

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

**ILDEU MARQUES DOS SANTOS**

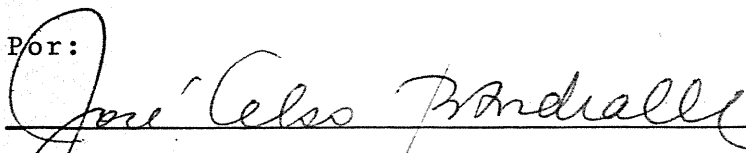
"MODELAMENTO E CÁLCULO DE INDUÇÃO  
MAGNÉTICA DE LINHA DE ENERGIA ELÉTRICA  
EM LINHA TELEFÔNICA

ILDEU MARQUES DOS SANTOS

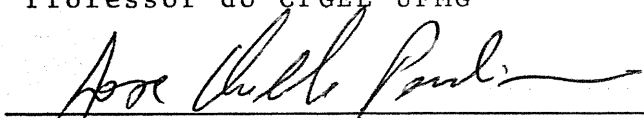
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Ciências.

Aprovada em 23 de novembro de 1.990

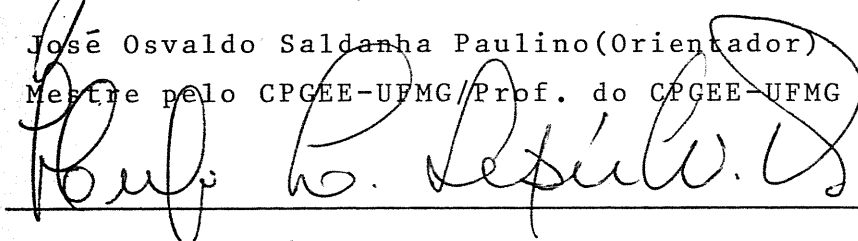
Por:



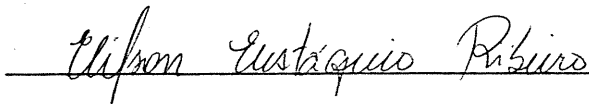
José Celso Borges de Andrade (Orientador)  
Dr. Ing. Univ. Paul Sabatier-Toulouse-FR  
Professor do CPGEE-UFMG



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.

