

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

UMA CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ESTRATÉGIAS  
DE DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA ELÉTRICA PARA  
SUPRIMENTO DE PEQUENAS CARGAS

Este exemplar corresponde à redação final da tese  
defendida por José Francisco Rodrigues  
e aprovada pela Comissão  
Julgadora em 20 / 08 / 93.

Orientador

~~Autor: JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES~~

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ PISSOLATO FILHO\*

Co-orientador: Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA\*

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
Elétrica da Universidade Estadual de  
Campinas, UNICAMP, como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do  
título de DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

AGOSTO - 1993

" O Universo é uma esfera cujo centro está em toda parte  
e cuja circunferência não está em parte alguma"

Pascal

À minha esposa e filhas,

Sonia,

Francilla e

Julliana

## AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Dr. José Pissolato Filho que, além da dedicação e atenção, sempre demonstrou grande firmeza e amizade nos momentos difíceis.
  
- Ao Professor Dr. José Carlos de Oliveira, sempre presente com seu apoio técnico e incentivo e pelas valiosas sugestões dadas no transcorrer do trabalho.
  
- À minha esposa e filhas pelo tempo que ficaram desprovidas de meu convívio.
  
- A todos que direta ou indiretamente auxiliaram para a realização deste trabalho.
  
- A Deus infinito em bondade e misericórdia.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo analisar as principais estratégias de derivação de pequenas quantidades de potência de linhas aéreas de transmissão para a alimentação de eventuais cargas existentes nas proximidades das linhas e que não se beneficiam do uso da energia elétrica.

É realizado estudo da modelagem analítica de cada tipo de estratégia para posterior análise em regime permanente com discussão e avaliação de problemas típicos.

Determina-se e sugere-se as faixas possíveis de extração de potência em cada estratégia, indicando-se também, as classes de tensão mais adequadas a esse fim. Apresenta-se exemplo de projeto desenvolvido e relata-se as experiências operativas no campo.

São mencionados, nas propostas de derivação, aspectos de custos envolvidos na construção de pequenas instalações e de forma comparativa quando possível. No caso da derivação de potência por indução eletrostática, elaborou-se estudo com as principais configurações de sistemas de transmissão utilizados no país.

O domínio dessas estratégias derivativas de potência para o abastecimento de pequenas cargas é perfeitamente realizável sob o ponto de vista tecnológico e econômico.

## ABSTRACT

This thesis describes methods in the tapping power of transmission lines for supplying loads located in the vicinity of transmission lines which are not benefited by the use of electrical energy. The problem, however, is how to remove small amounts of power from the HV lines at reasonable cost.

Some possible alternative solutions are proposed:

- a) Capacitive voltage divider;
- b) Insulated and energized shield wires;
- c) Insulated shield wires voltage divider.

These different forms in the power off-take from transmission lines are analysed as steady-state circuits. Pros and cons of each alternative solutions are evaluated within the possible range of feasible powers. Also important costs aspects are analysed and some projects of operation experimental scheme in others countries are mentioned.

The knowledge from these methods allows supply electrical energy to small loads without problems under technical and economic points of view.

## ÍNDICE

RESUMO

ABSTRACT

### CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais.....	01
1.2 - Descrição do Estudo, Revisão Histórica e Bibliográfica....	03
1.3 - Estrutura da Dissertação.....	06

### CAPÍTULO 2 - ESTRATÉGIAS DE DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DE LINHAS

#### AÉREAS DE TRANSMISSÃO

2.1 - Introdução.....	08
2.2 - Derivação de Potência Através de Divisor de Tensão Capacitivo.....	09
2.2.1 - Modelagem Analítica.....	10
2.2.2 - Considerações Operativas em Regime Permanente.....	15
2.2.3 - Componentes Básicos e Proposta de Arranjo Físico..	21
2.2.4 - Considerações de Custos.....	25
2.3 - Derivação de Potência Através de Cabos Pára-Raios Isolados e Energizados.....	28
2.3.1 - Descrição dos Arranjos Físicos.....	30
2.3.2 - Considerações de Desempenho dos Cabos Pára-Raios Isolados às Descargas Atmosféricas.....	36

2.3.3 - Desempenho dos Arranjos Físicos em Regime Permanente.....	41
2.3.4 - Considerações de Custos.....	50
2.4 - Derivação de Potência Através do Acoplamento dos Cabos Pára-raios Isolados.....	55
2.5 - Considerações Finais.....	55

CAPÍTULO 3 - DERIVAÇÃO DE POTENCIA ATRAVÉS DO ACOPLAMENTO  
ELETROSTATICO

3.1 - Introdução.....	57
3.2 - Configurações dos Sistemas de Transmissão.....	58
3.2.1 - Sistemas de Transmissão 1 e 2.....	58
3.2.2 - Sistemas de Transmissão 3 e 4.....	67
3.2.3 - Sistemas de Transmissão 5 e 6.....	67
3.3 - Matrizes de Admitâncias Transversais e de Impedâncias Longitudinais dos Sistemas de Transmissão.....	76
3.3.1 - Matriz de Admitâncias Transversais.....	76
3.3.2 - Matriz de Impedâncias Longitudinais.....	78
3.4 - Cálculo da Tensão Induzida em um Condutor Isolado em Vazio.....	93
3.4.1 - Efeitos dos Campos Magnético e Elétrico.....	96
3.5 - Análise de Sensibilidade.....	101
3.5.1 - Análise da Tensão Induzida e Capacitância Equivalente.....	101
3.6 - Considerações Finais.....	113



CAPÍTULO 4 - DESEMPENHO E ANÁLISE ESTÁTICA DO CIRCUITO AUXILIAR  
DE DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA POR ACOPLAMENTO  
ELETROSTÁTICO

4.1 - Introdução.....	114
4.2 - Teoria Modal de Propagação em Sistemas Formados por Multicondutores.....	115
4.3 - Teoria de Quadripolos no Estudo do Sistema Multicondutores e Condutor Isolado.....	119
4.4 - Análise da Tensão Induzida e Potência Extraída em um Condutor Isolado Através da Teoria Modal.....	122
4.4.1 - Tensões Induzidas nos Cabos Pára-raios dos Sistemas de Transmissão Adotados.....	138
4.5 - Operação do Condutor Isolado sob Condições de Carga.....	146
4.5.1 - Potência Máxima Extraída nos Cabos Pára-raios dos Sistemas de Transmissão Adotados.....	167
4.6 - Arranjo Típico e Fatores Econômicos.....	173
4.7 - Considerações Finais.....	177
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS.....	179
ANEXO 1 - PROGRAMA DIGITAL ELABORADO.....	185
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	197

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um meio eficiente e, muito confiável de transportar energia elétrica é a utilização das linhas aéreas de transmissão e distribuição. Estas tornam-se cada vez mais numerosas e de crescente extensão por todo país, principalmente no momento que estudos são realizados com vistas a exploração de fontes de energia hidráulica situadas na região Norte/Nordeste, pois o potencial hidráulico próximo aos grandes centros de carga encontra-se quase que totalmente esgotado. Sem dúvida, esta alternativa conduzirá, a médio prazo, a novas interligações entre o sistema Norte/Nordeste e sistema Sul/Sudeste, e as futuras linhas de transmissão deverão percorrer distâncias situadas na faixa de 2000 a 2800 km.

