

**"MODELAMENTO E CALCULO DE INDUÇÃO  
MAGNETICA DE LINHA DE ENERGIA ELETRICA  
EM LINHA TELEFONICA"**

**ILDEU MARQUES DOS SANTOS**

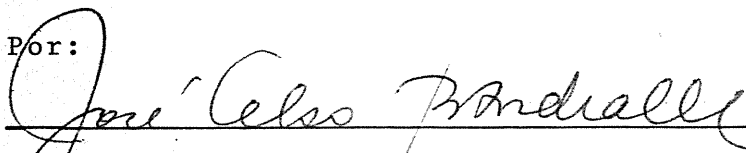
"MODELAMENTO E CÁLCULO DE INDUÇÃO  
MAGNÉTICA DE LINHA DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM LINHA TELEFÔNICA

ILDEU MARQUES DOS SANTOS

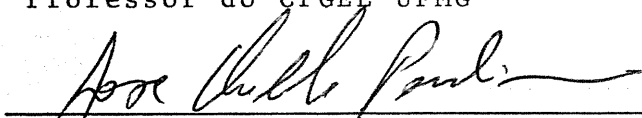
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Aprovada em 23 de novembro de 1.990

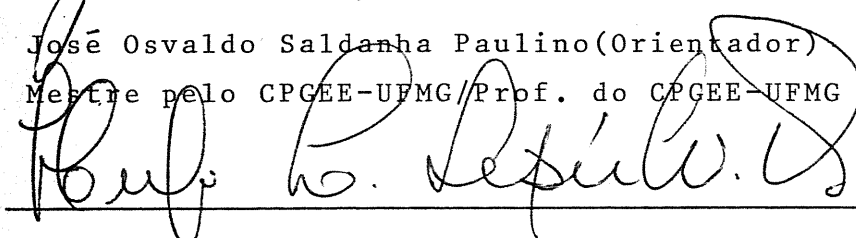
Por:




José Celso Borges de Andrade (Orientador)  
Dr. Ing. Univ. Paul Sabatier-Toulouse-FR  
Professor do CPGEE-UFMG



José Osvaldo Saldanha Paulino (Orientador)  
Mestre pelo CPGEE-UFMG/Prof. do CPGEE-UFMG



Hugo Luiz Sepúlveda  
Notório Saber/Prof. Titular e Emérito da EEUFMG



Elilson Eustáquio Ribeiro  
Mestre pelo CPGEE-UFMG/Engº MF/Consultoria Ltda.



Célio Fonseca Barbosa  
Mestre pelo CPGEE-UFMG/Pesquisador CPqD/TELEBRÁS

## AGRADECIMENTOS

Aos professores José Celso e José Osvaldo mais colegas do que orientadores, mais amigos do que colegas.

Ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) da Telecomunicações Brasileiras S.A. (TELEBRAS) pelo apoio financeiro, indispensável à formação acadêmica.

Aos colegas Célio e Elilson, que nesta jornada caminharam ao meu lado, desde o primeiro passo.

Ao pessoal do Laboratório de Extra Alta Tensão da E. E. UFMG, pela convivência amigável e agradável.

Aos amigos Alexandre, Vicentinho e Luiz Brum do SECPD da Paulo Abib Engenharia S.A. pela digitação dos textos.

Aos meus pais, muito pelo incentivo e mais ainda pelo amor.

Ao meu filho Mateus, pelas horas de convivência que lhe foram subtraídas.

## **HOMENAGEM POSTUMA**

A memória de minha querida e saudosa esposa Edneide, com quem pude aprender que o tempo as vezes nos impede de sermos felizes por mais tempo, dedico esta dissertação.

## SUMARIO

1. INTRODUÇÃO .....	01
2. MODELAMENTO DO FENOMENO DA INDUÇÃO MAGNETICA .....	05
2.1 Características do Sistema de Energia Elétrica.....	05
2.1.1 Subestação Transformadora (SE) .....	06
2.1.2 Linha de Distribuição (LD) .....	09
2.1.3 Carga .....	11
2.2 Características do Sistema Telefônico .....	12
2.2.1 Central Telefônica (CT) .....	13
2.2.2 Linha de Assinante (LA) .....	15
2.2.3 Linha Tronco (LT) .....	17
2.2.4 Assinante .....	18
2.3 Possíveis Influências .....	23
2.3.1 Curta Duração .....	23
2.3.2 Longa Duração .....	25
2.4 Circuito de Modelamento da Indução .....	26
2.4.1 Redução do número de fases .....	26
2.4.2 Circuito Longitudinal .....	30
2.4.3 Circuito Transversal .....	33

3. RESOLUÇÃO DO CIRCUITO DE MODELAMENTO DA INDUÇÃO .....	37
3.1 Método das matrizes proposto por Sebo .....	37
3.2 Método da estrela equivalente proposto por Sebo .....	39
3.3 Método Desacoplado .....	42
3.3.1 Solução de um circuito "LADDER" infinito (CLI) .	43
3.3.2 Tensão de corrente qualquer nó de um circuito "LADDER" infinito .....	44
3.3.3 Solução de um circuito "LADDER" infinito sem terminações .....	45
3.4 Método Proposto .....	46
3.5 Análise dos Métodos para a resolução do circuito .....	51
3.6 Resolução do Sistema por Eliminação de Gauss .....	52
3.6.1 Determinação das Correntes .....	53
3.7 Características da equação matricial a ser resolvida .	53
3.8 Características da Eliminação de Gauss para o sistema em questão .....	57

4. PROGRAMA COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO .....	65
4.1 Dados do Sistema de Energia Elétrica .....	65
4.2 Dados do Sistema Telefônico .....	66
4.3 Descrição sucinta do programa .....	66
4.4 Dados de Saída .....	67
5. SIMULAÇÕES .....	68
5.1 Descrição do caso hipotético .....	68
5.1.1 Linha de Distribuição (LD) .....	69
5.1.2 Linha de Transmissão (LT) .....	71
5.1.3 Rede Telefônica (RD) .....	72
5.2 Simulações .....	73
5.2.1 Curto-Circuito Fase-Terra na LT .....	73
5.2.2 Circulação de Correntes de Regime na LD .....	78
6. CONCLUSÃO .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	83
Apêndice I - FÓRMULAS DE CARSON .....	86
Apêndice II- COMPARAÇÃO DO PROGRAMA COM MEDIÇÕES .....	90

## RESUMO

A quantificação da indução magnética devido a correntes com retorno pela terra, circulando em linhas de energia elétrica é um dos problemas para o sistema telefônico. Este trabalho pretende fornecer as ferramentas para tal quantificação.

O processo da indução é descrito por Barbosa (2) e esta dissertação é a seqüência natural daquela.

O trabalho está inserido dentro da proposta (linha) de pesquisa descrita no capítulo 1.

O capítulo 2 apresenta as características dos sistemas de energia elétrica e telefonia, peculiares ao processo de indução, bem como apresenta um circuito que modela este fenômeno.

Um método de resolução do circuito é apresentado no capítulo 3. O capítulo 4 apresenta sucintamente um programa computacional implementado a partir do método de resolução.

Um caso hipotético é apresentado no capítulo 5, no apêndice I estão as fórmulas simplificadas de Carson e no apêndice II é apresentado um caso real, com medições, e uma simulação através de um programa computacional, cujos resultados obtidos foram comparados com as medições.



## CAPITULO 1 - INTRODUÇÃO

A convivência entre sistemas elétricos de diferentes características é fadada ao aparecimento de influências.

Esta dissertação pretende fornecer uma ferramenta à análise de um dos problemas decorrentes desta convivência. Ela apresenta um circuito que modela uma das fontes de influências, a indução devido a correntes de seqüência zero, um método para resolver este circuito e aplicações de uma implementação computacional do método. Ela complementa relatórios, artigos e dissertações que procuram minimizar as influências advindas da convivência entre os sistemas de energia elétrica e telefonia.

Para sua localização, dentro da filosofia de uma linha de pesquisa sobre influências eletromagnéticas no sistema telefônico, esboçou-se a figura 1.1.

Esta linha de pesquisa está sendo subsidiada pelo CPqD da Telebrás S/A e até o momento propiciou a defesa de sete dissertações.

Os trabalhos executados e em execução podem ser divididos em três grandes áreas: influências decorrentes de descargas atmosféricas, de contatos metálicos nos sistemas em uso-mútuo de posteação e de induções elétricas e magnéticas.

O contato devido ao uso-mútuo de posteação, principal fator de danos ao sistema telefônico foi primeiramente estudado. Para a definição do problema foram levantadas as características de suportabilidade dos componentes do sistema telefônico. O

levantamento demandou a construção de equipamentos apropriados para tal. Paralelamente ao levantamento dos dados, modelou-se o problema.

A resolução do problema advindo do contato metálico decorrente do uso-mútuo, conjuntamente com a obtenção de dados típicos importantes foi o objeto de dissertação de mestrado (1). Atualmente, suas principais conclusões, bem como a ferramenta computacional gerada pela mesma, está servindo de subsídios para a elaboração de procedimentos gerais e para a simulação de situações peculiares.

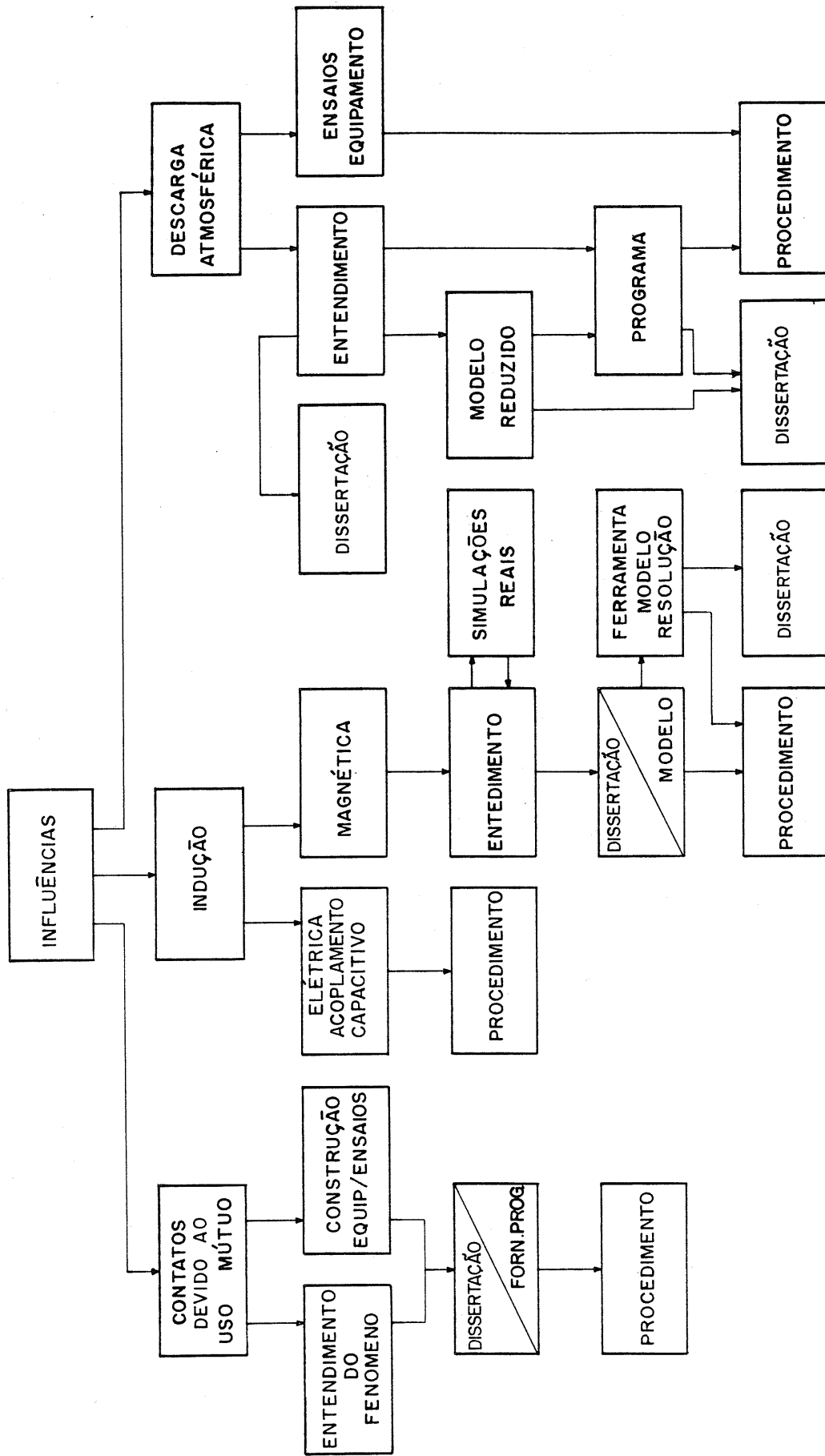


Figura 1.1

A segunda grande área de influência é a indução. A indução devido ao acoplamento capacitivo foi objeto de um relatório técnico e, conforme Barbosa (2), não constitui problema para a grande maioria das linhas telefônicas.

A indução magnética (acoplamento indutivo) mereceu maiores estudos. Para o entendimento do problema, foi construída uma linha experimental. Nesta linha foram realizadas várias medições. Estas medições ajudaram ao levantamento das variáveis importantes ao fenômeno, bem como auxiliaram ao modelamento da indução.

Vários relatórios de medição foram emitidos e uma dissertação de mestrado (2) apresenta as características dos sistemas elétricos e de telefonia, "Indução Magnética de Linhas de Energia Elétrica em Linhas de Telecomunicações", além de explicar o fenômeno de maneira clara e objetiva. Nessa dissertação são levantadas as características do sistema telefônico, ressaltando os vários fatores que influenciam no processo da indução. Pela mesma dissertação é caracterizado o sistema de energia elétrica.

A presente dissertação é a seqüência natural das demais e contribui para a quantificação do processo de indução, modelando a indução devido a correntes de seqüência zero, e apresenta um método de resolução para o modelo.

A terceira fonte de influências nos sistemas telefônico e de energia elétrica se origina nas descargas atmosféricas.

## CAPITULO 2 - MODELAMENTO DO FENOMENO DA INDUÇÃO MAGNETICA

O processo de indução magnética, descrito por Barbosa (2) é detalhado nesta dissertação de forma a se ter um circuito que modela a indução magnética.

O modelo deve permitir o estudo da indução proveniente de correntes de curto-circuitos no sistema de energia elétrica e correntes de regime, com distorção harmônica.

As características do sistema de energia elétrica e telefonia que afetam a indução são levantadas neste capítulo, para a construção do modelo.

### 2.1 Características do sistema de energia elétrica

Este sistema é normalmente o ofensor, ou seja, o gerador de indução magnética no sistema telefônico. Da geração da energia elétrica até a sua entrega ao consumidor final, este utiliza linhas de transmissão, subestações transformadoras e linhas de distribuição.

O sistema de energia é visto, para o objetivo desta dissertação, como uma subestação (SE), uma linha de distribuição (LD) e uma carga concentrada.

São levantadas a seguir as características particulares a cada um dos componentes deste sistema.

### 2.1.1 Subestação transformadora

A subestação (SE) recebe energia elétrica de uma ou várias linhas de transmissão, abaixa ou eleva a tensão, e distribui a vários centros de carga, através de linhas de distribuição.

Os enrolamentos dos transformadores da SE são normalmente ligados em delta, no primário, e em estrela com o neutro aterrado, no secundário. A conexão dos enrolamentos dos transformadores é importante, pois a indução magnética é devida, principalmente, à possibilidade de circulação de corrente de seqüência zero. O neutro da estrela pode ser solidamente aterrado à malha da subestação, bem como pode ser aterrado via resistor ou indutor, ou ainda não ser aterrado. A malha de aterramento da SE é constituída de vários condutores enterrados. Esta malha tem várias funções, tais como referência, segurança pessoal, etc, mas para o modelamento da indução magnética ela será vista apenas com uma impedância.

Linhas de distribuição deixam a SE, transportando energia elétrica a centros de cargas.

As linhas de distribuição têm normalmente um cabo neutro, e este é normalmente multiaterrado.

O neutro da linha de distribuição (LD) pode ser interligado à malha de aterramento da SE. Esta prática em muito

influencia na indução magnética.

As impedâncias de linhas de transmissão, cabos, dispersão dos transformadores e geradores, vistas pela SE influenciam nas correntes de seqüência zero. Estas impedâncias têm um equivalente que é extraído da potência de curto-circuito, através da equação (2.11):

$$Z_{cc} = \frac{V_{ff}^2}{P_{cc}} \quad (2.1)$$

Onde  $Z_{cc}$ : Impedância de curto-circuito;

$P_{cc}$ : Potência de curto-circuito;

$V_{ff}$ : Tensão entre fases.

A partir de todas as considerações pode-se chegar a um modelo de análise para a subestação, que é apresentado na figura 2.1.