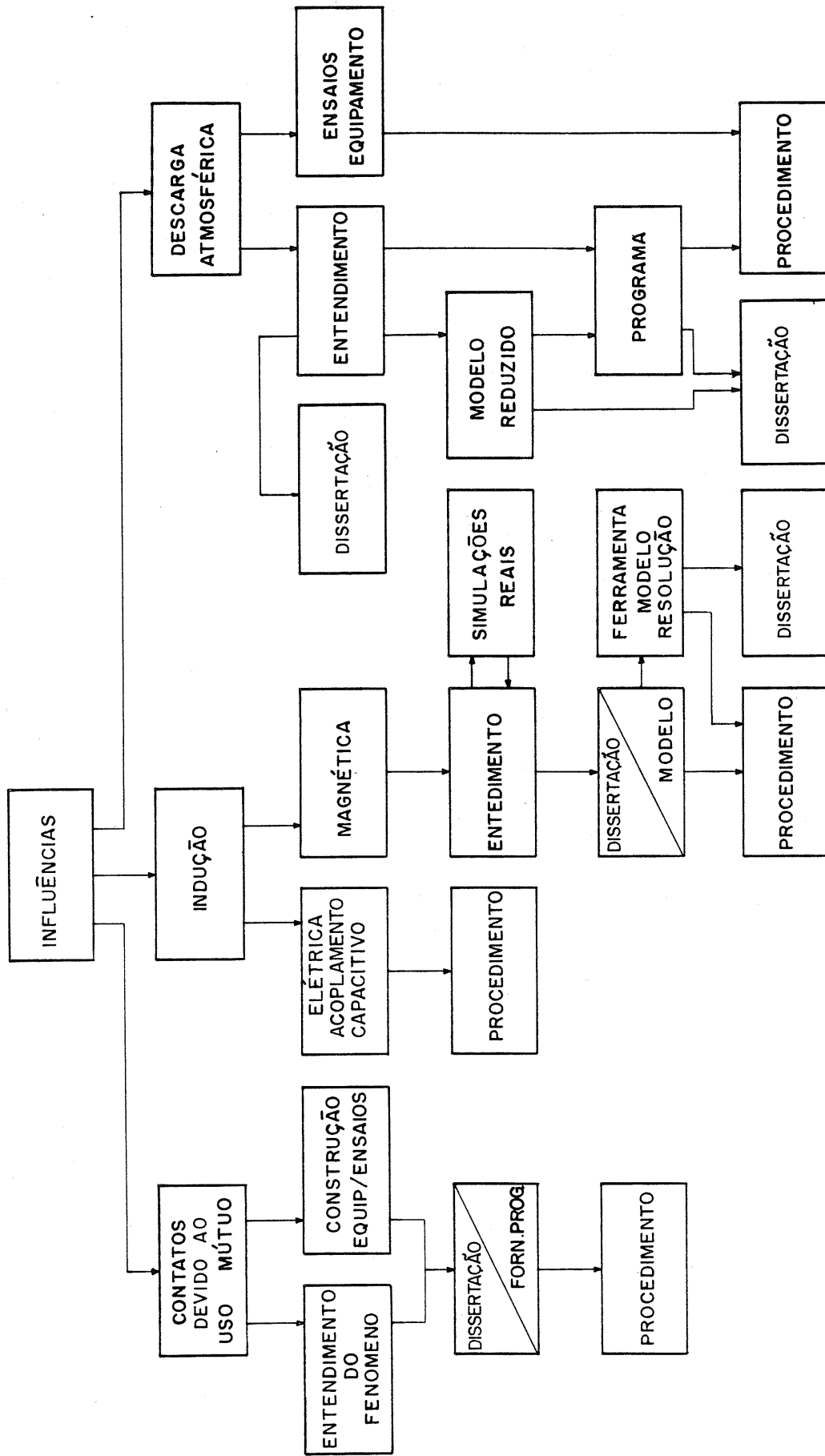


Figura 1.1

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.