Desde a geração até os pontos de consumo, duas das grandezas diretamente envolvidas na transmissão, a tensão e a corrente sofrem sucessivas transformações de nível, necessárias à obtenção de boa qualidade de energia e segurança de utilização. Estas transformações são realizadas em instalações denominadas subestações que, pela qualidade e natureza dos equipamentos e pelo grau de confiabilidade exigido, constituem-se em partes do sistema

de transmissão de custo bastante expressivo.

Por tal motivo, a alimentação de pequenas cargas utilizando transformações diretas a partir das linhas de transmissão não é uma prática usual das concessionárias, visto ser economicamente inviável.

As linhas de transmissão de energia, em seus variados níveis de tensões, proporcionam inúmeros caminhos ao longo de vastas regiões de baixa densidade populacional e, algumas vezes, atravessam pequenas comunidades que necessitam apenas de poucos quilowatts de energia elétrica para seu desenvolvimento, trazendo desta forma um mínimo de bem estar familiar e social.

Por outro lado, há de se considerar que as pequenas cargas localizadas ao longo e nas vizinhanças das linhas de transmissão de alta tensão não são normalmente alvo dos programas de eletrificação em função do alto custo ligado a adoção de soluções convencionais, tais como: subestações abaixadoras, derivações, etc. Assim, dentre as opções mais usuais para o abastecimento destas cargas destaca-se a geração diesel, a qual, como se sabe, necessita de frequentes trabalhos de manutenção e, na maioria dos casos, o fornecimento de energia fica restrito a algumas horas por dia. Deve-se também salientar, que muitas vezes, estas cargas estão situadas em locais de difícil acesso, dificultando inclusive o transporte de combustível.

Para contornar tais dificuldades surgem soluções alternativas, de viabilidade técnica, para alimentação destas pequenas cargas, dentre as quais, pode-se destacar:

- a) Divisores de tensão capacitivos (ou indutivos);
- b) Cabos pára-raios isolados, utilizados como circuito

de distribuição e alimentados em um nível de tensão adequado;

- c) Divisores de tensão a condutor isolado (ou cabo pára-raios isolado)

A finalidade desta tese é apresentar uma análise sobre estas estratégias alternativas de obtenção de energia elétrica, para que se possa atender as pequenas demandas localizadas em regiões distantes das subestações transformadoras, das usinas geradoras e dos tradicionais sistemas de distribuição e, também, formular e estudar problemas típicos inerentes a cada tipo de solução e as possíveis comparações entre os mesmos. A utilização destas técnicas decorre da necessidade de se levar energia elétrica às regiões ainda não atingidas pelos sistemas de distribuição tradicionais e próximas das linhas de transmissão.

## 1.2 DESCRIÇÃO DO ESTUDO, REVISÃO HISTÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

A proposta de se extrair potência de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica para alimentar pequenas cargas em pontos isolados ao longo das rotas das linhas, tem sido alvo de estudos em alguns países. Alguns métodos e soluções com esquemas alternativos têm sido sugeridos e analisados, destacando-se aqueles anteriormente mencionados.

A proposta dos divisores de tensão capacitivos [1,2,3,4] baseia-se na utilização de um banco de capacitores de potência ligado a uma das fases da linha de transmissão, tornando possível a obtenção de valores de tensões à nível de distribuição,

possibilitando desta forma a alimentação dos usuais transformadores utilizados pelos sistemas de distribuição e suas respectivas cargas. Experiências operativas internacionais datam desde 1970, sendo que uma das recentes experiências de campo foi realizada em 1987 em Guerrero - México [2]. Este caso objetivou o atendimento de uma pequena colônia rural chamada "La Pradera", nos limites da cidade de Chilpancingo, suprindo uma carga de 30 kVA. Quanto à alimentação de cargas através de divisores de tensão indutivos (reatores), encontrou-se uma descrição apenas teórica [4], não se encontrando qualquer documentação sobre a experiência operativa desta alternativa. Por este motivo, os desenvolvimentos futuros neste trabalho darão ênfase ao estudo e análise apenas do divisor de tensão capacitivo.

A segunda proposta [5], que fundamenta o suprimento na energização dos cabos pára-raios, constitui fonte de muito interesse e de recentes estudos técnicos. A mesma consiste no isolamento dos cabos pára-raios multiaterrados das linhas de transmissão e a alimentação destes a partir de terciários dos transformadores principais localizados nas subestações ao longo da linha. Uma vez energizados os cabos pára-raios, as cargas remotas são supridas pelos mesmos através de pequenas estações derivativas com arranjos apropriados a esse fim.

A última proposta [6,7], fornece um projeto viável e versátil de uma forma alternativa de derivação de energia elétrica. A solução, neste caso, seria captar a energia de abastecimento através do campo elétrico gerado pela linha de transmissão. Essa fonte de energia consistiria de um condutor isolado ou de um cabo pára-raios isolado, localizado paralelo e

próximo à linha de transmissão, ficando desta forma sujeito a um determinado nível de tensão induzida e tendo em um de seus extremos um transformador para alimentar uma eventual carga aí existente.

A extração de potência através do acoplamento capacitivo de uma linha tem sido analisada e aplicada principalmente por russos e canadenses. O primeiro protótipo posto em operação foi em 1962 e uma grande contribuição para o desenvolvimento deste campo de pesquisa foi dada por V.D. Yurenkov [8], em 1965. Por outro lado, em 1977, R. Blais e R. Berthiaume [9] em conjunto com o Instituto de Pesquisas da Hydro-Quebec, desenvolveram um projeto para construção de um protótipo desta fonte de energia de 35 kW, para alimentar os circuitos de estações repetidoras de microondas e propuseram uma técnica para regular a tensão na carga, apresentando em 1980 uma análise mais detalhada do trabalho anterior [10,11].