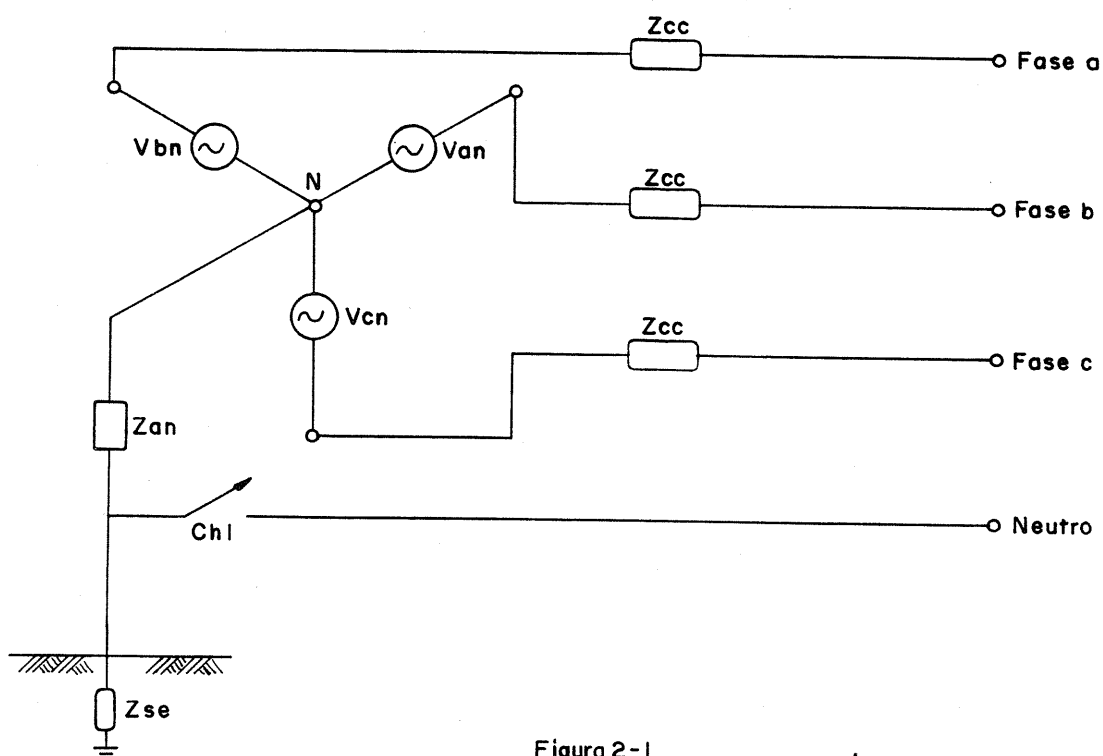


Figura 2-1

Onde :

$Z_{se}$ - Imp. equivalente da malha de aterramento da SE;

$Z_{an}$ - Imp. de aterramento do neutro do transformador ou gerador equivalente da SE;

$V_{an}$ - Tensão da fase "a" ao neutro do transformador ou gerador equivalente da SE;

$V_{bn}$ - Tensão da fase "b" ao neutro do transformador ou gerador equivalente da SE;

$V_{cn}$ - Tensão da fase "c" ao neutro do transformador ou gerador equivalente da SE;

$Z_{cc}$ - Impedância de curto-circuito vista pela SE;

$Ch1$ - Chave que permite a interligação do cabo neutro da linha de distribuição ao ponto neutro do gerador ou do transformador equivalente da SE.



### 2.1.2 Linha de distribuição (LD)

A tensão nominal da linha de distribuição normalmente é 13,8kV. Os cabos são de alumínio, com ou sem alma de aço. As bitolas destes cabos variam de 336,4 MCM a 4 AWG, via de regra.

O cabo neutro, na maioria das linhas, é de bitola inferior á das fases e multiterrado.

O aterramento do neutro é feito em espaçamentos da ordem de 400m, tendo valor típico de 400 ohms de resistência.

As linhas de distribuição que procedem da SE derivam em ramais e, estes são normalmente radiais.

A figura 2.2 esquematiza a geometria da linha de distribuição, sem considerar a baixa tensão.

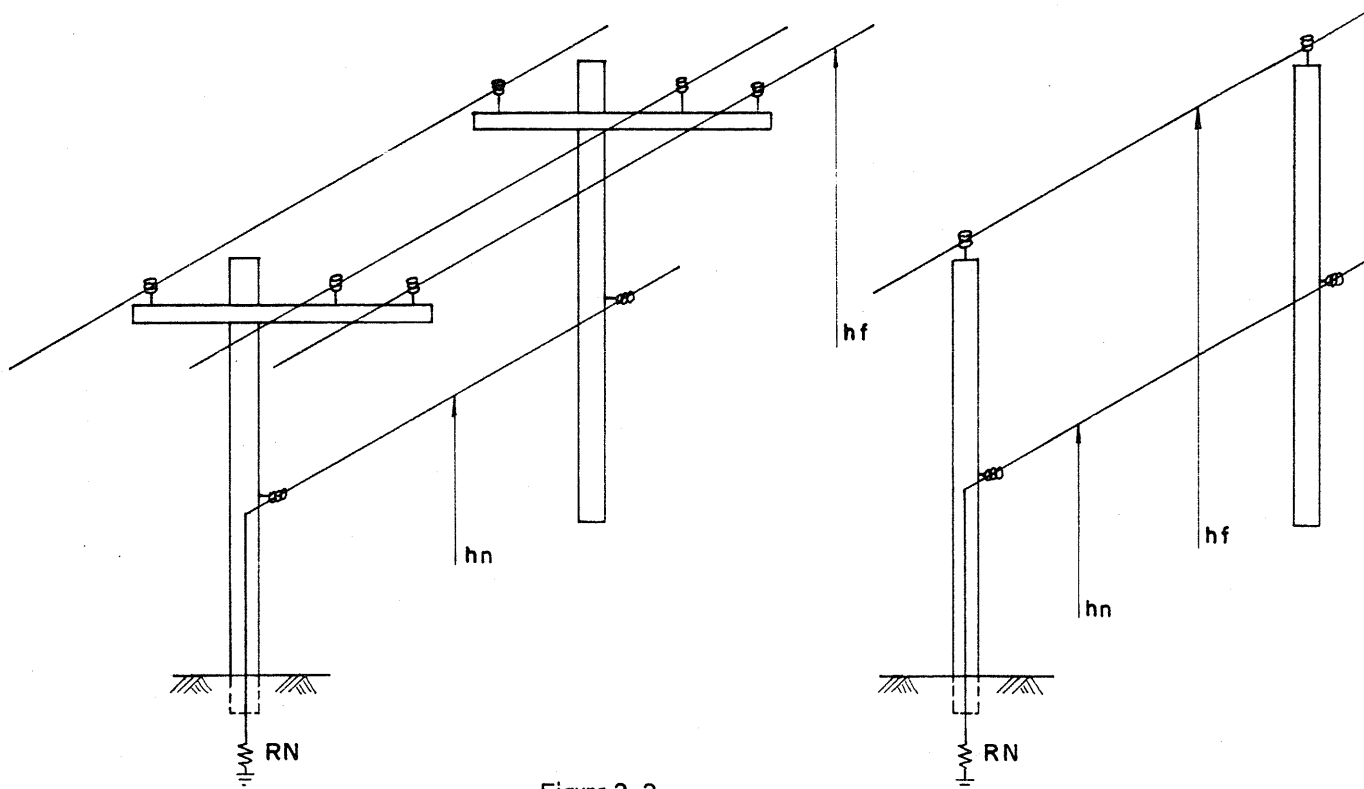


Figura 2-2

Onde:

$h_f$ : Altura dos condutores da fase ao solo, sendo de 8,40m a altura típica para redes monofásicas;

$h_n$ : Altura do condutor neutro ao solo, sendo de 7,20m a sua altura típica;

$R_n$ : Resistência de aterramento do neutro, podendo-se considerar de 400 ohms seu valor médio, para solos de Minas Gerais.

### 2.1.3 Carga

No centro de carga, a tensão de fornecimento é normalmente de 220 ou 380V.

É comum a LD sair da subestação, na configuração trifásica, derivar em ramais monofásicos ou bifásicos, para alimentar pequenos centros de carga.

As configurações de ligação dos enrolamentos das bobinas dos transformadores nos centros de carga é importante para a indução magnética. As configurações que permitem a circulação de correntes de desequilíbrio (2) estão na figura 2.3.

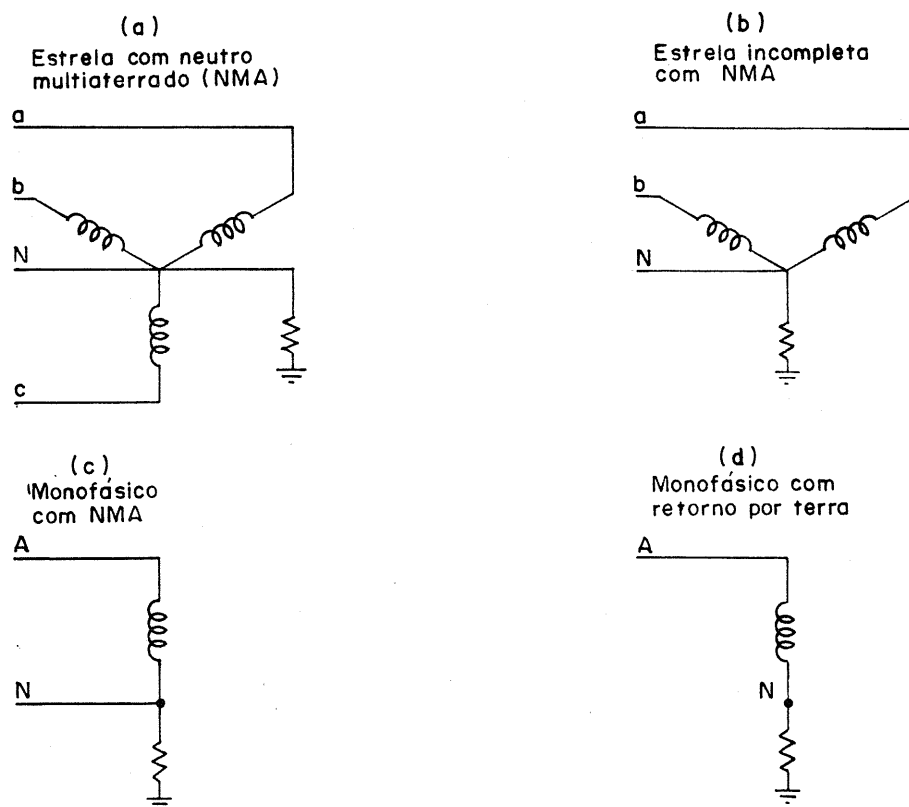


Figura2-3

A frequência das componentes da corrente de carga ( em regime permanente) influencia no processo de indução. As componentes harmônicas são geradas principalmente por distorção harmônica. Esta ocorre devido a vários fatores:

- Saturação do aço dos núcleos dos transformadores;
- Retificadores e conversores;
- Fornos a arco, etc.

## 2.2 Características do sistema telefônico

O sistema telefônico é composto de várias centrais telefônicas interligadas. Estas são interligadas por cabos (ótico ou de fios de cobre) ou via rádio.

Partem de cada central, pares físicos de fios que terminam em um assinante. A linha telefônica que parte da central e chega ao assinante normalmente é composta de um trecho subterrâneo e outro aéreo.

As linhas telefônicas que interligam as centrais são denominadas de Linhas Tronco. Estas linhas são normalmente subterrâneas.

A figura 2.4 esquematicamente esboça as definições acima.

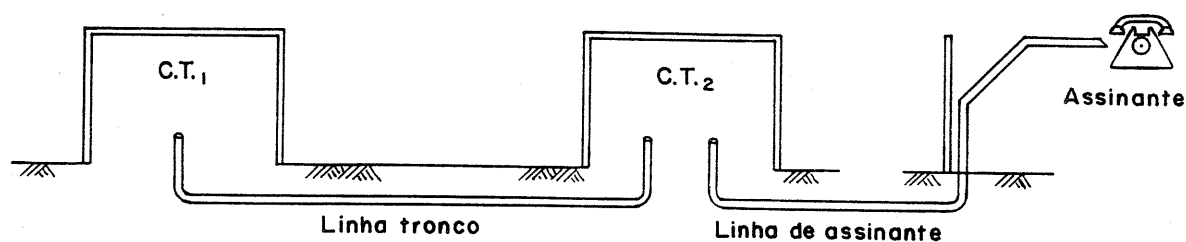


Figura 2-4

### 2.2.1 Central telefônica

A central telefônica tem o objetivo de comutar dois pares de fios para que dois assinantes sejam conectados. Para tal, a central possui equipamentos de comutação.

A central telefônica possui uma malha de aterramento, e esta é composta por condutores de cobre enterrados no solo.

O fornecimento de energia elétrica a uma central telefônica é normalmente feito por 3 condutores fase e um neutro. O medidor desta energia é usualmente aterrado por uma haste, esta haste está fisicamente próxima à malha da SE, pode-se dizer que em muitos casos a malha da central está eletricamente ligada ao condutor neutro do sistema de energia.

O sistema telefônico utiliza tensão contínua como portadora do sinal de áudio e ela é conseguida através de retificadores. Estes retificadores mantêm constantemente um banco de baterias carregado. É importante ressaltar que o polo positivo

deste banco está ligado à malha de aterramento.

O estado do circuito do par, se em conversação ou não, na central telefônica, conforme Barbosa (2) é de grande importância ao processo de indução. Neste trabalho supõe-se que o circuito telefônico esteja em conversação e que na central telefônica exista referência à terra, através da bobina de alimentação e do polo positivo do banco de baterias.

A figura 2.5 ilustra a terminação dos pares na CT, bem como apresenta os valores típicos de alguns parâmetros.

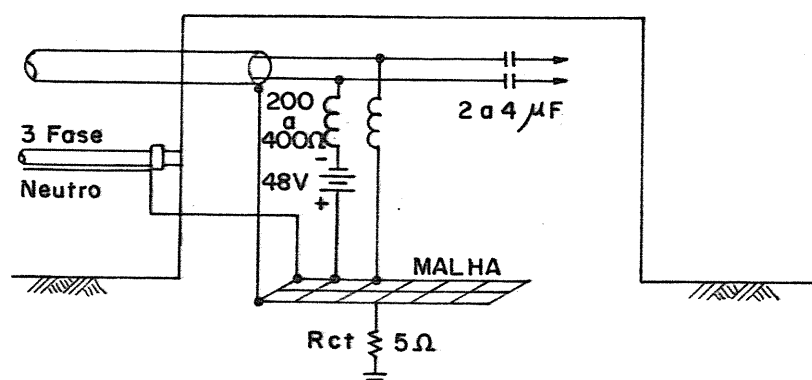


Figura2-5

Para cada central telefônica pode-se tomar como valores típicos de resistência de sua malha 5 ohms e, 1 ohm como resistência equivalente (1). Esta resistência equivalente é a resistência vista pela interligação de várias centrais, através das blindagens dos cabos tronco, pois todas as blindagens são interligadas às malhas .

A figura 2.5 também mostra o cabo neutro interligado à malha da central.

Os valores típicos (2) dos parâmetros são indicados na figura 2.5.

### 2.2.2 Linha de assinante

A linha de assinante parte da central telefônica e vai até o usuário final (o assinante).

Normalmente a linha parte da central em cabos subterrâneos, de muitos pares. Estes cabos, após certa distância, passam para a configuração aérea, estando montados em postes.

A medida que os cabos vão se distanciando da central telefônica, seus fios vão se ramificando, atendendo a assinantes e os cabos, diminuindo de bitola.

O cabo telefônico é composto de vários pares trançados. Os fios do par são de cobre, de diâmetro variando de 0,40mm a 0,90mm. O cabo possui uma blindagem metálica. Esta blindagem é uma capa de alumínio ou chumbo. Em torno desta blindagem existe um revestimento normalmente de polietileno.

Os parâmetros elétricos dos cabos, tais como resistência e capacitância dos fios do par e da blindagem podem ser encontrados em catálogos de fabricantes (Pirelli, Ficap, etc).

É importante ressaltar que os fabricantes fornecem um desbalanceamento percentual médio para a resistência de um dos

fios do par em relação ao outro, de aproximadamente 2%.

Existe também, um desbalanceamento capacitivo, para as capacitâncias entre os fios do par e a blindagem, de aproximadamente 2%. Os desbalanceamentos resistivo e capacitivo foram ressaltados porque influenciam, em muito, na indução magnética.

A blindagem do cabo telefônico normalmente é aterrada de 250 em 250m. Este aterramento é feito com hastes de 1/2" x 2,4m, sendo que as hastes são normalmente dispostas em linha. O número de hastes por aterramento varia tipicamente de 3 a 5.

Os aterramentos da rede telefônica são feitos distantes dos aterramentos do condutor neutro da linha de energia elétrica, de transformadores e de subestações. Esta dissertação, seguindo os critérios de instalação de redes telefônicas não considera que haja acoplamento resistivo, através de aterramentos da rede telefônica próximos aos do sistema de energia elétrica.

Os cabos telefônicos, de maneira geral não são autosustentáveis e para sustentá-los é lançada uma cordoalha de aço-zincado de 4,8mm ou 6,4mm de diâmetro. Esta cordoalha recebe o nome de cabo mensageiro.

O cabo mensageiro pode ser interligado eletricamente com a blindagem e é normalmente multiaterrado. Sua resistência típica é de 14 ohms/km para os cabos com diâmetro de 4,8mm e 7 ohms/km para os de 6,4mm.



A figura 2.6 apresenta os parâmetros que influenciam na indução magnética, com respeito à linha de assinante.