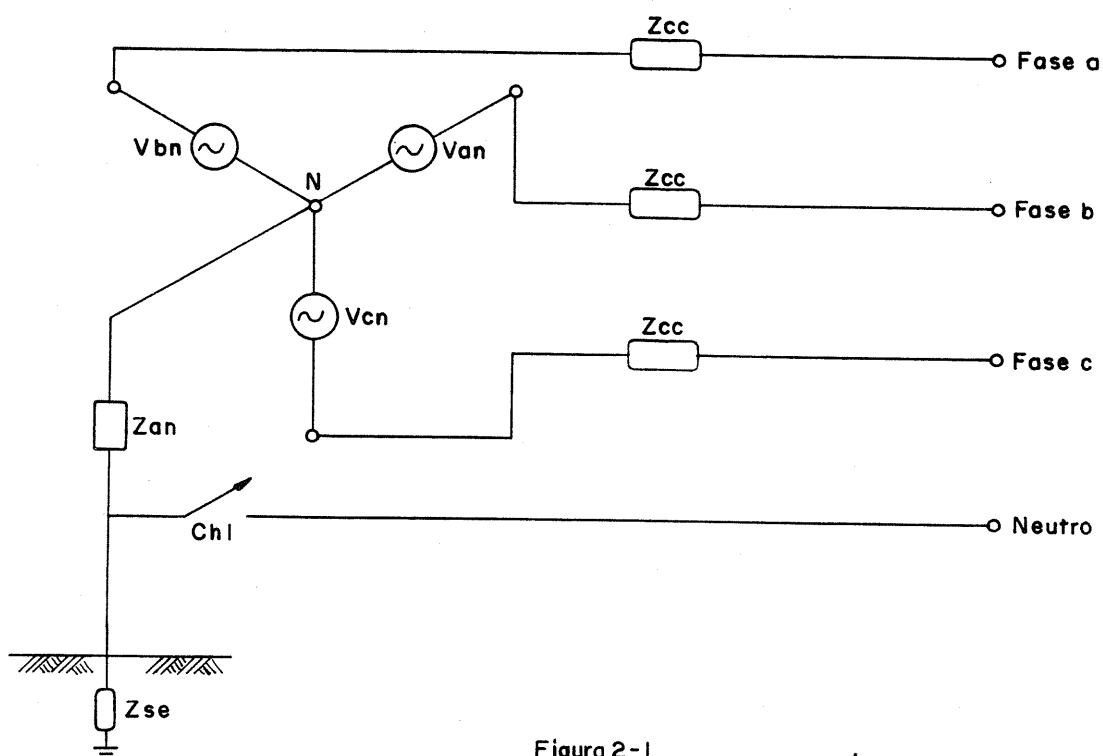


Figura 2-1

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.

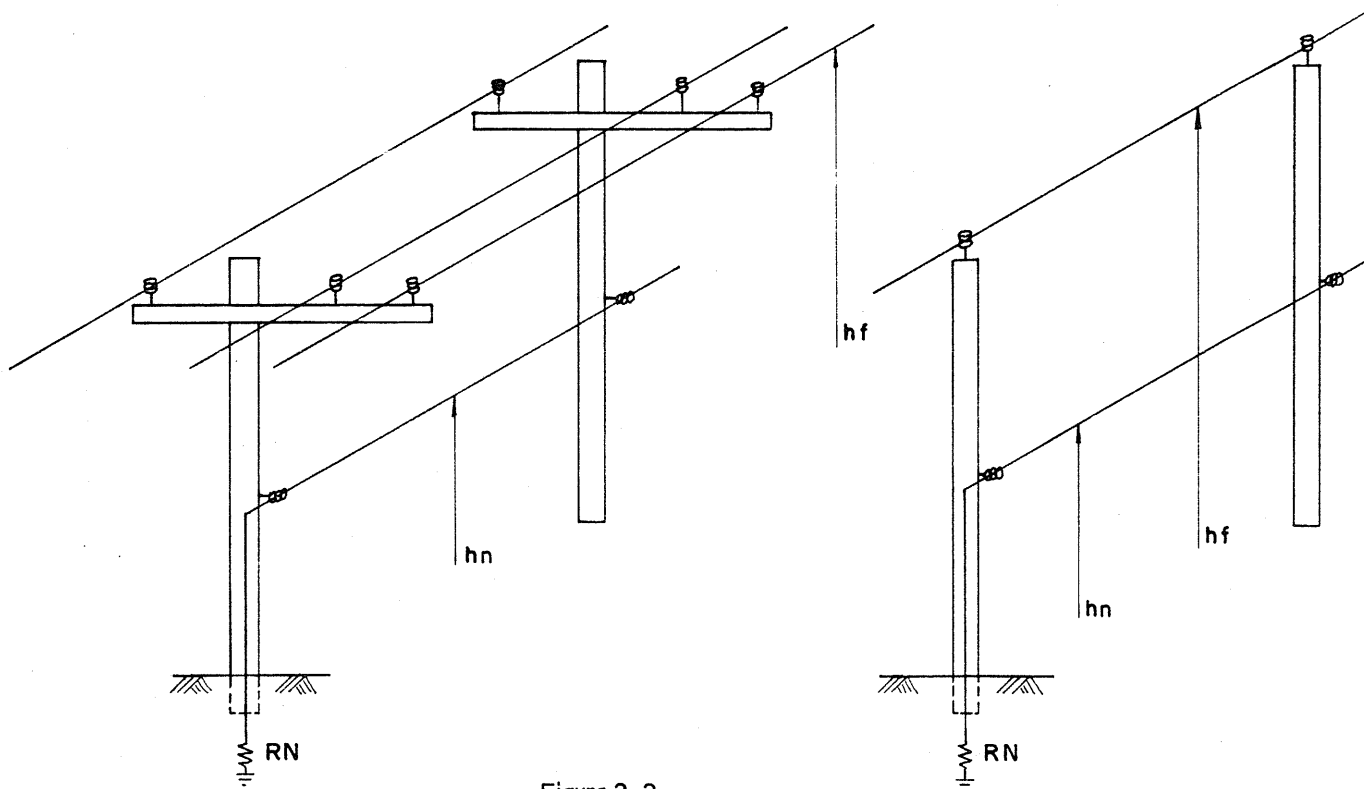


Figura 2-2

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.