Em 1981, a Eletroperu S.A. [12], em consórcio com a B.G. Checo International (Canadá), colocou em operação seus equipamentos na cidade de Nãhuimpuguió (Peru). Outro equipamento instalado pela mesma empresa canadense foi na cidade de Isla Inferno, na Venezuela, para iluminação da travessia do Rio Orinoco.

Após tais considerações destaca-se que, neste trabalho, procura-se mostrar a formulação matemática e a modelagem envolvida no estudo dos métodos alternativos de alimentação à pequenas cargas e analisá-los individualmente quanto ao desempenho em regime permanente de funcionamento e algumas situações de estudos transitórios passíveis de acontecerem nesses sistemas.

Adicionalmente avalia-se os aspectos econômicos de construção e instalação desses métodos e, quando possível, os aspectos econômicos são comparados. Eventuais ocorrências de problemas elétricos próprios a cada sistema em estudo são também considerados.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho apresenta-se desenvolvido em capítulos de acordo com a estrutura a seguir mencionada.

O capítulo 2 descreve as principais formas estratégicas de derivação de energia elétrica das linhas de transmissão. É abordado o abastecimento às pequenas cargas, dando-se grande destaque à utilização do divisor de tensão capacitivo e dos cabos pára-raios energizados e isolados das linhas. Apresenta-se, também, algumas considerações sobre as estimativas de custos envolvidos nas propostas de extração, bem como, um exemplo prático de um divisor de tensão capacitivo aplicado sobre uma linha de transmissão com classe de tensão 138 kV.

O capítulo 3 analisa e detalha, mais especificamente, a derivação de energia elétrica através do acoplamento eletrostático. Para um efetivo e completo estudo da proposta, recorre-se à seis configurações de sistemas de transmissão, adotados no país. Modelos representativos destes sistemas através das matrizes de impedâncias  $\underline{\dot{Z}}$  e admitâncias  $\underline{\dot{Y}}$  são então estabelecidos e, utilizando-se tais, são explorados temas como a análise de sensibilidade, concentrando nessa abordagem

investigações sobre a tensão induzida e a capacitância equivalente vista a partir do condutor isolado (ou cabo pára-raios isolado).

O capítulo 4 descreve uma técnica exata para a modelagem do circuito auxiliar de extração de potência por acoplamento eletrostático, utilizando a teoria modal de propagação e de quadripolos. Resultados de valores máximos de potência extraída das configurações adotadas são apresentados. Descreve-se o funcionamento em regime permanente do circuito a condutor isolado pela inclusão de cargas colocadas nos seus terminais e, apresenta-se os resultados dessa análise, fazendo uso das simulações realizadas com o programa elaborado e descrito no anexo 1. Propõe-se também, algumas técnicas para controlar a tensão nos terminais da carga e são apresentados os resultados das simulações efetuadas.



## CAPÍTULO 2

### ESTRATÉGIAS DE DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DE LINHAS AÉREAS DE TRANSMISSÃO

#### 2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por meta, apresentar e analisar as principais estratégias de extração de potência das linhas de transmissão em alta tensão para alimentação de eventuais cargas existentes nas vizinhanças das linhas e não abastecidas pelos tradicionais sistemas de distribuição de energia. Para tanto algumas técnicas alternativas de suprimento de energia elétrica são propostas. São elas:

- derivação de potência através de divisor de tensão capacitivo;
- derivação de potência através de cabos pára-raios isolados e energizados;
- derivação de potência através de cabos pára-raios isolados (ou condutores auxiliares isolados).

Estas estratégias de abastecimento às pequenas cargas distribuídas ao longo de linhas de transmissão são formas de suprimento de energia elétrica para cargas localizadas principalmente na área rural. Estas regiões apresentam baixa

densidade populacional e uma alta esparsidade de carga, o que resulta no emprego de extensas redes radiais de distribuição de energia elétrica convencionais. A alimentação de pequenas comunidades, localizadas próximas das linhas de transmissão com classe de tensão 69 kV a 230 kV, por sistemas de distribuição convencionais é economicamente inviável. Estes consumidores rurais representam, na sua maioria, pequenas cargas que variam de 5 a 50 kVA. Entretanto para uma tensão de 69 kV e para cargas menores que 100 kVA, não é recomendado e praticável a alimentação destas por meio de transformadores usuais, devido as altas relações de transformação e a baixa demanda de energia. Ao aumentar a tensão primária, aumentam rapidamente os custos de isolamento, o que torna pouco provável o uso de transformadores tradicionais, considerando ainda, que em altas tensões de alimentação se requer seccionadoras de alta capacidade de interrupção e de preços muito elevados.

Estas técnicas são detalhadas a seguir.

## 2.2 DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE DIVISOR DE TENSÃO CAPACITIVO

Divisores de tensão capacitivo tem sido utilizados para alimentar consumidores rurais de 25 kVA [1], e, este procedimento conduz a uma redução de custos quando comparada com os sistemas convencionais. Reconhecendo este aspecto, este item tece considerações sobre o projeto desta forma alternativa de derivação de energia, enfatizando-se os fundamentos da base teórica,

aspectos de funcionamento em regime permanente, os principais componentes do sistema e os possíveis problemas específicos que influenciam seu desempenho.

Convém mencionar, que esta técnica de derivação de potência tem aplicação em linhas de transmissão de classe de tensão não superior a 230 kV, uma vez que os bancos de capacitores requeridos são proporcionais a tensão fase-neutro da linha e, desta forma podem implicar em altos custos.

### 2.2.1 Modelagem Analítica

O divisor de tensão capacitivo é utilizado com o propósito de se reduzir o nível de alta tensão de uma linha de transmissão para uma tensão na classe de distribuição. Para fins ilustrativos, no decorrer desta análise, adotar-se-á uma linha de transmissão que apresenta classe de tensão 138 kV. Desta forma a meta a ser atingida está em reduzir a tensão fase-neutro  $138/\sqrt{3}$  kV da linha, para a tensão fase-neutro  $13.8/\sqrt{3}$  kV, do circuito derivativo.

A figura 2.1 ilustra o princípio básico de operação do divisor de tensão capacitivo, considerando a ligação de uma fase à terra.

A redução da tensão, a ser obtida no sistema da figura 2.1, dependerá das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$  dos bancos de capacitores. Se  $V_1$  e  $V_2$  são, tensão fase-neutro da linha de transmissão e tensão fase-neutro reduzida requerida, respectivamente, a equação (2.1) expressa a relação entre estes

parâmetros em função do divisor de impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$  ou de capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$ .