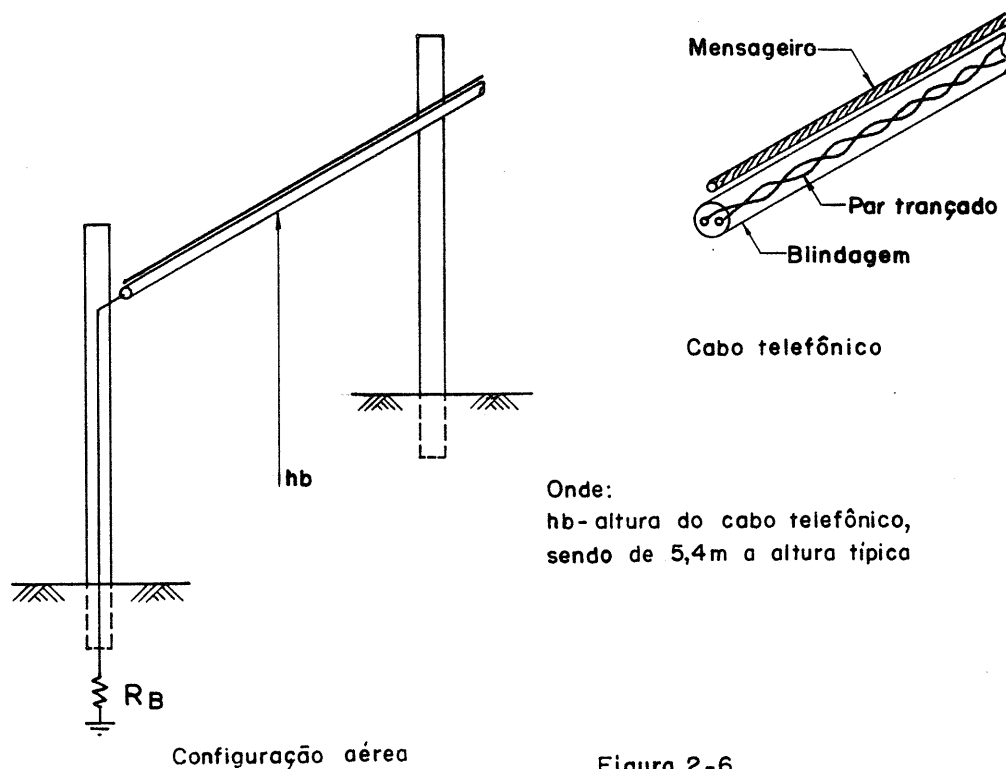


Figura 2-6

### 2.2.3 Linha tronco

A linha tronco interliga eletricamente duas centrais telefônicas. Esta linha, permite que dois assinantes de duas centrais telefônicas sejam conectados. Esta linha normalmente é subterrânea, e o cabo é de grande número de pares. As blindagens dos cabos das linhas tronco estão interligadas com as malhas das centrais. Estas são de chumbo ou de alumínio. A figura 2.7 apresenta o esboço da linha tronco.

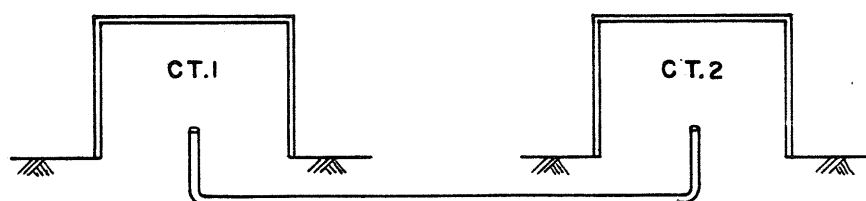


Figura2-7

#### 2.2.4 Assinante

O assinante é o usuário do sistema telefônico. Este pode usar dos serviços do sistema telefônico através de um telefone, telex, computador, fac-símile, etc.

O assinante recebe dois fios telefônicos (par). Estes fios não têm, na maioria dos casos, nenhuma referência física à terra (metálica) no local de recebimento.

O aparelho pode ser visto como uma resistência variável de aproximadamente 100 a 300 ohms.

As influências que podem aparecer no usuário são:

- a) Tensão entre o par e o terra (Longitudinal);
- b) Tensão entre os fios do par (Transversal).

A tensão longitudinal pode queimar componentes de equipamentos ligados ao par, bem como pode comprometer a segurança pessoal do assinante.

Não existe padronização de tensão suportável pelos equipamentos, cada equipamento tem seu próprio limite.

Quanto aos limites de tensão suportável pelo ser

humano, existem equações empíricas (científicas) que fixam os limites em função da corrente suportada pelo mesmo. Sua duração depende de características físicas de cada pessoa e, o valor da corrente circulante pelo corpo depende da sua resistência.

Se se supõe um corpo humano de 1230 ohms de resistência, para intervalos de duração da corrente circulante compreendidos entre 1/60 a 3s, tem-se:

$$U = (1230 \cdot \sqrt{t}) / 116 \text{ Volts} \quad (2.2)$$

Onde:  $t$  = Tempo (s)

$U$  = Tensão Suportável (V)

Pode-se a partir da equação acima construir a tabela 2.1 de suportabilidade para as hipóteses consideradas.

t(s)	U(V)
0.0167	1427
0.1000	455
0.5000	200
1.0000	143
3.0000	95

Tabela 2.1

A NB 447 (5) fixa alguns limites, conforme pode-se ver na tabela 2.2.

t(s)	U(V)
0.5000	650
1.0000	430
Infinito	65

Tabela 2.2

Outra característica importante para a quantificação da qualidade do serviço fornecido ao assinante é o nível de tensão entre os fios do par (tensão transversal).

A ABNT estabelece o limite de 1mV eficaz para a tensão transversal.

O telefone e o ouvido humano formam um filtro que percebe a tensão transversal induzida de maneira diferente para cada frequência. As características deste filtro vêm sendo pesquisadas por diversos organismos internacionais. Estas vêm sendo revistas de tempos em tempos, devido à melhoria da resposta da cápsula telefônica.

Existem basicamente duas curvas de ponderação para as diversas frequências, aceitas mundialmente:

- a) Curva C-Message;
- b) Curva CCITT (Ponderação Psométrica).

A TELEBRAS utiliza a curva CCITT. A curva pode ser vista na figura 2.8.

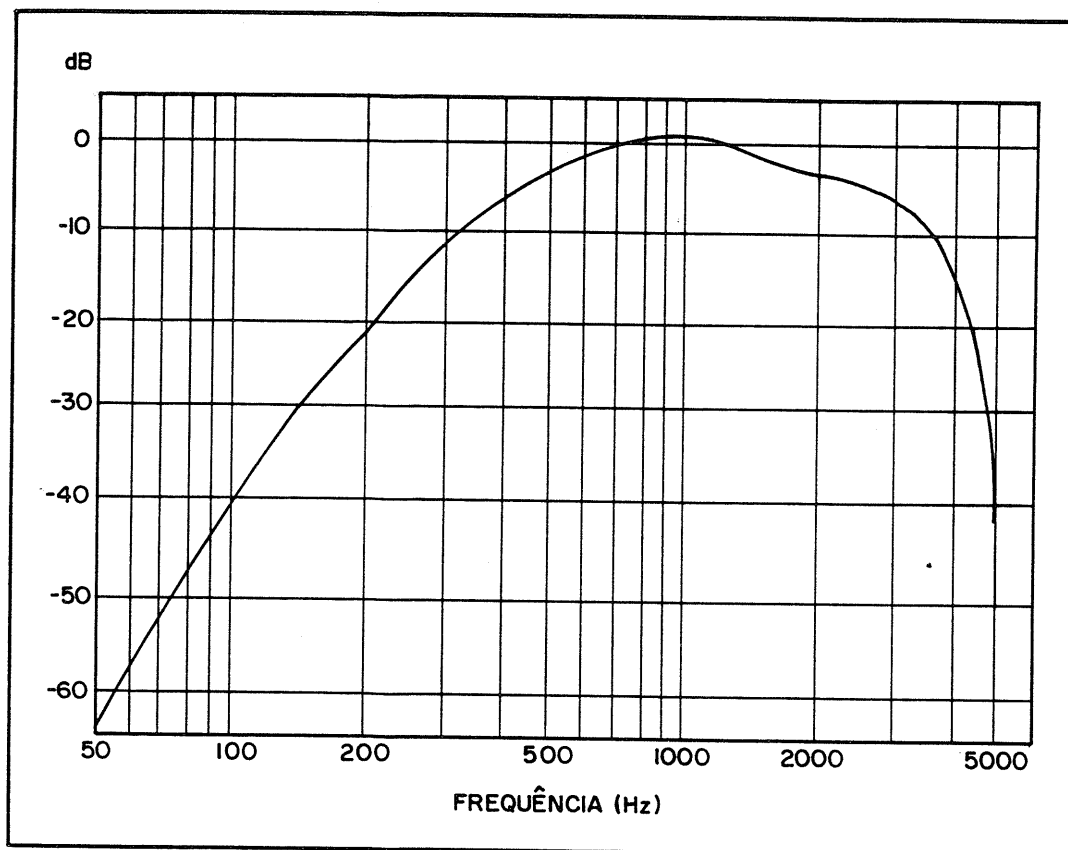


Figura 2.8

O fator psfométrico é aplicado a uma tensão em uma dada frequência para dar a mesma intensidade de ruído, aplicado ao conjunto telefone e ouvido humano. Ou seja, a sensação do ruído de 1mV em 900Hz é a mesma que 14,8mV em 180 Hz.

A composição das tensões transversais nas diversas frequências em valor eficaz é feita através da raiz quadrada da soma dos quadrados. Se se desejar determinar o valor eficaz da tensão transversal psfométrica deve-se somar os quadrados do produto do peso psfométrico pela tensão transversal, e extrair a raiz quadrada.

$$V_{\text{psof. eficaz}} = \sqrt{\sum \{V_t(f) \times \text{Peso psof}\}^2} \quad (2.3)$$

$$V_{\text{eficaz}} = \sqrt{\sum \{V_t(f)\}^2} \quad (2.4)$$

É muito comum o trato das tensões transversais em decibéis (dB) relativos a uma potência de referência (1mW).

Considerando-se a resistência do telefone igual a 600ohms, uma potência de 1mW, em uma resistência de 600 ohms, leva a uma tensão de 775 mV..1s1

$$V_t \text{ (dBm)} = 20 \log \left( \frac{V_{\text{transversal (mV)}}}{775} \right) \quad (2.5)$$

Também, trata-se a tensão transversal psfométrica (Vtp) em decibéis psfométricos (dBmp).

$$V_{tp} \text{ (dBmp)} = 20 \log \left( \frac{V_{tp} \text{ (mV)}}{775} \right) \quad (2.6)$$

A TELEBRAS fornece limites de tensões induzidas em suas linhas. A tabela 2.3 indica estes limites .

TIPO DE LINHA	CONDIÇÃO DE ACEITAÇÃO DA LINHA (dBmp)					
	Ruim		Aceitável		Ótimo	
	LN*	LO*	LN	LO	LN	LO
Cabos	>-50	>-50	<-50	<-70	<-70	<-70
Fio nu	>-44	>-44	<-44	<-64	<-64	<-64

Obs.: (\*) LN - Linha Nova  
LO - Linha em Operação

Tabela 2.3

Já se discute nova interferência, aplicável a redes digitais (RDSI-Redes digitais de serviços integrados) onde, ao que parece, a frequência que provoca maior interferência é a de 40,0 kHz.

### 2.3 Possíveis influências

Os dois itens anteriores levantaram as características básicas dos sistemas de energia elétrica e telefonia que influenciam no processo de indução.

Este item discutirá os agentes geradores de indução.

Quanto a duração pode-se dividir em fenômenos de curta e longa duração.

#### 2.3.1 Curta duração

O fenômeno transitório ou curta duração tem duração da ordem de dezenas de ciclos, sendo que as principais causas são

"inrush" de transformadores e capacitores, partida de motores e curto-circuitos.

Este trabalho dedica-se ao estudo dos curto-circuitos, porque estes têm, também, alta taxa de ocorrência, principalmente em redes de distribuição.

O curto-circuito pode ocorrer entre dois ou três condutores fase, ou destes para terra ou neutro.

Os curto-circuitos entre condutores fase provocam indução magnética em uma linha paralela devido principalmente ao desbalanço geométrico (desequilíbrio de impedâncias), não sendo de grande importância, ou seja a indução é pequena.

Os curto-circuitos fase-terra ou fase-neutro têm divisão de correntes (retorno pelo solo) entre solo e condutores, gerando normalmente maiores tensões induzidas.

A corrente de curto-circuito pode ser decomposta em correntes de várias frequências.

Este trabalho, em todas as menções da corrente de curto-circuito está se referindo apenas à sua componente fundamental (60 Hz). O circuito que modela a indução, bem como o algoritmo que o resolve, permite considerar as demais frequências.



### 2.3.2 Longa duração

O fenômeno de longa duração é aquele que, intencionalmente ou não, produz correntes de retorno por terra. Estas correntes são compostas normalmente de uma componente fundamental e várias harmônicas.

As mais comuns fontes de harmônicas são :

- a) Saturação magnética do aço do núcleo dos transformadores;
- b) Fornos a arco;
- c) Retificadores e inversores;
- d) Máquinas rotativas, etc.

Esta dissertação assumirá que as correntes harmônicas que circulam em uma linha de distribuição tenham a composição (6) da tabela 2.4.

f(Hz)	Harmônica	% I de 60Hz
180	3	6,00
300	5	3,00
420	7	0,60
540	9	0,25
900	15	0,40
1500	25	0,20

Tabela 2.4

A circulação de correntes (60Hz) desequilibradas, permitida pela forma de ligação dos transformadores, é um fenômeno permanente e é gerador de indução magnética.

## 2.4 Circuito de modelamento da indução

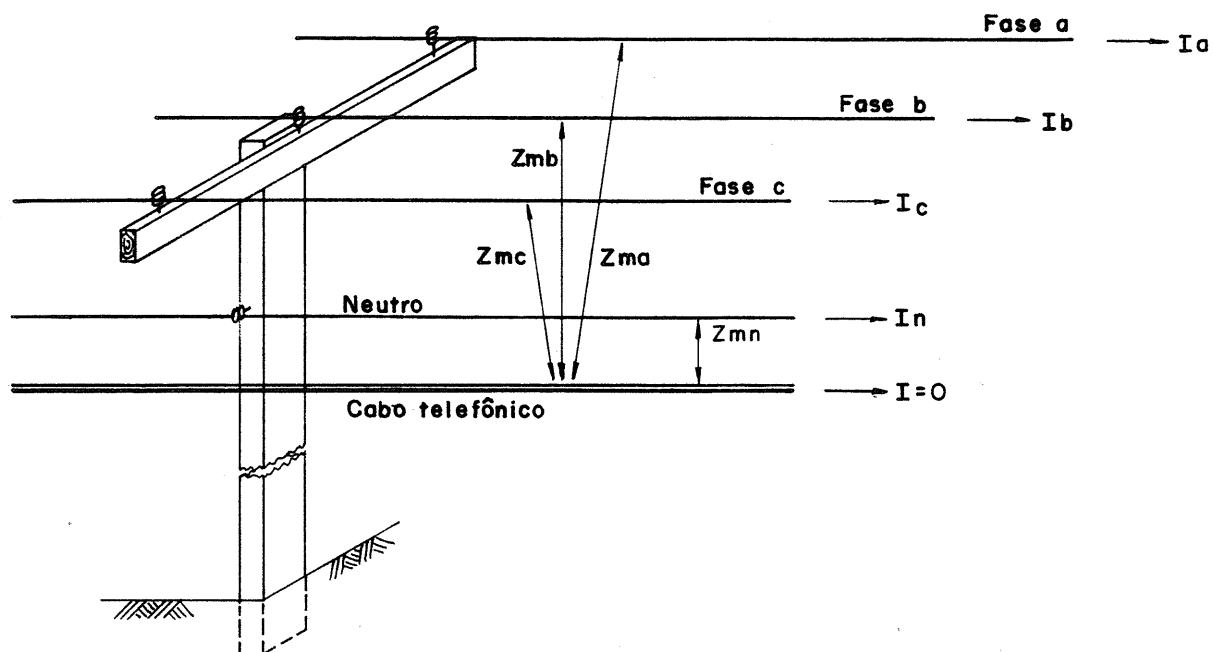
Após se levantar as principais características do sistema de energia elétrica e telefonia, que influenciam no processo da indução magnética, apresenta-se um circuito que modela o fenômeno.

### 2.4.1 Redução do número de fases

A distribuição da energia elétrica é feita normalmente a três fios e um neutro.

Para efeito de indução magnética, pode-se simplificar o número de condutores fase para apenas um condutor fase.

A simplificação pode ser evidenciada com o auxílio da figura 2.9.



Onde:

$Z_{ma}$ -Impedância mútua entre a fase "a" e o cabo telefônico.

$Z_{mb}$ -Impedância mútua entre a fase "b" e o cabo telefônico.

$Z_{mc}$ -Impedância mútua entre a fase "c" e o cabo telefônico.

$Z_{mn}$ -Impedância mútua entre o condutor neutro e o cabo telefônico.

Figura 2.9

A tensão induzida no cabo telefônico será dada pela equação (2.7):

$$V_{induzida} = I_a.Z_{ma} + I_b.Z_{mb} + I_c.Z_{mc} + I_n.Z_{mn} \quad (2.7)$$

Conforme descrito por Barbosa (2), as impedâncias mútuas entre as fases e o cabo telefônico, para as configurações normais das redes de distribuição, podem ser vistas na Tabela 2.5.

Impedâncias Mútuas (ohms/km)

	Linha telefônica aérea		Linha telefônica Subterrânea	
	R	X	R	X
Z <sub>ma</sub>	0.0058	0.480	0.0058	0.396
Z <sub>mb</sub>	0.0058	0.486	0.0058	0.400
Z <sub>mc</sub>	0.0058	0.483	0.0058	0.400
Z <sub>mn</sub>	0.0058	0.523	0.0058	0.411

Tabela 2.5

Como se pode observar na tabela 2.5, as impedâncias Z<sub>ma</sub>, Z<sub>mb</sub> e Z<sub>mc</sub> são praticamente iguais, e um pequeno erro se cometeria ao considerá-las iguais, considerando-se as topologias típicas das redes.

$$\text{Ou seja } Z_{ma} = Z_{mb} = Z_{mc} = Z_m,$$

$$\text{e } V_{induzida} = (I_a + I_b + I_c).Z_m + I_n.Z_{mn} \quad (2.8)$$

Desta forma pode-se reduzir as três fases a apenas uma conduzindo  $I_a + I_b + I_c$ . O circuito equivalente simplificado é apresentado na figura 2.10.

