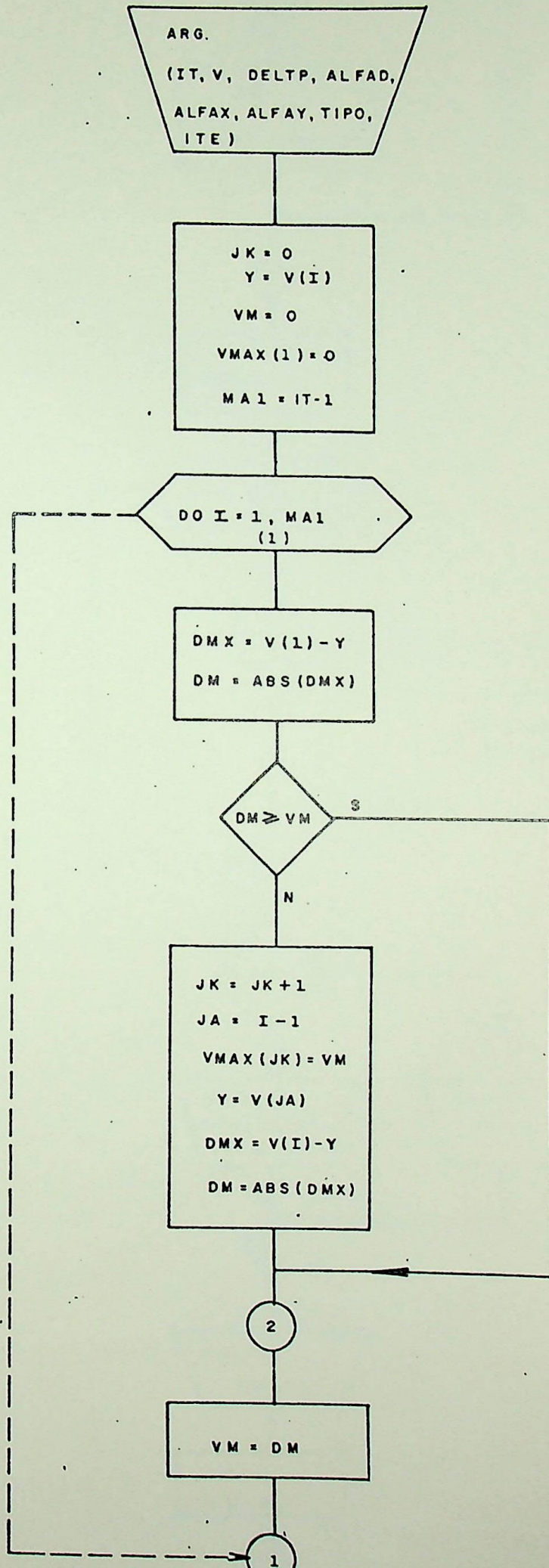
ANEXO V

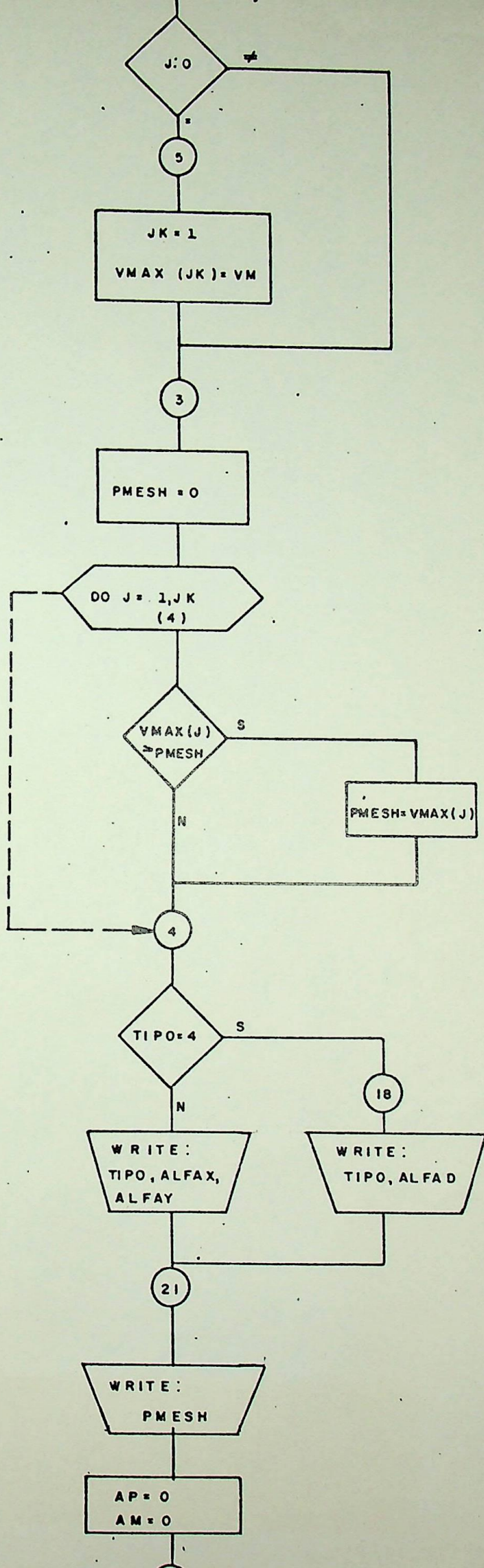
SUB-ROTINA DELDV

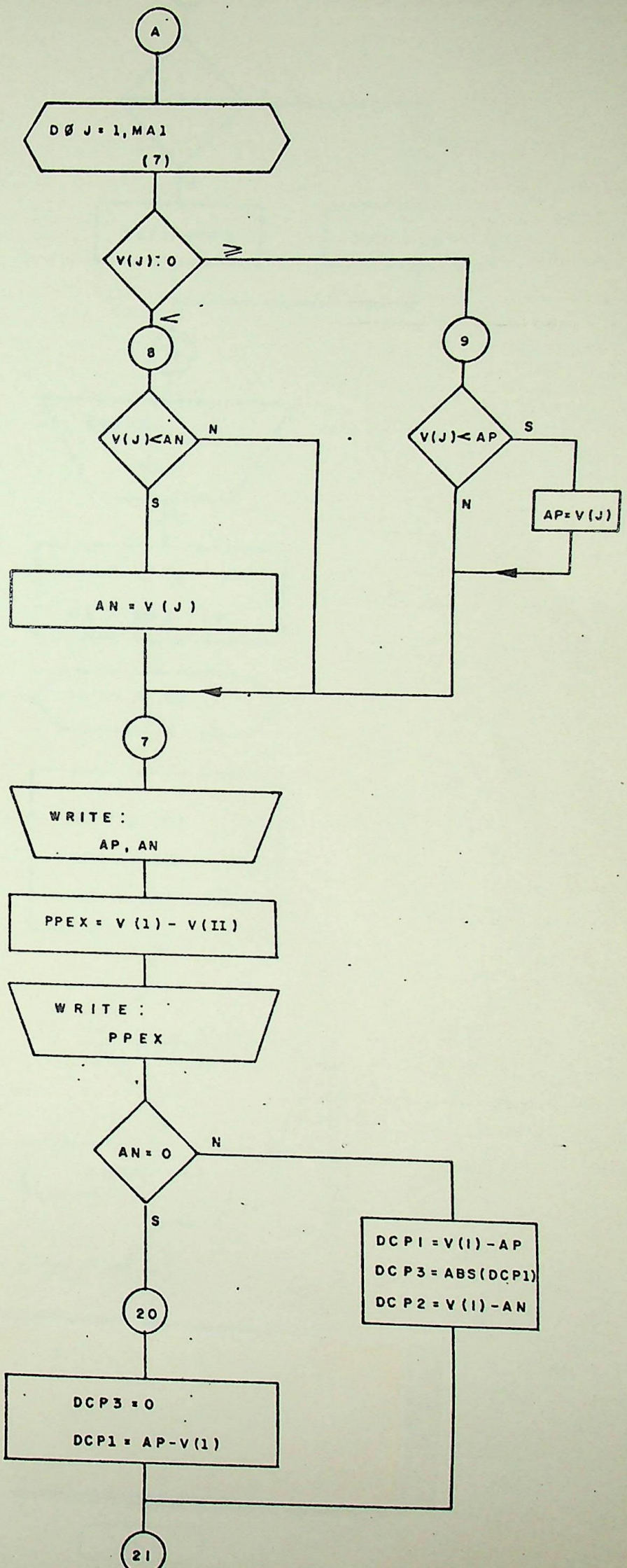