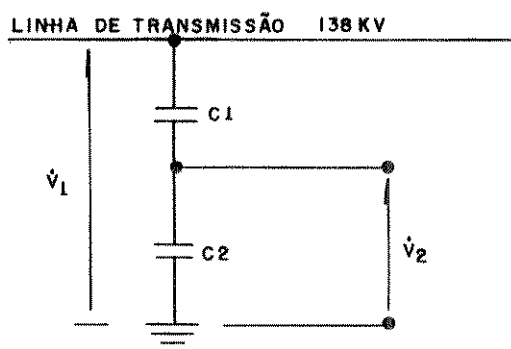


Figura 2.1 - Esquema básico do divisor de tensão capacitivo

$$V_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_1 \quad (2.1)$$

A relação  $Z_2/(Z_1 + Z_2)$  ou  $C_1/(C_1 + C_2)$  é denominada razão de transformação do sistema e é representada por  $D$ . Considerando o circuito equivalente de Thèvenin da figura 2.1, o comportamento em regime permanente para esse circuito, torna-se de fácil compreensão. A figura 2.2 ilustra o citado circuito.

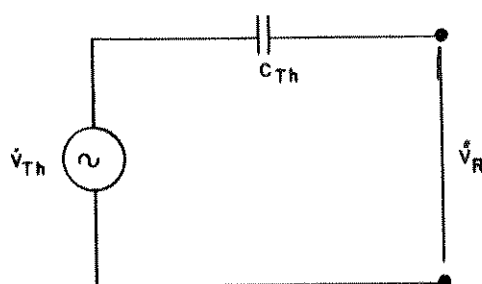


Figura 2.2 - Circuito equivalente de Thèvenin do divisor capacitivo

Na figura 2.2:

$$\dot{V}_{th} = \dot{V}_z = D \cdot \dot{V}_1 \quad (2.2)$$

$$C_{th} = C_1 + C_2 \quad (2.3)$$

$$D = C_1 / (C_1 + C_2) \quad (2.4)$$

A impedância da fonte Thèvenin da figura 2.2, por apresentar grandes valores, origina, para variações da carga, uma pobre regulação de tensão  $V_R$ . A fim de tentar solucionar este problema, conecta-se em série com a carga, uma indutância para compensar total ou parcialmente a impedância capacitiva introduzida pelo divisor de tensão. Esta indutância é determinada pela equação (2.5).

$$L = \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{th}} \quad (2.5)$$

A figura 2.3 ilustra a presença da indutância no circuito. A partir da figura 2.3 (a) é possível escrever:

$$\dot{V}_R = \dot{V}_{th} - j \cdot \dot{I} \cdot \omega \cdot L - \dot{I} \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{th}} \quad (2.6)$$

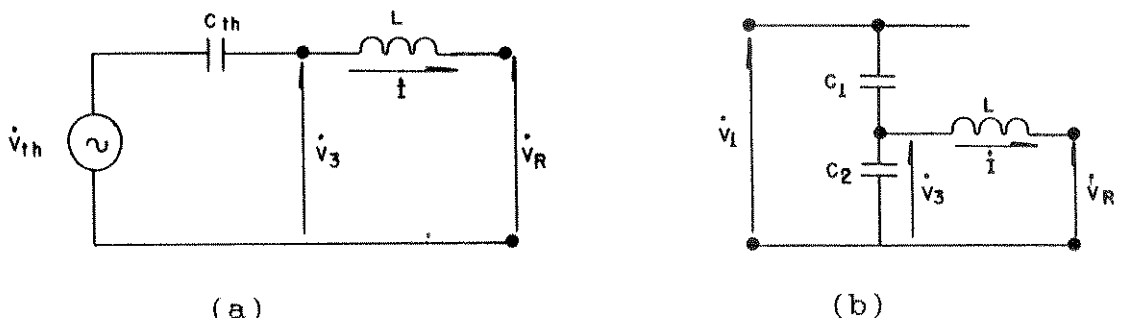


Figura 2.3 - Divisor de tensão capacitivo com indutor série.

Substituindo-se  $L$  dada pela equação (2.5), na equação (2.6), vem:

$$\dot{V}_R = \dot{V}_{th} - j \cdot \dot{I} \cdot \omega \cdot \frac{1}{\omega^2 \cdot C_{th}} - \dot{I} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{th}} \quad (2.7)$$

ou:

$$\dot{V}_R = \dot{V}_{th} - \dot{I} \cdot \left[ \frac{j}{\omega \cdot C_{th}} - \frac{j}{\omega \cdot C_{th}} \right] \quad (2.8)$$

que resulta em:

$$\dot{V}_R = \dot{V}_{th} \quad (2.9)$$

A expressão (2.9) indica que a tensão  $\dot{V}_R$  é independente da corrente de carga  $\dot{I}$ , dependendo somente da razão de transformação  $D$  do sistema e da tensão primária  $\dot{V}_1$  da linha de transmissão. Nota-se, também, da figura 2.3 (a) e (b), a constatação das afirmações anteriores, muito embora, a tensão  $\dot{V}_s$  dependa da corrente de carga  $\dot{I}$ . Assim, considerando-se o circuito em condições de plena carga, tem-se as equações (2.10) e (2.11), e considerando-o em vazio, tem-se a equação (2.12).

$$\dot{V}_s = \dot{V}_R + j \cdot \dot{I}_l \cdot \omega \cdot L \quad (2.10)$$

$$\dot{V}_s = \dot{V}_{th} - \dot{I}_l \cdot \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{th}} \quad (2.11)$$

$$\dot{V}_s = \dot{V}_R = \dot{V}_{th} \quad (2.12)$$

onde,  $\dot{I}_l$  nas equações anteriores é a corrente a plena carga.

Observando-se a figura 2.3, é possível conectar um transformador abaixador, que terá nos seus terminais de entrada a tensão  $\dot{V}_R$  e do outro lado um nível de tensão adequado para utilização. Levando-se em conta a relação de transformação do transformador no dimensionamento da indutância  $L$ , verifica-se nas figuras 2.4 e 2.5, que a indutância pode ser introduzida no circuito de duas formas diferentes. Na figura 2.4, o primário do transformador é conectado à tensão regulada  $\dot{V}_R$  e a tensão na indutância torna-se independente da variação de carga, que pode ir de zero até o valor máximo indicado na equação (2.13), em plena carga.

$$\dot{V}_{l_{\max}} = \dot{I}_l \cdot j \cdot \omega \cdot L \quad (2.13)$$

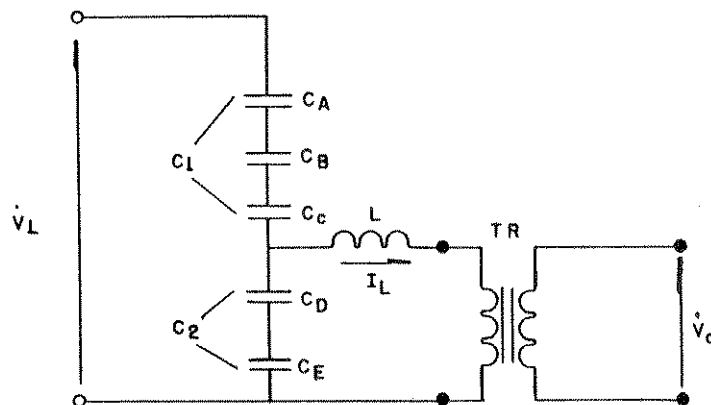


Figura 2.4 - Esquema com transformador e indutância conectada em série no primário.

Se o primário do transformador for conectado conforme ilustra a figura 2.5, este terá em seus terminais de entrada uma tensão que depende da carga ( $\dot{V}_g$  na figura 2.3) e funcionará, portanto, com tensões superiores e menores fatores de potência em plena carga do que sem carga.

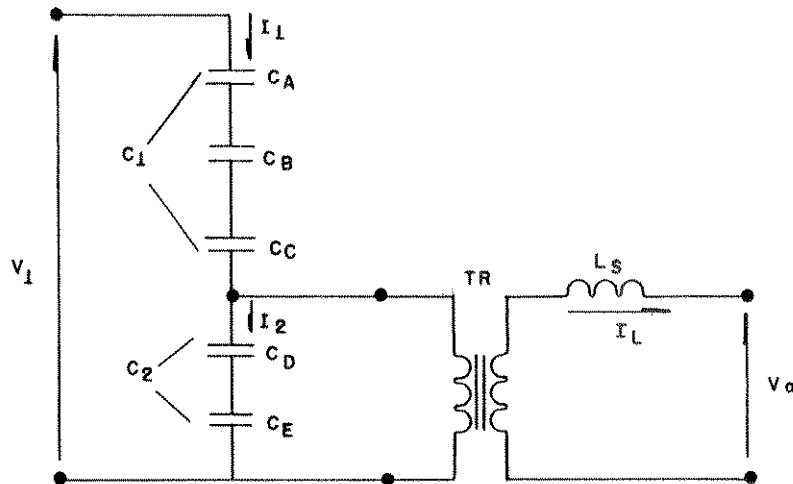


Figura 2.5 - Esquema com transformador e indutância conectada em série no secundário.

### 2.2.2 Considerações Operativas em Regime Permanente

Com a formulação matemática desenvolvida, é desejável aplicá-la com vistas a obter informações sobre o funcionamento da proposta de alimentação de pequenas cargas aqui enfocada. Para tanto, seja o esquema ilustrado na figura 2.4, onde supõe-se conhecidos os parâmetros:

$V_1$  - Tensão f-n da linha de transmissão aplicada no divisor;



- $V_o$  - Tensão de saída desejada;  
 $S_n$  - Potência Nominal da instalação;  
 $n$  - Relação de transformação do transformador;  
 $V_{l\text{máx}}$  - Máxima tensão através da indutância.

Com o conhecimento prévio destes parâmetros, é possível determinar os principais valores dos elementos envolvidos na avaliação e execução do divisor de tensão. Assim, pode-se escrever as seguintes expressões para aquela configuração:

$$V_{th} = V_R = n \cdot V_o \quad (2.14)$$

$$D = V_{th} / V_1 \quad (2.15)$$

$$I_l = \frac{S}{n \cdot V_o} \quad (2.16)$$

$$L = \frac{V_{l\text{máx}}}{\omega \cdot I_l} \quad (2.17)$$

$$C_{th} = \frac{1}{\omega^2 \cdot L} \quad (2.18)$$

$$C_1 = D \cdot C_{th} \quad (2.19)$$

$$C_2 = C_{th} - C_1 \quad (2.20)$$

Para o esquema ilustrado na figura 2.5 onde a indutância de regulação é ligada no lado secundário do transformador, os seguintes parâmetros devem ser conhecidos:

$V_1$  - Tensão f-n da linha de transmissão aplicada no divisor;

$V_o$  - Tensão de saída desejada;

$S_n$  - Potência nominal da instalação;

$n$  - Relação de transformação do transformador;

$V_{tmáx}$  - Máxima tensão aplicada nos terminais primário do transformador.

As equações (2.14) a (2.20) são novamente aqui aplicadas, adicionando-se as seguintes equações:

$$L_s = \frac{L}{n^2} \quad (2.21)$$

onde,  $L$  é determinada através da equação (2.17).

A tensão  $V_{tmáx}$  expressa na equação (2.17) pode ser determinada por:

$$V_{tmáx} = V_{tmáx} \cdot \text{sen } \theta \quad (2.22)$$

onde:

$$\theta = \text{arc cos } \frac{n \cdot V_o}{V_{tmáx}} \quad (2.23)$$

e finalmente,

$$V_{l_s \text{ máx}} = \frac{V_{lmáx}}{n} \quad (2.24)$$

O cálculo do ângulo  $\theta$  indicado na equação (2.23) pode ficar mais evidente a partir da observação da figura 2.7, que representa o diagrama fasorial nas condições de plena carga, utilizando-se a situação descrita na figura 2.5.

Os diagramas fasoriais ilustrados nas figuras 2.6 e 2.7, indicam o funcionamento do circuito descrito na figura 2.5, na situação de operação em vazio e plena carga, com fator de potência unitário. Nota-se que a tensão de saída  $V_o$ , está em fase com a tensão da linha de transmissão  $V_1$ , possibilitando desta forma a utilização de dois divisores de tensão capacitivos que, ligados em fases diferentes num esquema em delta aberto, permitem a alimentação de cargas trifásicas.