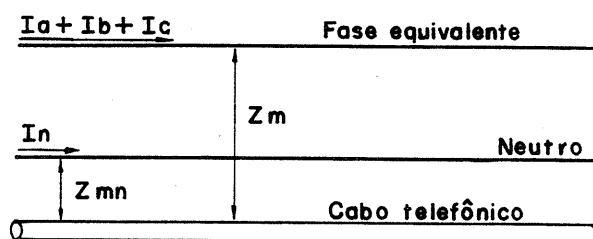


Figura 2-10

De forma análoga pode-se reduzir um circuito com duas fases a apenas uma.

### 2.4.2 Circuito longitudinal

Todos os parâmetros que têm influências na quantificação das tensões longitudinais são apresentados na figura 2.11.

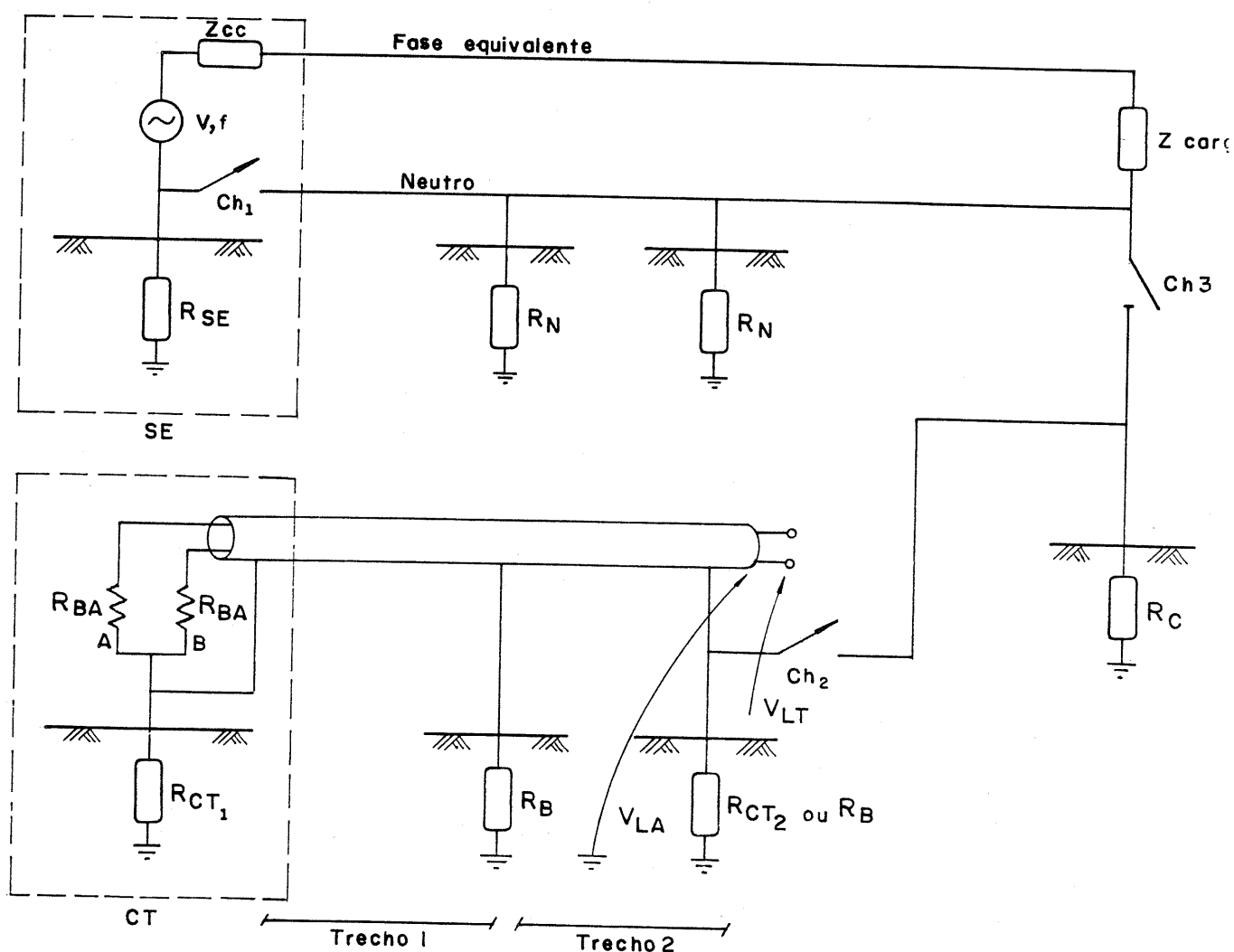


Figura 2.11

Onde:

- V - Tensão da fonte indutora;
- f - Freqüência da fonte indutora;
- Zcc - Impedância de curto-circuito;
- Rse - Resistência da malha da SE;
- Rn - Resistência de aterramento do neutro;
- Rct - Resistência equivalente da malha da central telefônica (CT);
- Rb - Resistência de aterramento da blindagem;
- Rba - Resistência da bobina de alimentação;
- Rc - Resistência de aterramento equivalente da carga;
- Zcarga - Impedância equivalente da carga;
- Ch1 - Interligação do condutor neutro à malha de aterramento da SE;
- Ch2 - Interligação da malha da Central Telefônica ao condutor neutro;
- Ch3 - Interligação da carga à sua resistência de aterramento;
- Trechos 1 e 2 - Possibilitam modificação da topologia das redes telefônicas e de energia elétrica .
- VLA - Tensão longitudinal sentida pelo assinante
- VLT - Tensão longitudinal sentida em outra central (linha tronco).

Na figura 2.11 são destacados dois trechos (1 e 2), porque normalmente a linha telefônica deixa a central na topologia subterrânea, passando depois para aérea. Para a linha de energia também é útil a permissão de mais de uma topologia de rede, pois a subestação está normalmente distante da central telefônica e distante do início do paralelismo entre as redes de telefonia e energia elétrica.

Desta forma os cabos de energia e telefonia podem ou não estarem fisicamente paralelos neste trecho, bem como terem comprimentos diferentes.

No trecho 2, os cabos estão fisicamente paralelos e são de mesmo comprimento.

A chave 1 permite a interligação do cabo neutro da LD à malha da SE. Esta prática vem sendo cuidadosamente estudada pelas concessionárias de energia e influencia na indução magnética.

As chaves 2 e 3 permitem o estudo da influência da ligação da malha da central telefônica ao condutor neutro. Conforme salientado em itens anteriores, esta interligação pode ser não intencional e ela pode se dar através do aterramento do medidor de energia.

O objetivo da resolução do circuito é a determinação de VLA ou VLT. A tensão longitudinal do assinante (VLA) difere da tensão longitudinal da linha tronco (VLT) porque o telefone do assinante não tem referência a nenhuma malha, enquanto a VLT tem



com referência a malha da central. E de se observar que existem dois tipos básicos de linha telefônica, a linha do assinante, que liga este a uma central e, a linha tronco, que liga duas centrais telefônicas.

As tensões longitudinais, como dito anteriormente, podem comprometer a segurança pessoal, bem como podem danificar equipamentos.

#### 2.4.3 Circuito transversal

As tensões transversais são um dos resultados das tensões longitudinais e das deficiências construtivas dos cabos e equipamentos telefônicos.

O cabo telefônico pode ser visto, com respeito ao aparecimento de tensões transversais, como um par dos fios e uma blindagem condutora. A tensão entre os fios do par é devida basicamente aos desbalanceamentos resistivo e capacitivo e seu aparecimento será tratado neste item.

Na figura 2.12 pode-se ver o fio indutor, conduzindo a corrente  $I$ , a blindagem e os fios do par telefônico.

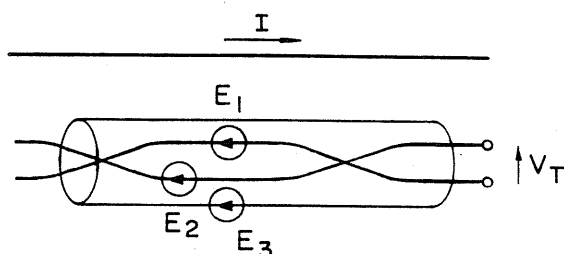


Figura 2.12

A circulação da corrente  $I$  provoca o aparecimento de forças eletromotrizes ( $E_i$ ) induzidas em um fio 'i' qualquer. As forças induzidas dependem da corrente  $I$  e das impedâncias mútuas entre os fios.

As impedâncias mútuas entre o fio indutor e os demais são praticamente iguais, pois não se tem apreciável diferença de distância entre os fios do par e da blindagem em relação ao fio indutor e pode-se dizer que as forças eletromotrizes induzidas são praticamente iguais ( $E_1=E_2=E_3$ ).

É sabido que a blindagem é multiterrada. Os aterramentos permitem que haja circulação de corrente devido a tensão induzida e a circulação desta corrente provoca uma queda de tensão ao longo da blindagem, mas os valores práticos de corrente circulante na blindagem são pequenos. Pode-se afirmar que a tensão induzida nos demais devido a esta corrente é desprezível.

Outro ponto importante é a referência à terra dos fios do par telefônico. Conforme dito no item 2.2.1, os fios têm uma referência à terra através do polo positivo da bateria.

Todas as informações citadas anteriormente podem ser sintetizadas na figura 2.13.

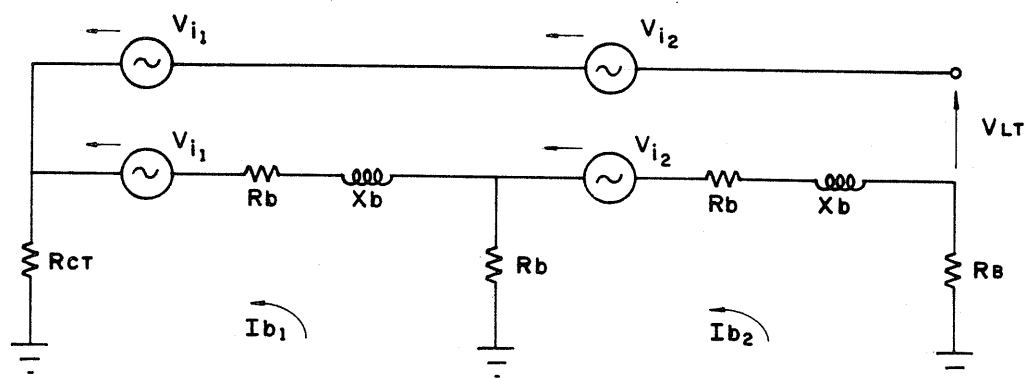


Figura 2.13

Antes da possibilidade de circulação de corrente na blindagem, a diferença de tensão entre esta e qualquer um dos fios do par era zero. Agora, a diferença de tensão é igual à queda de tensão ao longo da blindagem, provocada pela corrente circulante nesta.

Ao longo da blindagem aparece uma diferença de potencial para os fios de par telefônico. Esta diferença de potencial provoca o aparecimento de correntes capacitivas. Estas correntes capacitivas circulam nos fios do par para a terra, fechando o circuito através da malha da central telefônica e da referência à terra (positivo da bateria).

Pode-se visualizar estes efeitos pela figura 2.14.

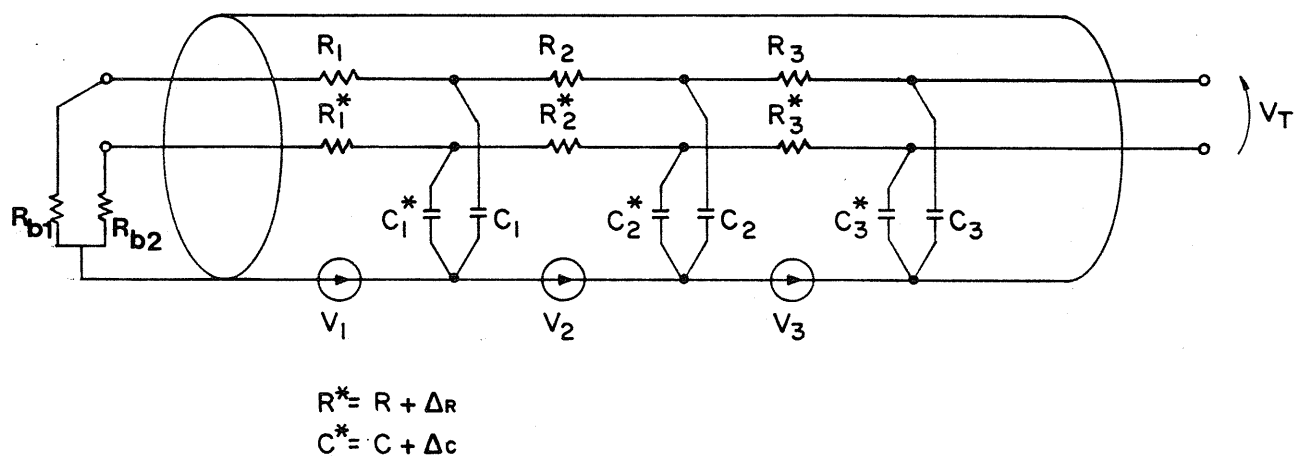


Figura 2.14

A tensão transversal ( $V_t$ ) entre os fios é devido a  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_{b1}$  e  $R_{b2}$ . Se  $C_1^* = C_2$ ,  $R_1^* = R_2$  e  $R_{b1} = R_{b2}$  pode-se dizer que a tensão transversal é nula.

Como os cabos têm um desbalanceamento resistivo e capacitivo, inerente ao processo de fabricação, aparecerá uma tensão transversal, se existir tensão longitudinal.

### CAPITULO 3 - RESOLUÇÃO DO CIRCUITO DE MODELAMENTO DA INDUÇÃO

A determinação das tensões induzidas no circuito telefônico pelo sistema de energia é conseguida pela resolução do circuito da figura 2.11.

Vários autores têm se dedicado a resolver circuitos semelhantes.

Os métodos mais clássicos foram descritos por Sebo (7). Atualmente, vem se destacando para a resolução de circuito de acoplamento fraco, o método desacoplado.

Ao longo deste capítulo, são sucitamente descritos os métodos clássicos para a resolução de circuito com retorno de corrente por terra e, é apresentado também, um novo método alternativo de resolução.

#### 3.1 Método das matrizes proposto por Sebo

Sebo apresenta dois métodos para a resolução de circuitos de correntes de seqüência zero. Em seus modelos, considerou as seguintes hipóteses simplificadoras:

- a) Capacitâncias desprezíveis;
- b) Impedâncias em série são consideradas como parâmetros concentrados;
- c) As impedâncias de seqüência zero próprias e mútuas (com retorno pelo solo) são calculadas a partir

das fórmulas de Carson (apêndice I).

O método das matrizes pode ser entendido a partir do circuito equivalente para um vão K, como apresentado na figura 3.1.

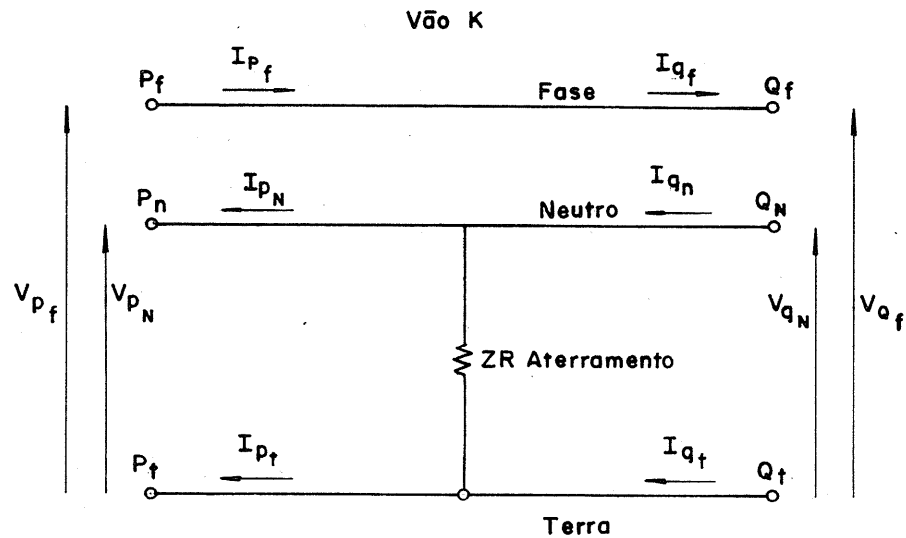


Figura 3-1

A figura 3.1 esboça apenas os condutores fase e neutro, devendo-se lembrar que estes têm impedâncias próprias e mútuas e, modelou-se a terra como um condutor.

Sebo escreve uma matriz de transferência onde as variáveis do ponto P dependem apenas, das do ponto Q.

$$\begin{array}{l} \vdots V_{qf} \vdots \\ \vdots V_{qn} \vdots \\ \vdots I_{qf} \vdots \\ \vdots I_{qn} \vdots \end{array} = \begin{array}{l} \vdots \\ \text{Matriz de} \\ \text{Transferência} \\ \vdots \end{array} \begin{array}{l} \vdots V_{pf} \vdots \\ \vdots V_{pn} \vdots \\ \vdots I_{pf} \vdots \\ \vdots I_{pn} \vdots \end{array}$$

Para a determinação da matriz de transferência, as seguintes soluções de contorno são observadas:

$$I_{qf} = I_{pf}$$

$$I_{qf} = I_{qn} + I_{qt}$$

Observa-se que a matriz de transferência relaciona as variáveis (correntes e tensões) de entrada com as de saída. Multiplicando-se as matrizes de transferência, pode-se determinar uma matriz de transferência equivalente que relaciona as variáveis do primeiro vão com as do último. Condições de contorno peculiares a cada caso permitem determinar as variáveis relacionadas pela matriz de transferência. A partir da determinação das variáveis do último vão, pode-se determinar as variáveis dos vãos intermediários.