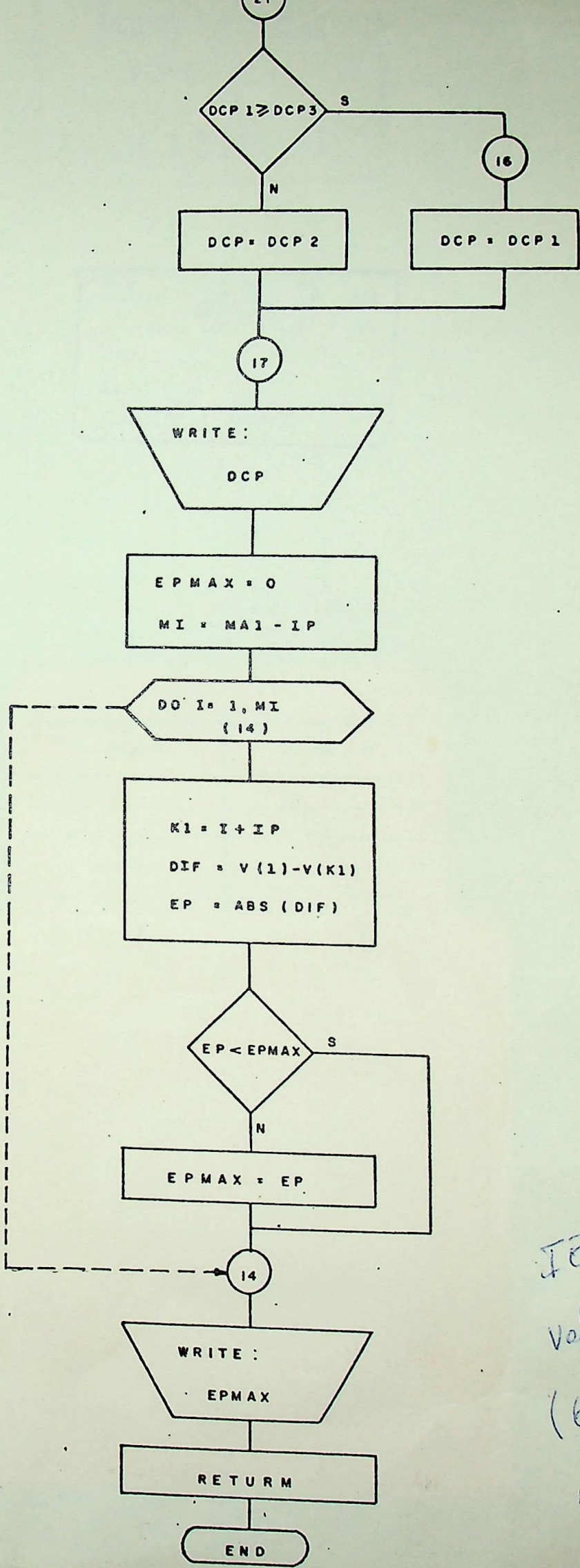


SUB - RETINA CARAC FLUXOGRAMA









IEEE
 Vol IA-8
 (679-683
 Nov/Dec 1972

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200194



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA