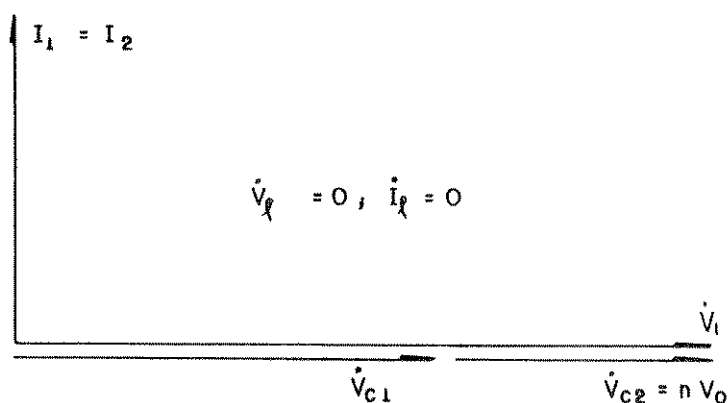


Figura 2.6 - Diagrama fasorial para a condição em vazio

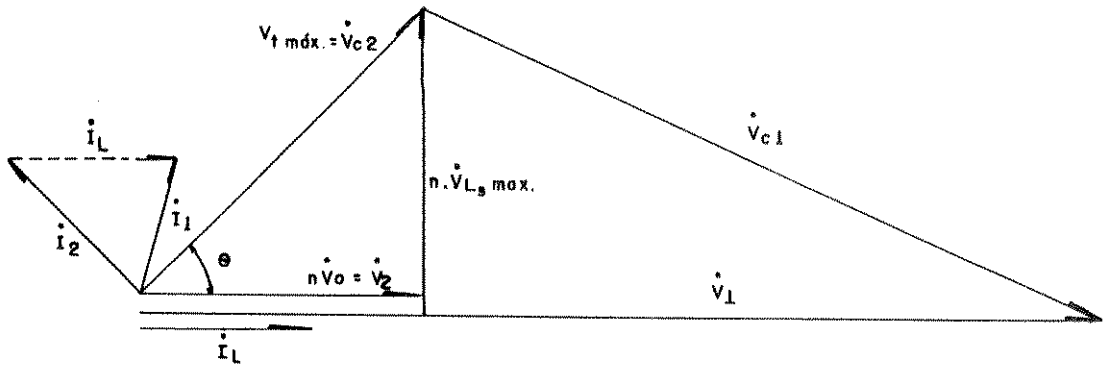


Figura 2.7 - Diagrama fasorial para a condição em plena carga (fator de potência unitário)

A escolha dos bancos de capacitores  $C_1$  e  $C_2$  da figura 2.1 deve satisfazer a duas condições. A primeira, corresponde ao valor da tensão através do banco de capacitores  $C_2$  que, na condição de operação em vazio, deve ser igual a tensão de distribuição  $V_2$ , desejada. Esta condição pode ser obtida através da equação (2.1), resultando:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{V_1}{V_2} - 1 \quad (2.25)$$

A segunda condição a ser satisfeita, refere-se a máxima tensão em regime permanente,  $V_{c \text{ max}}$  de cada unidade de capacitor, que deve ser menor ou igual a sua tensão nominal,  $V_c$ . Esta condição aplicada ao banco de capacitores  $C_1$  da figura 2.7, supondo-se a situação mais severa com o uso de uma carga resistiva, resulta nas expressões fornecidas pelas equações (2.26)

e (2.27).

$$V_{c1_{\text{máx}}} = \sqrt{(I_l \cdot X_l)^2 + (V_1 - V_2)^2} \quad (2.26)$$

$$V_{c1_{\text{máx}}} \leq V_{c1} = \sqrt{S_{c1} \cdot Z_1} \quad (2.27)$$

onde:

$I_l$  - corrente máxima na carga

$S_{c1}$  - potência nominal do banco  $C_1$

$X_l$  - reatância do indutor ligado em série com a carga

$Z_1$  - impedância do banco de capacitores  $C_1$

Por outro lado, o caso mais severo para o banco de capacitores  $C_2$  é o uso de uma carga plenamente indutiva. Supondo que, nestas condições, o fator de potência mais baixo que pode ser utilizado seja 0.8, pode-se obter para o banco  $C_2$ :

$$V_{c2_{\text{máx}}} = \sqrt{(0.8 I_l \cdot X_l)^2 + (V_2 + 0.6 I_l \cdot X_l)^2} \quad (2.28)$$

$$V_{c2_{\text{máx}}} \leq V_{c2} = \sqrt{S_{c2} \cdot Z_2} \quad (2.29)$$

onde:

$S_{c2}$  é a potência nominal do banco  $C_2$ .

$Z_2$  é a impedância do banco de capacitores  $C_2$ .

Através da equação (2.5) é possível escrever:

$$X_l = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.30)$$

Se as unidades de capacitores do banco possuem classe de tensão ou potência nominal diferentes, a tensão nominal  $V_n$  do banco pode ser obtida conforme detalhado a seguir.

Inicialmente define-se a corrente nominal de cada unidade, resultando para uma unidade genérica "i",

$$I_{ni} = \frac{S_{ni}}{V_{ni}} \quad (2.31)$$

a seguir, seleciona-se a menor corrente calculada da equação (2.31) e determina-se a tensão do banco através da equação (2.32).

$$V_n = I_{n(\min)} \cdot \left[ \sum_l \frac{V_{ni}^2}{S_{ni}} \right] \quad (2.32)$$

### 2.2.3 Componentes Básicos e Proposta de Arranjo Físico

Quando se analisa o funcionamento do divisor de tensão capacitivo, pode-se deparar com dois problemas típicos, a saber: ferro-ressonância e "flicker". O primeiro é causado devido a saturação do indutor ferromagnético [1], utilizado para compensar a impedância capacitiva da fonte e pela saturação do próprio

transformador de distribuição. A fim de minimizar os efeitos da ferro-ressonância, a referência [2] sugere o emprego de um reator de núcleo de ar, sub-dividido entre os lados de alta e baixa tensão do transformador. A característica do núcleo de ar evitará a saturação e a divisão da indutância de compensação proporcionará menores sobretensões nos casos de faltas.

Quanto ao aspecto "flicker", isto é, as cintilações ou oscilações na tensão provocando alterações da intensidade luminosa, somente deve ocorrer quando a carga é composta predominantemente de motores de indução e lâmpadas fluorescentes, operando simultaneamente com pouca ou nenhuma carga resistiva. Neste caso, o "flicker" pode ser eliminado, entre outras, pela inclusão de filtros localizados juntos às cargas que são as fontes do fenômeno ou ainda pelo aumento da capacidade de serviço total da instalação.