### 3.2 Método da estrela equivalente proposto por Sebo

Este método decompõe o circuito do vão em uma estrela, conforme a figura 3.2.

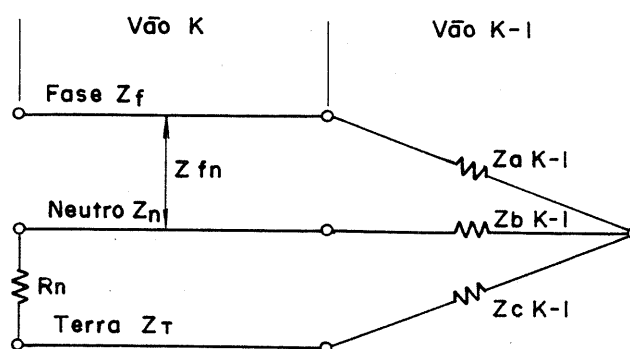


Figura3-2

Este método supõe que, no primeiro vão (K-1) exista uma condição de contorno que possibilita transformá-lo em uma

estrela equivalente e que algumas transformações permitam reduzir os vãos K e K-1 em uma nova estrela equivalente.

O primeiro passo é uma transformação de Kron (8), conforme a figura 3.3.

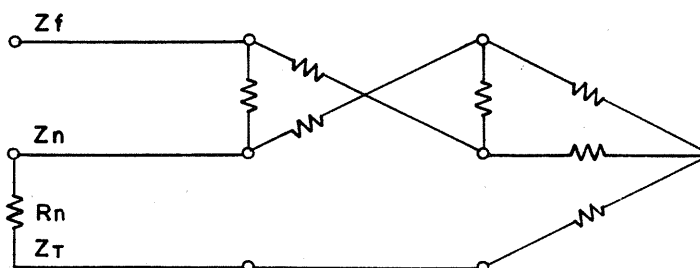


Figura3-3

O segundo passo é uma transformação triângulo-estrela, figura 3.4.

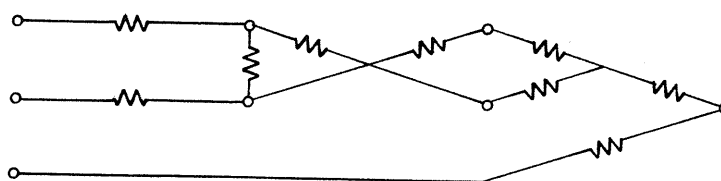


Figura3.4

O terceiro passo é somar as impedâncias em série, conforme a figura 3.5.

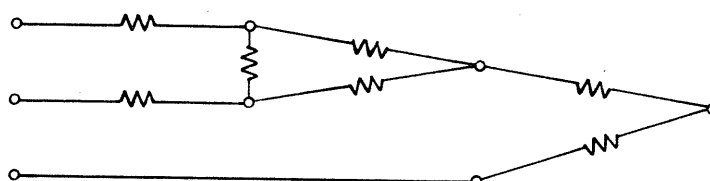


Figura3.5



O próximo passo é outra transformação triângulo-estrela, conforme a figura 3.6.

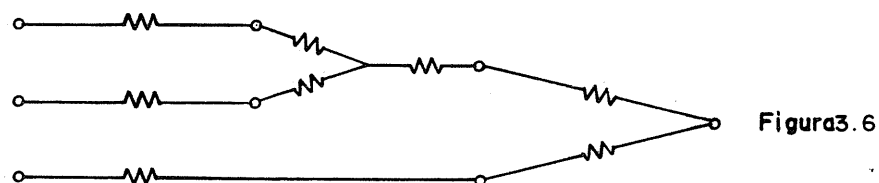


Figura 3.6

Somando-se as impedâncias em série, tem-se (figura 7.7).

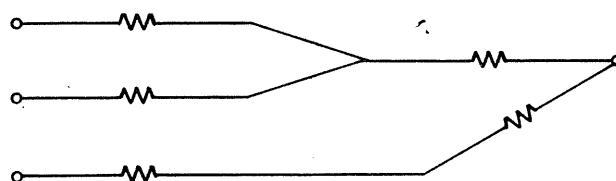


Figura 3.7

O circuito da figura 3.8 é novamente uma estrela equivalente.

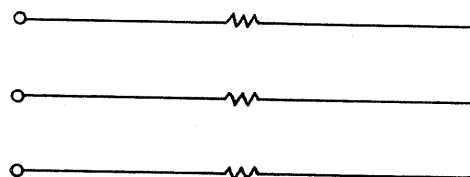


Figura 3.8

Estes passos são repetidos sucessivamente até reduzir todos os vãos a uma estrela equivalente.

### 3.3 Método desacoplado

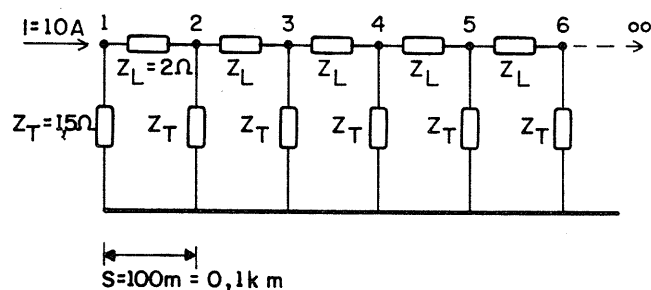
O método desacoplado parte de um circuito "Ladder" infinito para resolver circuitos finitos, permitindo o cálculo de tensões em qualquer nó de um circuito "Ladder" finito. O processo é generalizado para incluir terminações especiais, ligadas a um terminal do circuito.

O método é apresentado por Sobral (9) e esta dissertação dá apenas uma breve explanação do mesmo.

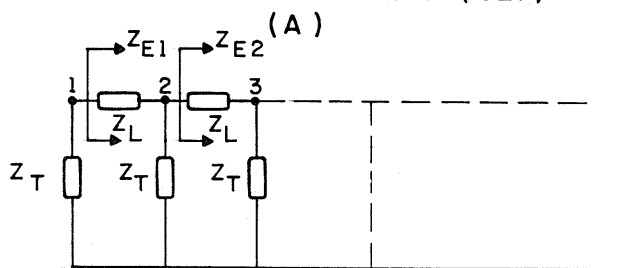
A seguir, apresenta-se um resumo do método, partindo-se de um circuito "Ladder" infinito e chegando-se a um "Ladder" finito sem a preocupação de aprofundamento no método, ou seja sem focar as terminações especiais.

### 3.3.1 Solução de um Circuito "Ladder" infinito (CLI)

A figura 3.9 (A) apresenta um circuito "Ladder", suposto com um número infinito de "pis", formados pela impedância longitudinal ( $Z_L$ ) e transversal ( $Z_T$ ).



CIRCUITO "LADDER" INFINITO (CLI)



IMPEDÂNCIAS TERMINAIS ( $Z_{E1}$ ) e ( $Z_{E2}$ )

(B)

Figura 3.9

Define-se uma impedância característica ( $Z_E$ ), vista à direita, a partir do nó  $n$ , como aquela que substitui todo o circuito ligado a partir do nó  $n$ .

Pode-se determinar  $Z_E$  a partir da impedância equivalente vista pelos nós 1 e 2.

$$\begin{aligned}
 Z_{E_1} &= Z_L + (Z_T // Z_{E_2}) \\
 Z_{E_1} &= Z_{E_2} = Z_E \\
 \text{LOGO, } Z_E &= \frac{Z_L}{2} + \sqrt{\frac{Z_L^2}{4} + Z_L Z_T}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

### 3.3.2 Tensão e corrente em qualquer nó de um circuito "Ladder" infinito

As fórmulas apresentadas ao longo deste trabalho foram deduzidas a partir do conceito de impedância terminal ( $Z_E$ ) como segue:

- a) Supõe-se uma fonte de corrente aplicada ao nó mais a esquerda da figura 3.9 (A). A corrente que chega em cada nó vê as impedâncias  $Z_L$  e  $Z_T$  em paralelo. Portanto a corrente  $I_1$  que chega ao nó 1 será dividida em  $I_2$  circulando por  $Z_E$  e  $i_2$  por  $Z_T$ .
- b) Como as impedâncias  $Z_T$  e  $Z_E$  são as mesmas em todo o circuito, pode-se definir o fator  $K$ , com o auxílio da figura 3.9 (B).

$$K = Z_T / (Z_T + Z_E) \tag{3.2}$$

c) O procedimento descrito na letra "a" pode ser generalizado, levando às seguintes fórmulas:

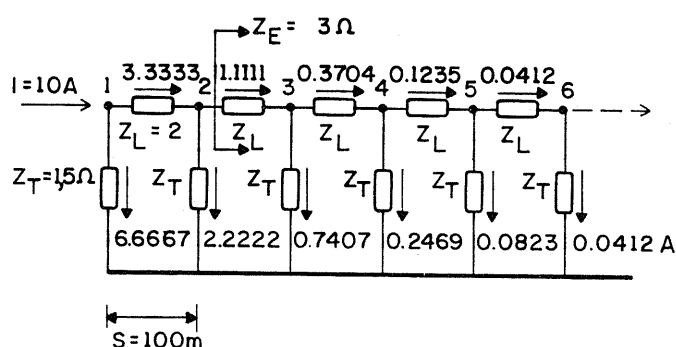
$$I_n = I \cdot K^n \quad (3.3)$$

$$i_n = I \cdot (1-K) \cdot K^n \quad (3.4)$$

$$V_n = i_n \cdot Z_T \quad (3.5)$$

### 3.3.3 Solução de um circuito "Ladder" finito sem terminações especiais

A figura 3.10 apresenta um circuito "Ladder" finito excitado por uma fonte de corrente aplicada ao nó 1.



$$V_1 = 10.00V \quad V_2 = 3.3V \quad V_3 = 1.1V \quad V_4 = 0.37V \quad V_5 = 0.12V$$

DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE AO LONGO DE UM (CLI)

Figura 3.10

Se o "Ladder" fosse infinito, a corrente chegando ao nó 5 através da seção (4-5) seria  $IK_4$ . A corrente circulando na seção seguinte (5-6) seria  $IK_5$ . Entretanto, o restante do CLI visto pelo nó 5 para a direita é fictício. Interrompe-se o CLI exatamente à direita do nó 5 e injeta-se daí para esquerda a corrente  $IK_5$ , satisfazendo duas condições:

- O circuito tem que ser interrompido no nó 5;
- As correntes no nó 5 devem ser nulas.

Injeta-se a corrente IK5 no nó 5, isto pode ser realizado supondo-se um CLI estendendo-se para o lado esquerdo e excitado por uma fonte de corrente IK5.

O circuito estendido para a esquerda tem de ser interrompido no nó 0 A corrente no nó 0 é injetada para a direita, e assim por diante.

O método descrito acima baseia-se no teorema da compensação. Este método pode ser expandido para uma terminação qualquer. E de se observar que a solução do circuito "Ladder" não precisa ser feita iterativamente necessariamente.

#### 3.4 Método proposto

O circuito que modela a indução é apresentando novamente na figura 3.11, sendo que são definidas novas grandezas e as chaves de interligação foram eliminadas no intuito de facilitar o entendimento do algoritmo proposto.

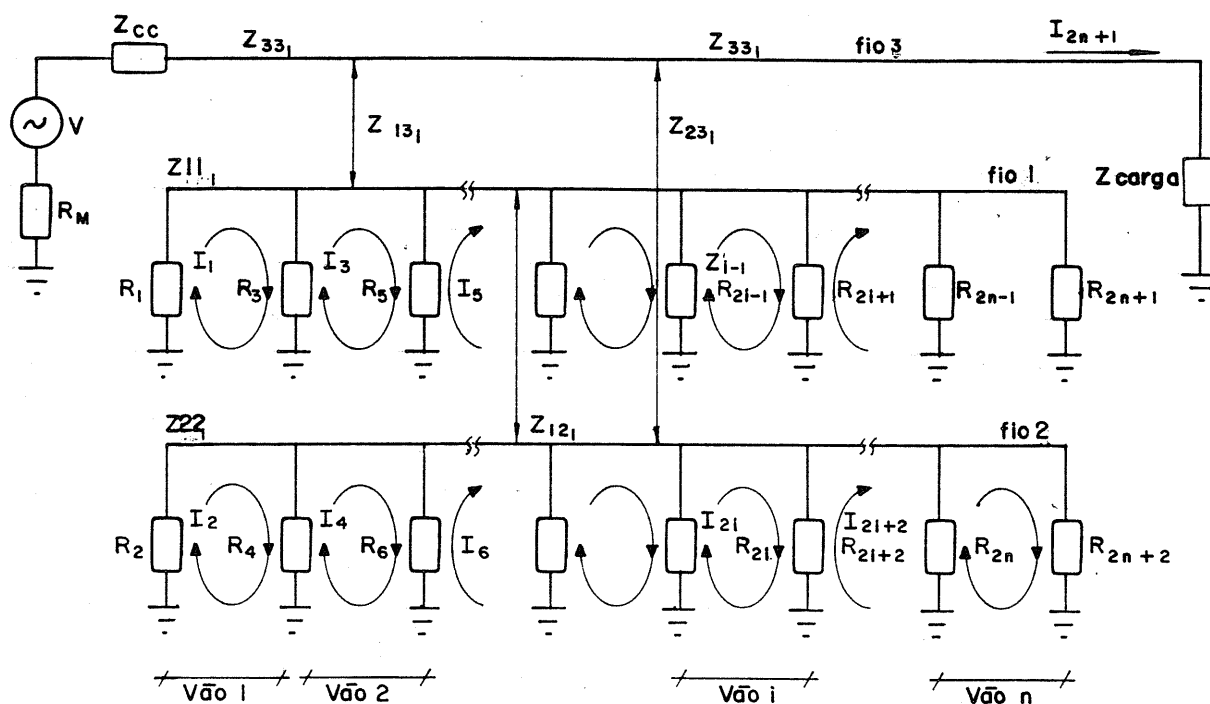


Figura3-II

Onde:

$R_m$  - Resistência de aterramento da malha da Subestação de energia

$Z_{11}$  - Impedância própria do fio 1, no vão 1

$Z_{22}$  - Impedância própria do fio 2, no vão 1

$Z_{33}$  - Impedância própria do fio 3, no vão 1

$Z_{13}$  - Impedância mútua entre os fios 1 e 3, no vão 1

$Z_{23}$  - Impedância mútua entre os fios 2 e 3, no vão 1

$Z_{12}$  - Impedância mútua entre os fios 1 e 2, no vão 1

$Z_{cc}$  - Impedância equivalente da fonte

$Z_{carga}$  - Impedância equivalente da carga

$R_{1,3,\dots,2n-1}$  - Resistências de aterramento do fio 1

$R_{2,4,\dots,2n}$  - Resistências de aterramento do fio 2

As impedâncias complexas próprias e mútuas são de forma  $Z_{ij}^k$ , onde os índices  $i$  e  $j$  denotam os fios e o índice  $k$ , o vão. Estas impedâncias são calculadas pelas fórmulas de Carson (apêndice I). Usando a primeira lei de Kirchoff, pode-se escrever as equações (3.6) de correntes de malha.

$$\begin{aligned}
 I_1 & \left( R_1 + R_3 + Z_{11} \right) + I_2 \left( Z_{12} \right) + I_3 \left( -R_3 \right) + I_{2n+1} \left( Z_{13} \right) & = 0 \\
 I_1 & \left( Z_{12} \right) + I_2 \left( R_2 + R_4 + Z_{22} \right) + I_4 \left( -R_4 \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23} \right) & = 0 \\
 I_1 & \left( -R_3 \right) + I_3 \left( R_3 + R_6 + Z_{13} \right) + I_4 \left( Z_{12} \right) + I_5 \left( -R_5 \right) + I_{2n+1} \left( Z_{13} \right) & = 0 \\
 I_2 & \left( -R_4 \right) + I_3 \left( Z_{12} \right) + I_4 \left( R_4 + R_6 + Z_{22} \right) + I_6 \left( -R_6 \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23} \right) & = 0 \\
 & \dots & \\
 I_{2l-4} & \left( -R_{2l-2} \right) + I_{2l-3} \left( Z_{12l-1} \right) + I_{2l-2} \left( R_{2l-4} + R_{2l} + Z_{22l-1} \right) + I_{2l-2} \left( -R_{2l} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23l-1} \right) & = 0 \\
 I_{2l-3} & \left( -R_{2l-1} \right) + I_{2l-1} \left( R_{2l} + R_{2l+1} + Z_{1l-1} \right) + I_{2l-1} \left( Z_{12l} \right) + I_{2l+1} \left( -R_{2l+1} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{13l} \right) & = 0 \\
 I_{2l-2} & \left( -R_{2l} \right) + I_{2l-1} \left( Z_{12l} \right) + I_{2l} \left( R_{2l} + R_{2l+2} + Z_{1l} \right) + I_{2l+2} \left( -R_{2l+2} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23l-1} \right) & = 0 \\
 & \dots & \\
 I_{2n-5} & \left( -R_{2n-4} \right) + I_{2n-3} \left( Z_{12n-2} \right) + I_{2n-4} \left( R_{2n-4} + R_{2n-2} + Z_{22n-2} \right) + I_{2n-2} \left( -R_{2n-2} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{13n-2} \right) & = 0 \\
 I_{2n-3} & \left( -R_{2n-3} \right) + I_{2n-3} \left( R_{2n-3} + R_{2n-1} + Z_{1l-1} \right) + I_{2n-2} \left( Z_{12n-1} \right) + I_{2n-1} \left( -R_{2n-1} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23n-1} \right) & = 0 \\
 I_{2n-2} & \left( -R_{2n-2} \right) + I_{2n-3} \left( Z_{12n-1} \right) + I_{2n-2} \left( R_{2n-2} + R_{2n} + Z_{22n-1} \right) + I_{2n-2} \left( -R_{2n} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23n-1} \right) & = 0 \\
 I_{2n-1} & \left( -R_{2n-1} \right) + I_{2n-1} \left( R_{2n-1} + Z_{1l} \right) + I_{2n} \left( Z_{12n} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{13n} \right) & = 0 \\
 I_{2n-2} & \left( -R_{2n} \right) + I_{2n-1} \left( Z_{12n} \right) + I_{2n} \left( R_{2n} + Z_{22n} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{23n} \right) & = 0 \\
 I_1 & \left( Z_{13} \right) + I_2 \left( Z_{23} \right) + I_3 \left( Z_{13} \right) + I_4 \left( Z_{23} \right) + \dots + I_{2n-2} \left( Z_{23} \right) + \dots + I_{2n-1} \left( Z_{13} \right) + I_{2n} \left( Z_{23} \right) + I_{2n+1} \left( Z_{13} \right) & = V \\
 \text{(*)} & \sum_{i=1}^n Z_{33i} + Z_{cc} + R_m + Z_{carga} & 
 \end{aligned}$$



As equações (3.6) de correntes de malha podem ser escritas de forma matricial  $[Z] [I] = [V]$ .