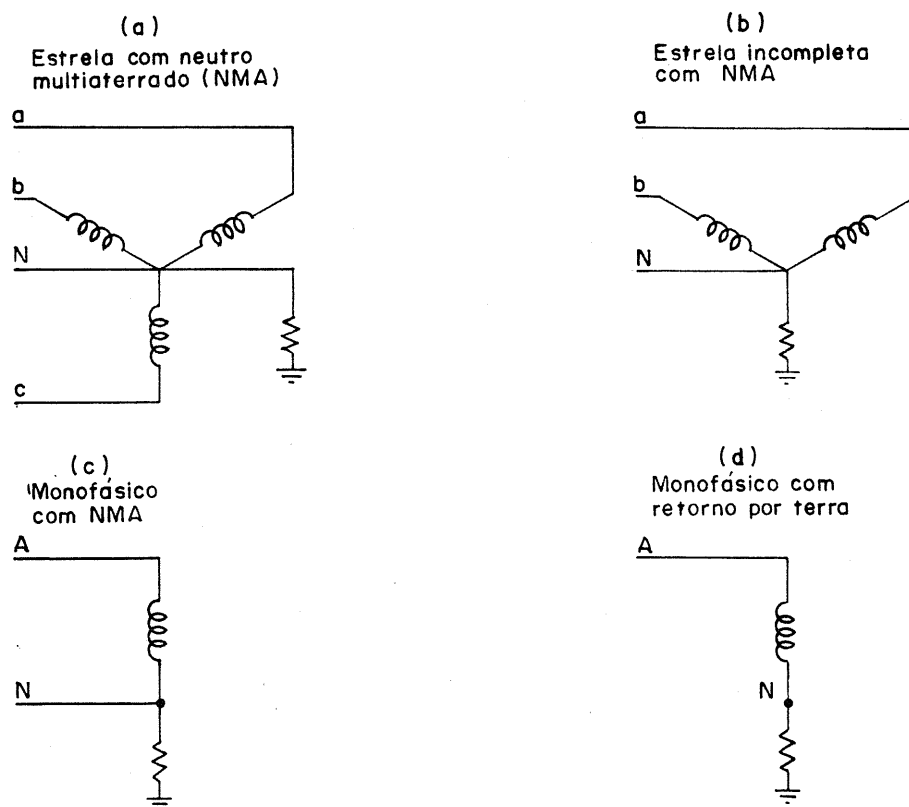


Figura2-3

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.

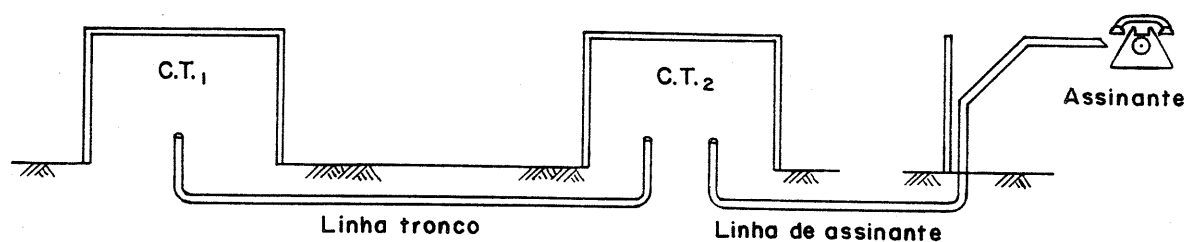


Figura 2-4

### 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