Considere uma linha de transmissão classe de tensão 138 kV, conforme ilustra a figura 2.9. Nesta se deseja realizar a instalação de um divisor de tensão capacitivo para alimentar uma carga de 20 kVA utilizando um transformador de distribuição monofásico, cuja relação de tensão é dada por 7967/220 V.

A partir do procedimento anteriormente descrito é possível determinar os principais componentes e parâmetros envolvidos no projeto. Assim, a tensão fase-neutro  $V_1$  da linha de transmissão será igual a  $138/\sqrt{3}$  kV, enquanto a tensão fase-neutro  $V_0$ , será neste caso  $13.8/\sqrt{3}$  kV, ou 7,967 kV. A relação "n" de transformação do transformador, nesta condição, resultará num valor igual a 36. Através das equações (2.14) a (2.16) obtém-se: a tensão equivalente de Thèvenin,  $V_{th}$ ; a razão de

transformação do sistema,  $D$ , e corrente a plena carga (nominal) do transformador,  $I_l$ , cujos valores são indicados abaixo.

$$V_{th} = n.V_o = 7,967 \text{ kV}$$

$$D = \frac{7967}{79764} = 0,10$$

$$I_l = \frac{20000}{7967} = 2,51 \text{ A}$$

Admitindo-se que a máxima tensão  $V_{l\text{máx}}$  sobre a indutância  $L$  é de 7000 V e, utilizando a equação (2.13) é possível determinar  $L$  substituindo-se os valores conhecidos nesta equação, resultando assim:

$$L = \frac{7000}{377 \cdot 2,51} = 7,4 \text{ H}$$

Para determinar os valores das capacitâncias  $C_1$  e  $C_2$ , utiliza-se as equações (2.18) a (2.20), das quais obtém-se:

$$C_{th} = \frac{1}{(377)^2 \cdot (7,4)} = 0,95 \mu\text{F}$$

$$C_1 = D \cdot C_{th} = 0,1 \cdot 0,95 = 0,095 \mu\text{F}$$

e

$$C_2 = C_{th} - C_1 = 0,95 - 0,095 = 0,855 \mu\text{F}$$

Desta forma, os bancos de capacitores  $C_1$  e  $C_2$  serão compostos com as seguintes unidades:



Banco C<sub>1</sub> :

7 unidades de 50 kVA      13,8 kV

Banco C<sub>2</sub> :

2 unidades de 100 kVA      12,45 kV

Se a indutância de compensação L, for referida ao lado de baixa tensão do transformador, tem-se:

$$L_{BT} = \frac{7,4}{(36)^2} = 5,7 \text{ mH}$$

Com os componentes básicos estimados, apresenta-se na figura 2.8 uma proposta de esquema de instalação divisor de tensão capacitivo envolvendo os principais equipamentos e aparelhos em seu arranjo.

Na figura 2.8, optou-se pela divisão da indutância de compensação nos lados da alta e baixa tensão, com a finalidade de se evitar ocorrências de ferro-ressonância no circuito, bem como auxiliar na coordenação da proteção e minimizar as correntes de faltas [2]. A utilização de uma chave corta-circuito fusível e de um pára-raios de óxido de zinco sobre o lado de alta tensão do transformador tem por meta a proteção e limitação das sobretensões e curto-circuitos.

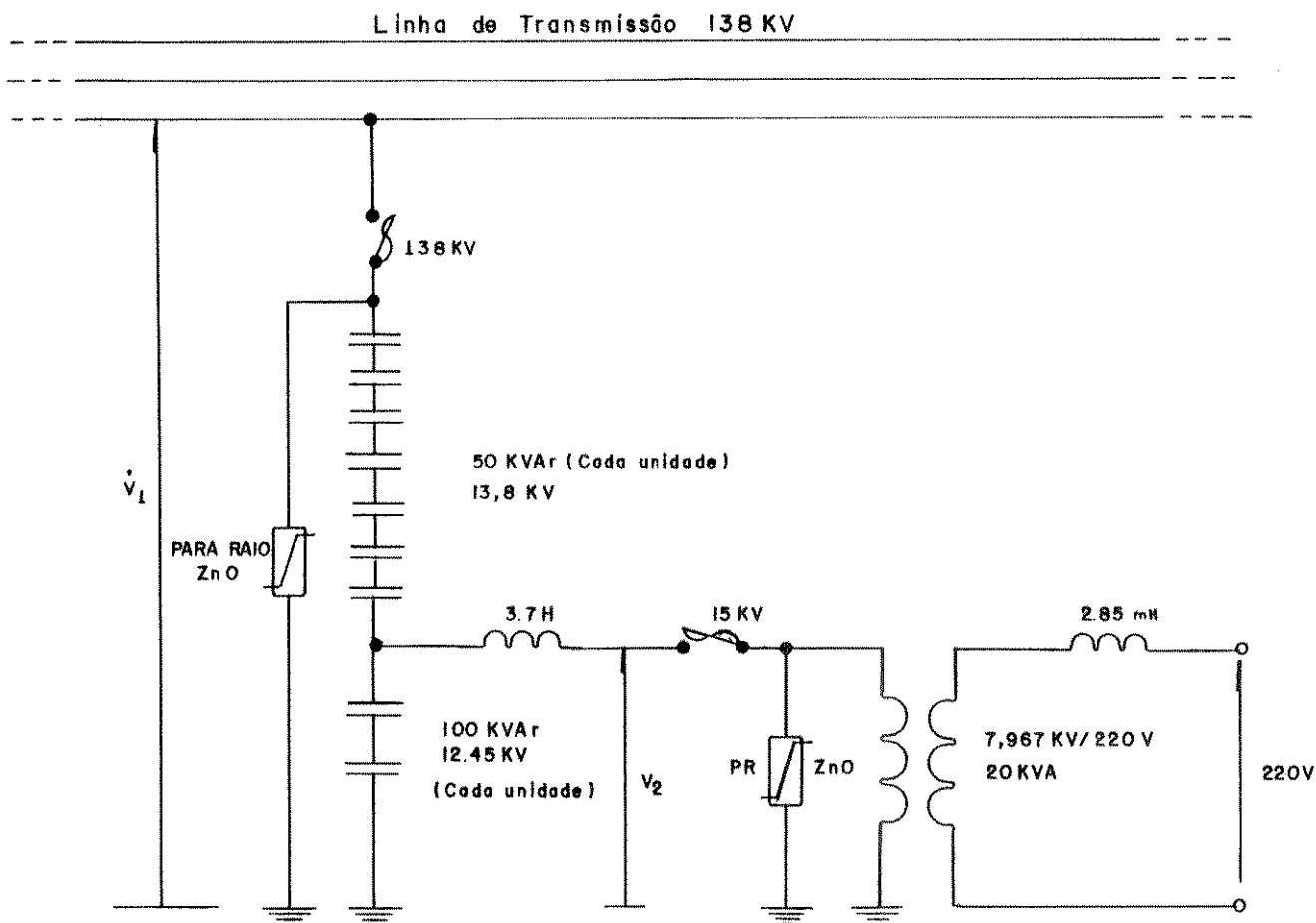


Figura 2.8 - Arranjo de uma instalação divisor de tensão capacitivo

#### 2.2.4 Considerações de Custos

Com relação a este aspecto, a referência [1] tece alguns comentários e lembra que um grande número de itens poderia ser comum a qualquer método de alimentação a um consumidor a partir de linhas de transmissão (por exemplo: fusíveis primários, seccionadoras, etc). Levando-se em conta, para efeito de comparação, apenas os componentes principais das instalações