Observa-se que a matriz  $[Z]$  é complexa, simétrica e esparsa.

Para a determinação das correntes de malha  $[I]$  existem vários métodos:

- a) Inversão da matriz  $[Z]$  e multiplicação pelo vetor  $[V]$  ;
- b) Métodos iterativos;
- c) Eliminação de Gauss e substituição regressiva.

A inversão da matriz  $[Z]$  gera uma matriz cheia, de dimensão aproximadamente igual a duas vezes o número de vãos, exigindo muito espaço de memória em computador, além de imprecisões devido à propagação de erros de arredondamento, pois há cálculos em número excessivo. Os métodos iterativos apresentam problemas de convergência.



### 3.5 Análise dos métodos para a resolução do circuito

O método de matrizes proposto por Sebo foi descartado com base nas dificuldades encontradas por Gonçalves (15). De acordo com Gonçalves existiam erros de ordem numérica na implementação do método em computador. Este usou um computador de grande porte e mesmo com este, apareceram problemas de propagação de erros. Além de que o circuito da figura 2.11 apresenta três mútuas impedâncias, gerando uma matriz de transferência de maior dimensão.

O método da estrela equivalente, proposto por Sebo também foi descartado. Este método, para circuitos, com mais de três caminhos para correntes (2 condutores multi-aterrados), torna-se de difícil resolução. É importante lembrar que o circuito da figura 2.11, apresenta dois cabos multi-aterrados.

O método desacoplado é recente e parece muito promissor. Ele não foi aplicado nesta dissertação, pois quando do desenvolvimento da mesma, o método desacoplado não havia sido suficientemente divulgado. O método apresentado anteriormente resolve o circuito de maneira satisfatória e, constitui-se em contribuição original desta dissertação, na resolução do circuito da figura 2.1.1.



Sucessivas operações lineares, levam a:

$$\begin{array}{cccc|cccc} | & z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} & | & i_1 & | & 0 & | \\ | & & & & & | & i_2 & | & 0 & | \\ | & 0 & z_{22}' & z_{23}' & z_{24}' & | & i_3 & | & 0 & | \\ | & & & & & | & i_4 & | & v & | \\ | & 0 & 0 & z_{33}' & z_{34}' & | & & | & & | \\ | & 0 & 0 & 0 & z_{44}' & | & & | & & | \end{array} \quad x =$$

### 3.6.1 Determinação das Correntes

A corrente  $i_4$  pode ser determinada da seguinte forma:

$$z_{44}' \cdot i_4 = v \Rightarrow i_4 = v / z_{44}' \quad (3.7)$$

A partir de  $i_4$ , pode-se determinar  $i_3$ , a partir da equação (3.8) abaixo, chegar a equação (3.9):

$$z_{33}' \cdot i_3 + z_{34}' \cdot i_4 = 0 \quad (3.8)$$

$$i_3 = - z_{34}' \cdot i_4 / z_{33}' \quad (3.9)$$

A partir de  $i_3$  e  $i_4$ , determina-se  $i_2$  e, de  $i_2$ ,  $i_3$  e  $i_4$ , acha-se  $i_1$ , logo todas as incógnitas.

A substituição de Gauss torna-se simples para o sistema em questão porque apenas o último elemento do vetor é diferente de zero. Operações efetuadas entre linhas, objetivando a triangulação inferior da matriz  $[Z]$  não modificam o vetor  $[V]$ .

### 3.7 Características da equação matricial a ser resolvida

A escolha proposital das correntes levou a um sistema matricial de equações  $[Z] [I] = [V]$ , onde a matriz  $[Z]$  é

simétrica, esparsa e complexa.

Estas características facilitam a resolução da equação devido a dois motivos:

- a) Necessidade de pouco espaço de memória para o armazenamento da matriz;
- b) Poucas operações para a resolução do sistema e conseqüentemente pouco erro de arredondamento e truncamento, além de diminuir o tempo de processamento.

Existem várias formas de armazenamento da matriz [Z]. Escolheu-se o armazenamento em 4 submatrizes [L], [C], [M] e [P].

A subdivisão nestas submatrizes, permite a expansão do algoritmo de resolução para maior número de cabos multiterrados, bem como para um maior número de fios indutores.

A subdivisão da matriz  $[Z]$  pode ser visualizada na figura 3.12. A matriz  $[Z]$  é de dimensões  $(2n+1) \times (2n+1)$ , onde  $n$  é o número de vãos, e existe apenas um fio indutor.

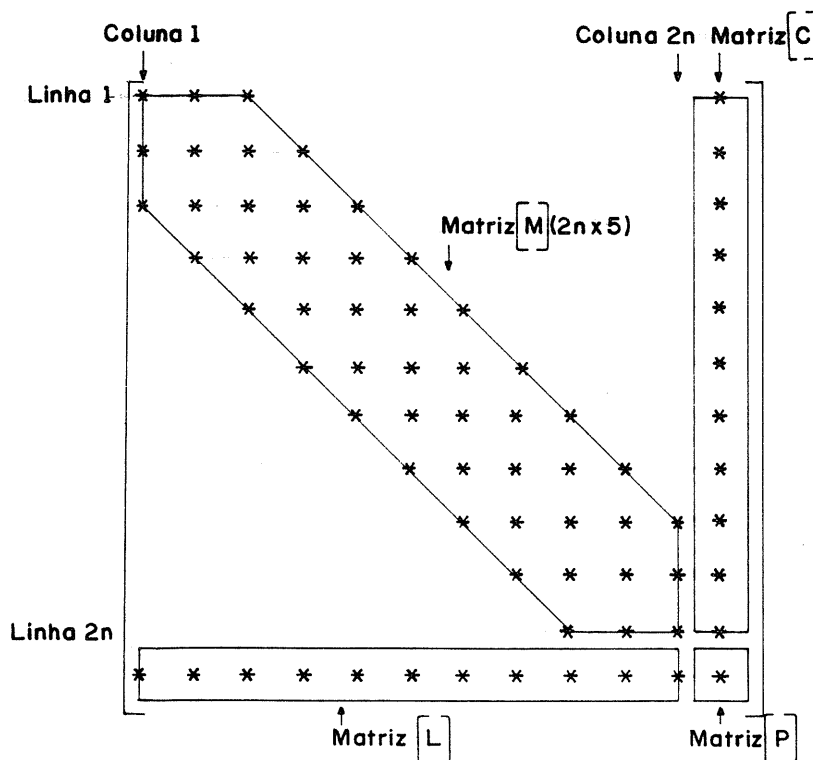


Figura 3.12

As matrizes  $[L]$  e  $[C]$  são de dimensões  $(1 \times 2n)$  e  $(2n \times 1)$ , respectivamente, e uma é a transposta da outra. Estas matrizes armazenam as impedâncias mútuas, por vão entre o fio indutor e os multiaterrados. É de se observar que o aumento do número de fios indutores demanda o aumento das matrizes  $[L]$ ,  $[C]$  e  $[P]$  de uma dimensão para quantas forem o número de fios indutores. Por exemplo, para dois fios indutores tem-se o vetor  $[L]$  de dimensões  $(2 \times 2n)$ ,  $[C]$  de dimensões  $(2n \times 2)$  e  $[P]$ ,  $(2 \times 2)$ .

A matriz [M] armazena apenas as relações entre os fios multiaterrados. Esta matriz tem a dimensão  $(2n \times 5)$ , e está representada na figura 3.13.

Linha 1	*	*	*	0	0
	*	*	*	*	0
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	*
	*	*	*	*	0
Linha 2n	*	*	*	0	0

Matriz [M]

Figura 3.13

A matriz [M], para o sistema de dois fios multiaterrados, tem 5 colunas, se se desejar aumentar o número de fios multiaterrados, a dimensão de matriz cresce de forma  $2i + 1$ , onde o índice  $i$  representa o número de fios multiaterrados. O aumento do número de fios indutores não modifica a matriz [M].

A matriz [P] armazena as relações entre os fios indutores. Para o caso de 1 fio indutor esta matriz é de dimensão  $(1 \times 1)$ , e esta dimensão cresce proporcionalmente ao número de fios indutores.



### 3.8 Características da eliminação de Gauss para o sistema em questão

Como posto anteriormente, a eliminação de Gauss, consiste em eliminar (zerar) todos os elementos abaixo de diagonal principal. Como se pode observar através de figura 3.12, existem apenas três elementos abaixo de diagonal principal, exceção feita aos elementos da linha  $2n$  e  $2n-1$ .

A eliminação de Gauss será detalhada passo a passo de forma a esclarecer o método de resolução. Deve-se observar que a matriz  $[Z]$  da figura 3.12 está armazenada por 4 submatrizes  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[L]$  e  $[P]$ .

Todos os passos da eliminação de Gauss serão explicados através do esquema da figura 3.14.

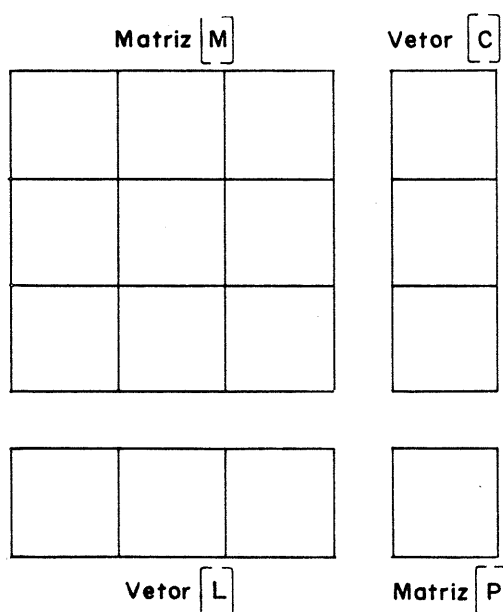


Figura 3.14

Passo 1 : Eliminação dos elementos abaixo do elemento 1,1 da matriz [Z].

M11	M12	M13	C1
M21	M22	M23	C2
M31	M32	M33	C3

L1	L2	L3	P
----	----	----	---

Operações lineares da linha 1 sobre as linhas 2, 3 e sobre o vetor [L], são feitas de forma a zerar os elementos abaixo de M11, o que resulta em:

M11	M12	M13	C1
0	M22'	M23'	C2'
0	M32'	M33'	C3'

0	L2'	L3'	P'
---	-----	-----	----

A apóstrofe significa que o elemento foi modificado com as operações lineares.

Passo 2: Eliminação dos elementos abaixo do elemento 2,2 da matriz [Z], onde alguns elementos já modificados no passo 1 e estão representados sem apóstrofe.

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M22</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M23</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M24</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M32</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M33</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M34</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M41</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M42</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M43</td></tr> </table>	M22	M23	M24	M32	M33	M34	M41	M42	M43	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">C2</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">C3</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">C4</td></tr> </table>	C2	C3	C4
M22	M23	M24											
M32	M33	M34											
M41	M42	M43											
C2													
C3													
C4													
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">L2</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">L3</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">L4</td></tr> </table>	L2	L3	L4	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">P</td></tr> </table>	P								
L2	L3	L4											
P													

As operações lineares são feitas, também com o objetivo de zerar os elementos abaixo de M22, mas é de se observar que estes elementos já foram modificados no passo anterior. As operações lineares resultarão em:

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M22</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M23</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M24</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M33'</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M34'</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M42'</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">M43'</td></tr> </table>	M22	M23	M24	0	M33'	M34'	0	M42'	M43'	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">C2</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">C3'</td></tr> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">C4'</td></tr> </table>	C2	C3'	C4'
M22	M23	M24											
0	M33'	M34'											
0	M42'	M43'											
C2													
C3'													
C4'													
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">0</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">L3'</td><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">L4'</td></tr> </table>	0	L3'	L4'	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border: 1px dashed black; padding: 2px;">P'</td></tr> </table>	P'								
0	L3'	L4'											
P'													

Passo 3: A eliminação dos elementos abaixo da diagonal principal de 3 a  $2n-2$  é típica e será demonstrada abaixo por índices 'i'.

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline M_{i,3} & M_{i,4} & M_{i,5} \\ \hline M_{i+1,2} & M_{i+1,3} & M_{i+1,4} \\ \hline M_{i+2,1} & M_{i+2,2} & M_{i+2,3} \\ \hline \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|c|} \hline C_i \\ \hline C_{i+1} \\ \hline C_{i+2} \\ \hline \end{array}$$
  

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline L_i & L_{i+1} & L_{i+2} \\ \hline \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|c|} \hline P \\ \hline \end{array}$$

Após as operações lineares tem-se:

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline M_{i,3} & M_{i,4} & M_{i,5} \\ \hline 0 & M_{i+1,3'} & M_{i+1,4'} \\ \hline 0 & M_{i+2,2'} & M_{i+2,3'} \\ \hline \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|c|} \hline C_i \\ \hline C_{i+1}' \\ \hline C_{i+2}' \\ \hline \end{array}$$
  

$$\begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & L_{i+1}' & L_{i+2}' \\ \hline \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|c|} \hline P' \\ \hline \end{array}$$

Passo 4: Eliminação dos elementos abaixo do elemento  $2n,1 \times 2n,1$  da matriz [Z].

$$\begin{array}{|c|c|} \hline M_{2n-1,3} & M_{2n-1,4} \\ \hline M_{2n,2} & M_{2n,3} \\ \hline \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|c|} \hline C_{2n-1} \\ \hline C_{2n} \\ \hline \end{array}$$
  

$$\begin{array}{|c|c|} \hline L_{2n-1} & L_{2n} \\ \hline \end{array}
 \quad
 \begin{array}{|c|} \hline P \\ \hline \end{array}$$

Após as operações lineares, chega-se a:

$$\begin{array}{cc|cc}
 \hline
 M_{2n-1,3} & M_{2n-1,4} & C_{2n-1} & \\
 \hline
 0 & M_{2n,3}' & C_{2n}' & \\
 \hline
 \\
 \\
 \hline
 0 & L_{2n}' & P' & \\
 \hline
 \end{array}$$

Passo 5 : Eliminação dos elementos abaixo do elemento  $2n, 2n$  da matriz [Z].

$$\begin{array}{cc|cc}
 \hline
 M_{2n,3} & & C_{2n} & \\
 \hline
 \\
 \\
 \hline
 L_{2n} & & P & \\
 \hline
 \end{array}$$

Após as operações lineares tem-se:

$$\begin{array}{cc|cc}
 \hline
 M_{2n,3} & & C_{2n} & \\
 \hline
 \\
 \\
 \hline
 0 & & P' & \\
 \hline
 \end{array}$$

Após os cinco passos iniciais tem-se que:

- a) O vetor [L] tem todos os elementos iguais a zero;
- b) O vetor [C] foi modificado;
- c) A matriz [P] também foi modificada;
- d) A matriz [M] tem o seguinte esboço.

```

: * * * 0 0 :
: 0 * * * 0 :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * * :
: 0 0 * * 0 :
: 0 0 * 0 0 :

```

Onde: \* - elemento diferente de zero  
 0 - elemento igual a zero

#### Passo 6 - Substituição Regressiva

Observa-se que após a eliminação de Gauss a linha  $2n+1$  da matriz  $[Z]$  só tem um elemento diferente de zero, no caso, o elemento da submatriz  $[P]$ , logo pode-se determinar a corrente  $I_{2n+1}$ .

$$P \cdot I_{2n+1} = V \quad (3.10)$$

$$\Rightarrow I_{2n+1} = V/P \quad (3.11)$$

#### Passo 7 - Determinação da corrente $I_{2n}$

A linha  $2n$  da matriz  $[Z]$  tem dois elementos diferentes de zero, um elemento pertencente a submatriz  $[M]$  e o outro, a submatriz  $[C]$ . Pode-se então escrever a seguinte equação:

$$M_{2n,3} \cdot I_{2n} + C_{2n} \cdot I_{2n+1} = 0$$

$$\text{Logo } I_{2n} = \frac{-C_{2n} \cdot I_{2n+1}}{M_{2n,3}} \quad (3.12)$$

Passo 8 - Determinação da corrente  $I_{2n-1}$

A linha  $2n-1$  da matriz  $[Z]$  tem 3 elementos diferentes de zero, logo pode-se escrever a seguinte equação linear.

$$M_{2n-1,3} \cdot I_{2n-1} + M_{2n-1,4} \cdot I_{2n} + C_{2n-1} \cdot I_{2n+1} = 0$$

Como nos passos 6 e 7 as correntes  $I_{2n}$  e  $I_{2n+1}$  foram determinadas, a corrente  $I_{2n-1}$  será:

$$I_{2n-1} = \frac{-(M_{2n-1,4} \cdot I_{2n} + C_{2n-1} \cdot I_{2n+1})}{M_{2n-1,3}} \quad (3.13)$$

Passo 9 - Determinação das correntes  $I_{2n-2}$  a  $I_4$

As mesmas equações podem ser aplicadas recursivamente para a determinação das correntes  $I_{2n-2}$  a  $I_3$ .

As equações devem ser aplicadas regressivamente, pois a corrente de menor índice depende das de maior índice.

A seguir são escritas as equações por índices.

$$M_{i,3} \cdot I_i + M_{i,4} \cdot I_{i+1} + M_{i,5} \cdot I_{i+2} + C_i \cdot I_{i+3} = 0$$

As correntes  $I_{i+1}$ ,  $I_{i+2}$ ,  $I_{i+3}$  já foram determinadas pelos passos anteriores, logo:

$$I_i = \frac{-(M_{i,4} \cdot I_{i+1} + M_{i,5} \cdot I_{i+2} + C_i \cdot I_{i+3})}{M_{i,3}} \quad (3.14)$$

Passo 10 - Determinação da corrente  $I_2$

A corrente  $I_2$  depende das correntes  $I_3$ ,  $I_4$  e  $I_5$ , já determinadas e será:

$$I_2 = \frac{-(M_{2,3} \cdot I_3 + M_{2,4} \cdot I_4 + C_2 \cdot I_5)}{M_{2,2}} \quad (3.15)$$

Passo 11 - Determinação da corrente  $I_1$

A corrente  $I_1$  pode ser determinada em função de  $I_2$ ,  $I_3$  e  $I_4$  na equação:

$$I_1 = \frac{-(M_{1,2} \cdot I_2 + M_{1,3} \cdot I_3 + C_1 \cdot I_4)}{M_{1,1}} \quad (3.16)$$

Após os 11 passos tem-se a resolução do sistema, com a determinação do vetor  $[I]$ .

E de se observar que após a eliminação tem-se o vetor  $[L]$  com todos os elementos iguais a zero e este é de mesma dimensão do vetor  $[I]$ , podendo-se então utilizar o vetor  $[L]$  como se fosse  $[I]$ . Esta prática permite o aumento do número de nós, pois economiza espaço de memória, quando da implantação do algoritmo em um computador.



## Capítulo 4 - PROGRAMA COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO

O método de cálculo descrito no capítulo anterior foi implementado em um micro-computador, compatível com o "IBM-PC". Escolheu-se a linguagem Pascal para a implementação devido à sua versatilidade.

O programa possui entrada de dados de alto nível, através de "Menus", além de ter banco de dados típicos do sistema de energia elétrica e telefonia.

### 4.1 Dados do sistema de energia elétrica

O programa implementado está dirigido para linhas de distribuição, e os principais dados de entrada são:

- a) Altura e Bitola dos cabos fase e neutro;
- b) Resistência da malha de subestação;
- c) Resistência de aterramento (valor médio) do cabo neutro;
- d) Distância média entre pontos de aterramento;
- e) Distância da subestação até o uso-mútuo de posteação com a rede telefônica;
- f) Resistividade do solo;
- g) Tensão (fase-fase) da linha de energia;
- h) Potência de curto-circuito fase-terra da subestação;
- i) Corrente nominal da linha de energia;
- j) Tipo de ligação dos transformadores ao longo da linha;
- l) Composição harmônica, em percentual da corrente de

frequência fundamental;

- k) Se o condutor neutro da linha está ligado à malha de aterramento da subestação.

O programa indica em cada entrada, os valores usuais de cada informação pedida, de forma a auxiliar ao usuário.

#### 4.2 Dados do sistema telefônico

Os principais dados de entrada para o sistema telefônico são:

- a) Se a linha é do tipo tronco ou assinante;
- b) Altura do cabo telefônico;
- c) Tipo da blindagem (alumínio ou chumbo) e número de pares do cabo telefônico;
- d) Bitola dos fios dos pares;
- e) Desbalanceamento resistivo percentual dos fios do par;
- f) Desbalanceamento capacitivo percentual dos fios para a blindagem do cabo;
- g) Distância entre pontos de aterramento e valor da resistência destes ao longo da linha telefônica, além do valor da resistência da malha da central telefônica.

#### 4.3 Descrição sucinta do programa

O programa, a partir das configurações dos sistemas de energia e telefonia, e de outros dados auxiliares, calcula as impedâncias dos cabos através das fórmulas de Carson (apêndice I).

Após o cálculo das impedâncias, o programa gera o circuito da figura 3.11, criando aterramentos fictícios de forma a se ter aterramentos coincidentes entre fios multiaterrados. Após a montagem da matriz esparsa, o programa resolve o circuito da figura 3.11, de acordo com a seqüência de cálculos descrito no capítulo 3, determinando-se assim as tensões longitudinais.

A partir das tensões longitudinais, um algoritmo simples, com as mesmas hipóteses e considerações do item 2.4.3, permite determinar as tensões transversais em função dos desbalanceamentos capacitivo e resistivo.

O programa executa os passos acima para cada componente harmônica (frequência), armazenando os dados relativos a cada uma delas.

#### 4.4 Dados de saída

O programa fornece os seguintes resultados:

- a) Tensões longitudinais ao longo da linha telefônica, devido ao curto-circuito ou à indução proveniente de correntes de regime permanente;
- b) Tensões transversais ao final de linha, discriminadas em frequência, com e sem ponderação psufométrica, em volts e decibéis.

Os dados de saída podem ser fornecidos na forma de planilhas ou de gráficos.

## Capítulo 5 - SIMULAÇÕES

Este capítulo apresenta uma simples aplicação do programa computacional a um caso hipotético.

### 5.1 Descrição do caso hipotético

Seja um pequeno condomínio residencial alimentado por uma linha aérea de distribuição (LD) monofásica, de 7967V nominais. Esta rede começa em uma subestação e tem 5km de comprimento.

Montada em mesma posteação (uso-mútuo), existe uma rede telefônica (RT) de mesmo comprimento, que atende aos moradores do condomínio residencial.

Próximo à linha monofásica (LD) em uso-mútuo com a rede telefônica, existe uma linha de transmissão (LT) de tensão nominal de 138 kV. A linha de transmissão tem 60km de comprimento, sendo que o paralelismo ocorre a 30km da subestação de onde parte a LT. Após os 5km de paralelismo, a LT tem mais 25 Km até uma fábrica.

Pode-se ver o esboço da situação hipotética na figura

5.1.

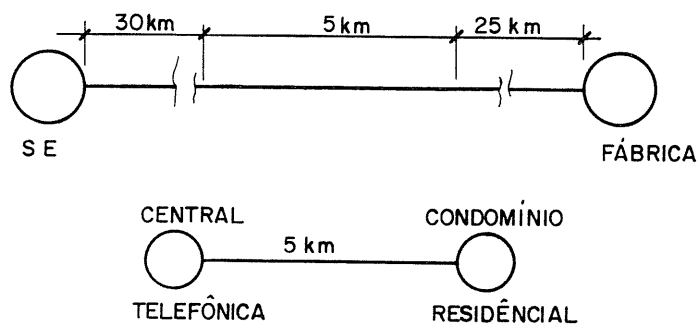
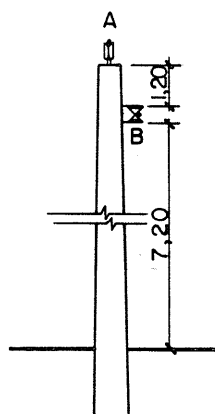


Figura 5.1

#### 5.1.1 Linha de distribuição (LD)

Considerou-se que a linha de distribuição tenha a configuração apresentada na figura 5.2.



LINHA RURAL

ONDE: A e B SÃO CABOS ACSR, BITOLA 4 AWG

Figura 5.2

O cabo neutro da linha de distribuição é multi-aterrado de 400 em 400m, sendo que a resistência média de cada aterramento é de 400.0 ohms.

No condomínio existem 3 transformadores monofásicos de 50kVA. Estes transformadores demandam a circulação de 18,75A na LD.

Foi considerado que esta corrente possui distribuição harmônica, devido à saturação magnética do aço dos transformadores, dada pela tabela 5.1.

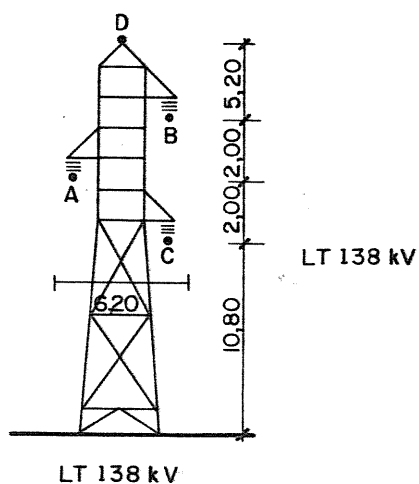
Harmônica	% Fundamental
3 ( 180 Hz)	6.00
5 ( 300 Hz)	3.00
7 ( 420 Hz)	0.60
9 ( 540 Hz)	0.25
15 ( 900 Hz)	0.40
23 (1500 Hz)	0.25

Tabela 5.1

No condomínio, todas as carcaças dos transformadores são aterradas e vinculadas ao cabo neutro. Em cada consumidor, o medidor de energia é aterrado. Estimou-se uma resistência de 7 ohms como a equivalente de todos estes aterramentos no condomínio.

### 5.1.2 Linha de transmissão (LT)

A linha de transmissão tem a configuração apresentada pela figura 5.3.



LT 138 kV

ONDE : A, B e C - ACSR 336,4 MCM - LINNET  
D - HS 5/16"

Figura 5.3

O cabo pára-raios é eletricamente ligado à estrutura de cada torre e esta é aterrada. Considera-se o valor de 25 ohms de aterramento como o valor médio para o aterramento da estrutura de cada torre (Resistência de pé-de-torre).

As torres têm espaçamento médio de 250 metros.

A subestação de onde parte a LT tem 3000MVA de potência de curto-circuito fase-terra e sua malha de aterramento tem 1,0 ohm de resistência.

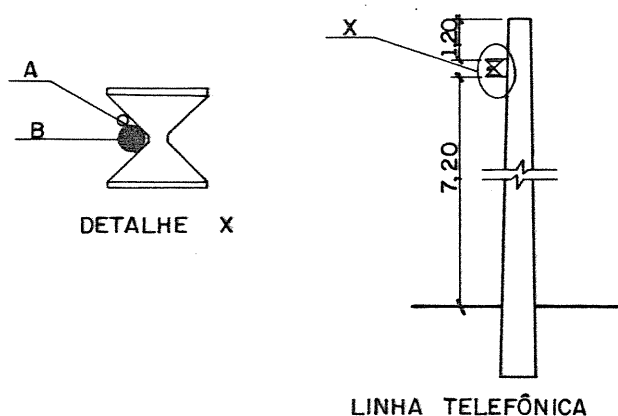
O cabo pára-raios é interligado á malha de aterramento da SE.

### 5.1.3 Rede telefônica (RT)

A rede telefônica está montada em uso-mútuo de posteação com a LD, a 5,40m de solo, conforme a figura 5.4.

O cabo telefônico é do tipo CTP-APL de 50 pares, os fios do par têm diâmetro de 0,51mm. Este cabo é suportado por uma cordoalha, denominada cabo mensageiro.

O cabo mensageiro está eletricamente vinculado á blindagem (alumínio) do cabo telefônico.



ONDE: A - CABO DE AÇO ZINCADO 3/16"  
 B - CABO TELEFÔNICO - CTP-APL - 50/50  
 Figura 5.4

Considerou-se que o cabo telefônico devido a problemas de fabricação, tenha desbalanceamento resistivo entre os fios do par de 7%, e capacitivo entre blindagem e par de 3%. Estes valores são os máximos admitidos pelos fabricantes.



A central telefônica de onde se inicia a RT tem uma malha de aterramento de 1,0 ohm.

A blindagem do cabo telefônico é multiaterrada, sendo que o valor da resistência destes aterramentos é um dos parâmetros das simulações.

Uma resistência própria de 220 ohms foi suposta para os enrolamentos da bobina de alimentação

Tomou-se a resistividade do solo igual a 500,0 ohms.m, para efeito de cálculo das impedâncias através das fórmulas simplificadas de Carson, apresentadas no apêndice I.

## 5.2. Simulações

Foram simuladas duas possíveis situações reais:

- a) Um curto-circuito fase-terra na LT;
- b) Circulação de corrente de regime na LD.

### 5.2.1. Curto-circuito fase-terra na LT

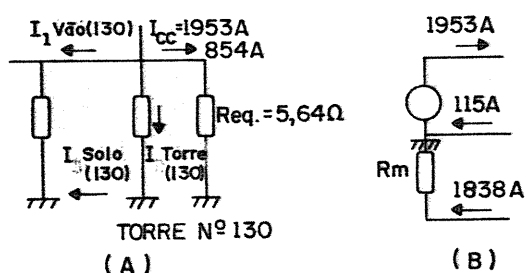
Simulou-se um curto-circuito fase-terra na LT à 2,5 km após o povoado (a 37,5 km da subestação) ou seja na torre de número 130.

Escolheu-se esta distância porque a maior parte da

corrente de retorno do curto-circuito, no trecho em paralelismo, circula pela terra. O efeito blindante da corrente retornando através do cabo pára-raios, nesta hipótese é mínimo, o que aumenta a indução.

Os multiaterramentos do cabo pára-raios, após o ponto sob falta foram considerados através do cálculo de uma resistência equivalente. No caso o valor 5,64 ohms, foi determinado, considerando-se os paralelos entre as resistências de pé-de-torre e a impedância do cabo pára-raios.

Nestas condições, a distribuição de correntes entre torres, cabo pára-raios e terra está representada esquematicamente na figura 5.5, e na Tabela 5.1.



(A) - CONVENÇÃO P/ TABELA 51

(B) - DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE NA S.E.

Figura 5.5

NÚMERO DA TORRE	I Vão (A)	ITorre(A)	I Solo (A)
130	858.1	240.9	1094.9
129	672.0	186.1	1281.0
128	528.2	143.8	1424.8
127	442.3	85.9	1510.7
126	376.0	66.3	1577.0
125	324.8	51.2	1628.2
124	285.2	39.6	1667.8
123	254.6	30.6	1678.4
122	231.0	23.6	1722.0
121	212.0	10.2	1740.2
120	198.7	14.1	1754.3
110	121.0	1.4	1832.0
100	119.0	0.5	1834.0
70	117.0	0.0	1836.0

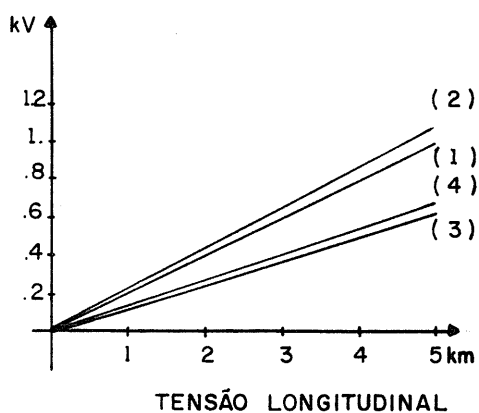
TABELA 5.1

A circulação destas correntes provoca influência na rede telefônica. Estudou-se o efeito da distância de separação entre a LT e a RT, considerando separações de 500 e 1000 metros, entre as mesmas.

Estudou-se a influência do valor das resistências de aterramento da blindagem do cabo telefônico. Para tal considerou-se aterramentos desta de 500 em 500m, com valores de

30 e 300 ohms.

Os resultados das simulações quanto a tensões longitudinais estão resumidos na figura 5.6.



NOTAS:

- (1) SEPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE 500m E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DA BLINDAGEM DE 30  $\Omega$
- (2) SEPARAÇÃO DE 500m E, RESISTÊNCIA ATERRAMENTO DE 300  $\Omega$
- (3) SEPARAÇÃO DE 1000m E, RESISTÊNCIA ATERRAMENTO DE 30  $\Omega$
- (4) SEPARAÇÃO DE 1000m E, RESISTÊNCIA ATERRAMENTO DE 300  $\Omega$

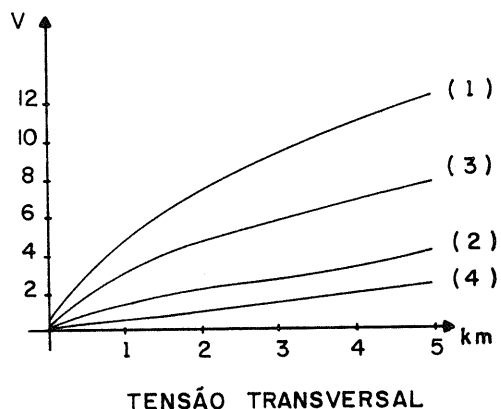
Figura 5.6

Pode-se concluir que para distâncias de separação de 500 a 1000m, a tensão longitudinal variou de 650 a 1100V, e que estes níveis de tensão podem comprometer a segurança pessoal. Se se supõe que a proteção de falta a terra eliminará o curto-circuito em 0,5s, conforme as hipóteses do item 2.2.4, a máxima tensão suportável seria de 650V, valor inaceitável conforme a ABNT(5).

Outra conclusão que se pode extrair desta simulação, conforme a figura 5.6 é que o valor de resistência de aterramento

entre 300 e 30 ohms é de pouca importância em termos de tensão induzida (longitudinal).

A figura 5.7 apresenta a tensão induzida entre os fios do par telefônico (tensão transversal), devido ao desbalanceamento hipotético.



NOTAS :

- (1) - SEPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE 500m  
RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DA BLINDAGEM DE  $30\Omega$
- (2) - SEPARAÇÃO DE 500m E RES. ATERRAMENTO  $300\Omega$
- (3) - SEPARAÇÃO DE 1000m E RES. ATERRAMENTO  $30\Omega$
- (4) - SEPARAÇÃO DE 1000m E RES. ATERRAMENTO  $300\Omega$

Figura 5.7

Uma conclusão interessante é que a resistência de mais baixo valor, no caso 30 ohms, tem efeito contrário ao que se espera, ou seja, aumenta a tensão induzida (transversal). Esta aparente incongluência reside no fato de que com menores valores de resistência, maiores correntes circularão na blindagem, gerando maior diferença de potencial em relação aos fios do par, portanto maior tensão transversal.

### 5.2.2 Circulação de correntes de regime na linha de distribuição (LD)

Simulou-se a circulação de correntes de regime na linha de distribuição, com o objetivo de calcular a indução permanente.

Estudou-se a influência da interligação do cabo neutro da LD à malha de aterramento de subestação .

Os aterramentos da RT foram variados em valor de resistência e localização, com o objetivo de avaliar a sua importância.

A partir dos objetivos acima, simulou-se quatro casos, derivados das seguintes condições:

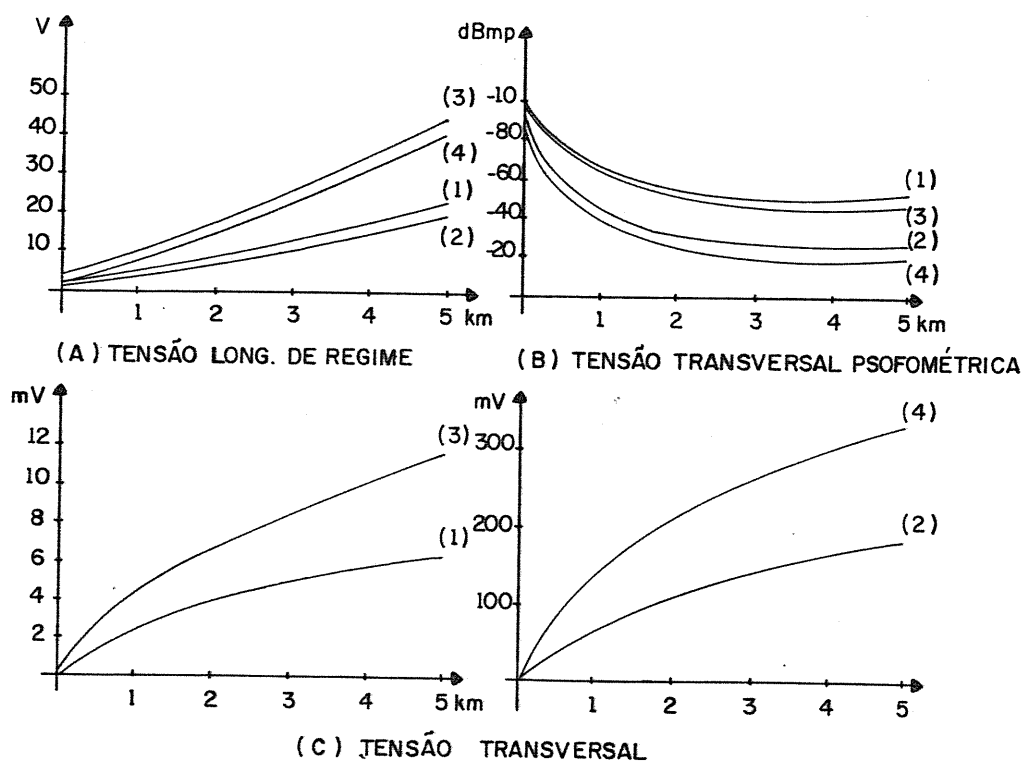
#### 1) Quanto a LD:

- a) Neutro da linha interligado à malha de subestação;
- b) Neutro não interligado;

2) Quanto a RT, a blindagem do cabo telefônico é aterrada na central telefônica com 1 ohm e ainda nas seguintes condições:

- a) Aterramentos apenas no condomínio com 300ohms;
- b) Aterramentos ao longo do RT com 30 ohms, espaçados de 500 em 500m.

Os resultados das simulações podem ser vistos na figuras 5.8.



NOTAS :

- (1) NEUTRO INTERLIGADO A MALHA DA SE E BLINDAGEM ATERRADA NO POVOADO COM  $300\ \Omega$
- (2) NEUTRO INTERLIGADO À MALHA DA SE E BLINDAGEM MULTIATERRADA DE 500 EM 500 m C/ $30\ \Omega$
- (3) NEUTRO NAO INTERLIGADO, RESTANTE IDEM A (1)
- (4) NEUTRO NÃO INTERLIGADO, RESTANTE IDEM A (2)

Figura 5.8

Pode-se concluir destes casos, quanto à tensão induzida longitudinal, que:

- a) O valor e localização dos aterramentos praticamente não interferem no valor da tensão longitudinal;

b) A interligação do neutro da LD tem influência marcante no valor de tensão longitudinal.

Quanto à tensão transversal, pode-se observar que o multiaterramento da blindagem, com baixos valores de resistência (30 ohms), apresenta maiores valores de tensão induzida.

Observa-se que a rede telefônica tem aproximadamente -50dBmp de tensão induzida transversal na condição de aterramento da blindagem apenas no povoado com 300ohms, sendo considerada, de acordo com os limites da TELEBRAS como uma linha ruim. Na condição de aterramentos de 30ohms ao longo da blindagem, a indução é de aproximadamente -30 dBmp, valor inaceitável pela TELEBRAS.



## CAPITULO 6 - CONCLUSÃO

Esta dissertação, conforme salientado no capítulo 1 é o prosseguimento natural de um dos seguimentos de uma filosofia de pesquisa.

Foram levantados por esta dissertação os dados típicos e as características peculiares dos sistemas telefônico e elétrico de potência que influenciam na indução magnética.

O circuito elétrico que modela a indução magnética e um método original de resolução deste circuito foram cuidadosamente analisados e discutidos. O método de resolução foi comparado com outros métodos clássicos e com medições reais, conforme pode ser visto no apêndice II.

O programa desenvolvido para a quantificação da indução magnética possui banco de dados de forma a auxiliar no estudo da indução magnética, além de permitir o seu aproveitamento para outros métodos de cálculo.

O programa está sendo utilizado pelos engenheiros da TELEBRAS S/A e evita gastos desnecessários com tentativas de campo para diminuição das influências devido à indução magnética e permite simulações de redes com o intuito de estabelecer procedimentos técnicos.

O programa implementado pode ser melhorado, sendo possível a incorporação de rotinas que possibilitem a introdução

de transformadores de neutralização, exposições oblíquas (10) entre redes e simulação de redes digitais e atuação de centelhadores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. PAULINO, J.O.S.. Influências de Curtos-Circuitos nas Redes de Distribuição sobre Redes Telefônicas em Uso-Mútuo de Posteação. Belo Horizonte: 1987. (CPGEE-UFMG, Dissertação de Mestrado)
2. BARBOSA, C.F.. Indução Magnética de Linhas de Energia Elétrica em Linhas de Telecomunicações, Belo Horizonte: 1989. (CPGEE-UFMG, Dissertação de Mestrado)
3. SEBO, I., REGENI, L.. Measurement of the Zero - Sequence Current Distribution on a Transmission Line. Budapest: Polytechnical University, 1963.
4. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING. IEEE guide for safety in Substation Grounding. New York: 1976. 76p.
5. NB-447. Influência de Sistemas de Potência em Instalações de Telecomunicações. 1979.

6. DAHL, O.G.C.. Transformer Harmonics and their Distributions. IEEE Transactions. 1925.
7. SEBO, I.. Zero-sequence current distribution along transmission lines. IEEE Trans. PAS, New York, v88, n6, p910-9, 1969.
8. CLARKE, E.. Symmetrical and Related Components. Circuit Analysis of AC Power Systems, New York, 1948.
9. SOBRAL, S.T, Campos, M.S., Costa, V.S., et al.. Análise de Circuitos "LADDER" de parâmetros concentrados excitados por fontes de corrente. In: IX SEMINARIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELETRICA, 9, 1987, Belo Horizonte.
10. KLEWE, H.R.J. . Interference between Power Systems and Telecommunication Lines. London, Edward Arnold Ltd., 1958.
11. CCITT. Protection Against Interference. (Recommendations Series K) V.9.
12. PAULINO, J.O.S., SANTOS, I.M.. Pacote Computacional para Cálculo de Interferência Eletromagnética em Sistemas de Telecomunicações implementado para microcomputadores. In: IX SEMINARIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELETRICA, 9, 1987, Belo Horizonte.

13. SCORALICK, M.R.M.. Segurança no Dimensionamento de Malha de Terra. Belo Horizonte, 1984. (CPGEE-UFMG, Dissertação de Mestrado)
  
14. CENTRAIS ENERGETICA DE MINAS GERAIS. Interligação do Neutro da Rede na Malha de Terra das Subestações de Belo Horizonte. Belo Horizonte, 1978
  
15. GONÇALVES, R.F.G.. Distribuição de Correntes de Seqüência Zero em Linhas de Transmissão. Belo Horizonte, 1984. (CPGEE-UFMG, Dissertação de Mestrado)

### APENDICE I - FORMULAS DE CARSON

As impedâncias próprias simplificados, são dadas pela equação (I.1):

$$Z_{ii} = r_{ii} + 0,00099f + j0,0029f \log_{10} \frac{6,59 \times 10^2 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{RMG} \quad (\Omega / km) \quad (I.1)$$

Onde:

RMG - raio médio geométrico do condutor em m

$\rho$  - resistividade do solo em ohm.m

f - frequência em Hz

$r_{ii}$  - resistência própria do condutor em ohm/km

As impedâncias mútuas simplificadas são dadas por (I.2):

$$Z_{e,q} = 0,00099 \cdot f + j 0,0029 \cdot f \cdot \log_{10} \frac{6,59 \times 10^4 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{DMG} \quad (\Omega / km) \quad (I.2)$$

Onde:

f - frequência em Hz

$\rho$  - resistividade do solo em ohm.m

DMG - distância média geométrica entre os condutores em m.

As equações completas de Carson são bastante complexas e as fórmulas listadas acima incorporam algumas simplificações. Apesar das simplificações, a precisão dos valores encontrados é

suficiente para os objetivos pretendidos.

A tabela I-1 apresenta a resistência própria e o RMG para cabos de energia do tipo CAA, ou seja, cabos de alumínio com alma de aço, mais usuais em linhas de distribuição em função de sua bitola.

BITOLA (AWG)	RESISTENCIA 60 Hz-50°C ohm/km	RMG 60 Hz (m)
4/0	0,3679	0,00248
2/0	0,5562	0,00155
1/0	0,6960	0,00135
2	1,0503	0,00127
4	1,5972	0,00137

Tabela I-1

Para os cabos de aço-carbono, a determinação dos valores de  $r_{ii}$  e RMG não é simples, uma vez estes dependem do valor da corrente circulante.

A tabela I-2 fornece os valores de " $r_{ii}$ " e RMG para alguns tipos de cabos de aço-carbono, para alguns valores de corrente.

Clarke (8) apresenta os valores de resistência e RMG em função da corrente e do diâmetro dos cabos mensageiros (Aço-Carbono) usuais, estes valores são rerepresentados na tabela I-2.

DIAMETRO DO CABO (mm)	RESISTENCIA 60 Hz (ohm/km)	RMG (m)	CORRENTE (A)
6,4	5,903	$3,033 \times 10^{-6}$	0,0
	7,084	$0,012 \times 10^{-12}$	30,0
	7,022	$0,15 \times 10^{-12}$	60,0
4,8	15,1	-	0,8
	15,0	-	15,0
	16,7	-	30,0
	25,1	-	60,0

Tabela I-2



Da mesma forma que nas tabelas I-1 e I-2 é apresentada na tabela I-3 as características dos cabos telefônicos.

CABO	DIAMETRO EXTERNO SOBRE A BLINDAGEM (mm)	RMG DA BLINDAGEM (mm)	RESISTENCIA C.C. BLINDAGEM (ohm/km)	RESISTENCIA C.C. FIO DO PAR (ohm/km)
CT-40-1800	62,0	29,6	0,43	144
CT-40-1500	56,0	26,65	0,48	144
CT-40-1200	51,0	24,22	0,54	144
CT-40-900	44,5	21,05	0,68	144
CT-40-600	37,0	16,9	0,92	144
CT-40-300	27,5	12,75	1,40	144
CT-APL-2400	75,0	34,1	0,66	137
CT-APL-40-1800	69,0	31,3	0,76	137
CT-APL-40-1500	64,0	28,9	0,78	137
CT-APL-40-1200	58,0	26,0	0,86	137
CT-APL-40-900	51,0	22,6	0,94	137
CT-APL-40-600	42,0	18,4	1,15	137
CT-APL-40-300	31,5	13,6	1,60	137
CTP-APL-40-200	31,5	13,85	1,50	137
CTP-APL-64-200	42,0	18,60	1,15	53
CTP-APL-40-100	24,0	10,30	2,00	137
CTP-APL-64-100	31,0	13,40	1,55	53

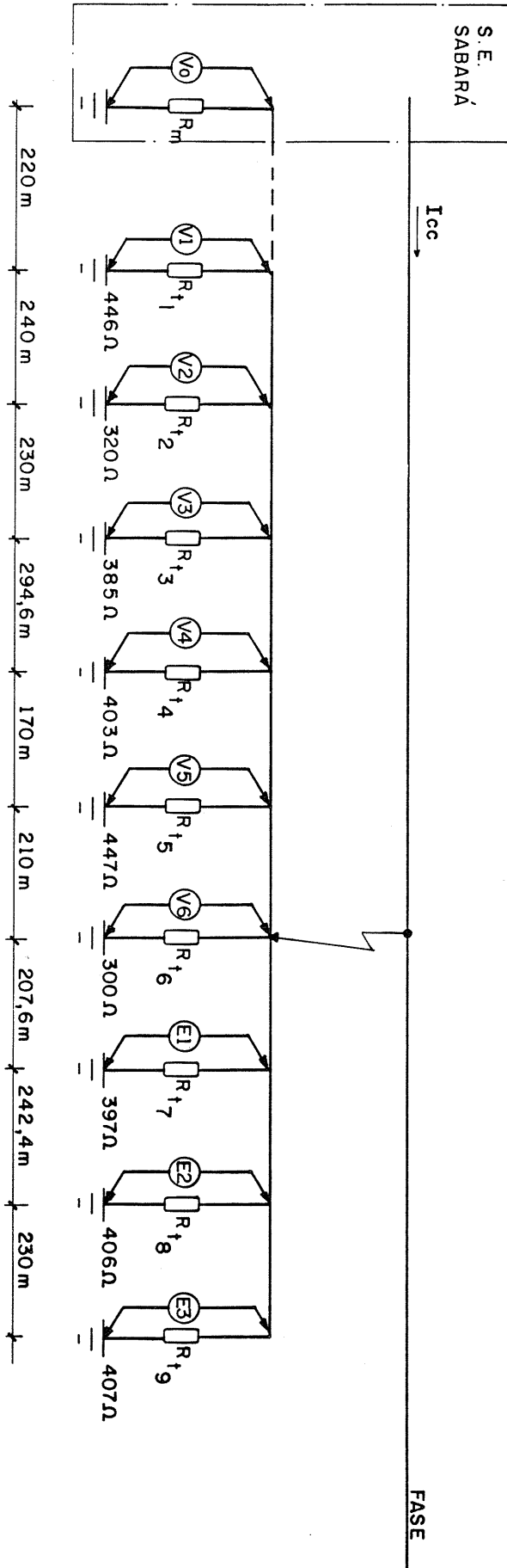
Tabela I-3

**APENDICE II - COMPARAÇÃO DO PROGRAMA COM MEDIÇÕES**

Com o programa computacional desenvolvido simulou-se um curto-circuito fase-neutro. Este curto-circuito foi simulado pela COMPANHIA ENERGETICA DE MINAS GERAIS (CEMIG) em uma de suas rede de distribuição da SE Sabará (14).

Os principais dados fornecidos pelo estudo da CEMIG são:

- a) Os cabos fase e neutro são de bitola 2 AWG, do tipo CAA;
- b) Resistência equivalente da malha da SE Sabará é 0,7ohms;
- c) Tensão nominal da rede igual a 13,8kV;
- d) As distâncias entre aterramentos e os valores das resistências de aterramento estão apresentadas na figura II.1.



ONDE :  $I_{cc}$  - CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

$V_0$  - TENSÃO DO NEUTRO P/ UM "TERRA" INFINITO NA SUBESTAÇÃO

$V_{1,2,\dots,6}$  - TENSÃO DO NEUTRO P/ UM "TERRA" INFINITO NO ATERRAMENTO 1,2,...,6

$E_{1,2,3}$  - TENSÃO DO NEUTRO P/ UM "TERRA" INFINITO NO ATERRAMENTO 1,2,3 APÓS O LOCAL DO CURTO-CIRCUITO.

Os dados fornecidos pela CEMIG são incompletos para a simulação com o programa computacional, logo assumiu-se:

- a) Resistividade do solo igual a 1000 ohms.m;
- b) Potência de curto-circuito trifásica e fase-terra da SE Sabará igual a 100 MVA.

Além dos valores assumidos acima, para facilidade de simulação, considerou-se que:

- a) Distância média entre aterramento igual a 230m;
- b) Resistência média dos seis pontos de aterramentos iniciais igual a 384 ohms;
- c) Resistência equivalente para os três pontos após ao local do curto-circuito igual a 134 ohms.