divisor de tensão capacitivo e transformador de potencial, a tabela 2.1 resume os custos dos componentes envolvidos naquele arranjo [1].

Tabela 2.1 - Custos parciais para o divisor de tensão capacitivo e transformador de potencial

ITEM	DIVISOR CAPACITIVO (US\$)	TRANSFORMADOR POTENCIAL (US\$)
Capacitores, barramentos e isoladores	900,00	—
Transformador Principal	400,00	5070,00
Indutor de Ajuste	800,00	—
TOTAL	2110,00	5070,00

Os custos apresentados na tabela 2.1 foram obtidos para uma instalação constituída de um divisor de tensão capacitivo com capacidade igual a 25 kVA, empregando-se um transformador monofásico 14.4 kV / 480/220 V e um total de quatro capacitores de potência, dois iguais a 0,35  $\mu$ F e o restante iguais a 0,66  $\mu$ F.

Utilizando-se a configuração descrita na figura 2.8, foi possível realizar uma estimativa de custo, para essa instalação. Adotando-se neste levantamento preços de mercado à nível nacional de componentes e equipamentos utilizados por empresas que prestam

serviço nesta área e com valores convertidos em dólares, a tabela 2.2 apresenta a estimativa de custo inicial, sem inclusão da mão de obra de montagem.

Tabela 2.2 - Estimativa de Custo do arranjo da figura 2.8

ITEM	DIVISOR CAPACITIVO (US\$)
Capacitores	4876,00
Pára-Raios	65,00
Transformador Principal	561,00
Chave Corta-Circ.	106,00
Indutor Ajuste	800,00
TOTAL	6408,00

A tabela 2.2 indica que o divisor de tensão capacitivo, tem nos capacitores a participação mais relevante no custo da instalação, proporcionando neste exemplo aproximadamente 72% do valor total do custo dos equipamentos.

## 2.3 DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DE CABOS PÁRA-RAIOS ISOLADOS E ENERGIZADOS

Apresentados os fundamentos da primeira estratégia derivativa de potência elétrica das linhas de transmissão, passa-se a analisar a segunda proposta, ou seja, aquela em que a extração de potência elétrica se faz através de cabos pára-raios isolados e energizados.

Esta técnica consiste, resumidamente, em se isolar os cabos pára-raios das linhas de transmissão quando estes se encontram multiterrados junto às mesmas, com isoladores apropriados a esse fim, e em seguida energizá-los com um nível de tensão adequado por meio de um transformador localizado na subestação mais próxima ao longo do trajeto da linha. A partir dos cabos pára-raios energizados é possível alimentar-se pequenas comunidades que se encontram nas proximidades de linhas de transmissão, utilizando para isso um transformador de distribuição padrão de média/baixa tensão ligado entre o(s) cabo(s) pára-raios e a terra. Quatro propostas de arranjos são apresentadas, sendo duas próprias para a alimentação de cargas monofásicas e as outras incluindo as cargas trifásicas. Há de se considerar, que nesta sugestão de extração de potência, assim como nas outras, deve ser dada atenção aos valores da potência derivada que, neste caso, conduz a dezenas ou até mesmo centenas de quilowatts, porém com razoável custo de investimento.

A pioneira e grande contribuição dessa proposta de estudo foi apresentada por Andrews e Oakes [5], para fornecer

alimentação a pequenos ranchos e comunidades localizadas no Vale de Innaha nos Estados Unidos. A linha de transmissão, classe de tensão 230 kV, da companhia Idaho Power que atravessa essa região, foi utilizada em um trecho de 43 km, energizado os cabos pára-raios em tensão f-n 40 kV e prestando suprimento de energia elétrica a 50 consumidores locais, cuja demanda diversificada inicial foi tomada como sendo na ordem de 2 kW por consumidor.

Este tipo de sistema de distribuição de energia deve apresentar uma configuração radial que, de certa forma, pode restringir a extensão do circuito formado pelos cabos pára-raios isolados.

É importante considerar que nesta análise as soluções propostas deverão requerer somente componentes e equipamentos convencionais de distribuição de energia, isentando-se de outros mais complexos, a fim de que seja possível providenciar um serviço confiável com um método simples e operacional.

Deve-se também observar que existe relevante compromisso entre os níveis de tensão da linha de transmissão e aquele a ser utilizado na energização dos cabos pára-raios isolados, pois se a linha de transmissão estiver dentro da faixa de extra ou ultra alta-tensão e a tensão dos cabos pára-raios isolados não ultrapassar a classe de tensão 34.5 kV, o transformador abaixador necessário para tal objetivo, apresentaria uma relação de transformação muito alta, podendo inviabilizar economicamente o projeto. Em função do acima exposto, será utilizado no decorrer desta análise, para fins de aplicações reais e práticas, uma linha de transmissão na classe de tensão 138 kV com cabos pára-raios energizados na tensão fase-neutro  $34.5/\sqrt{3}$  kV, como ilustra a

configuração da figura 2.9.

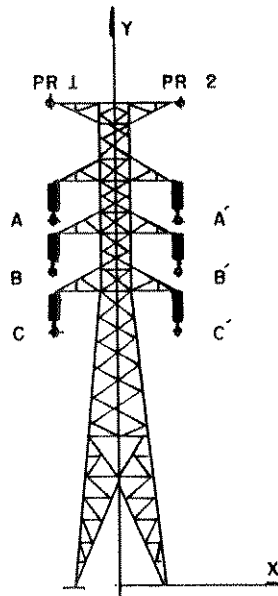


Figura 2.9 - Configuração do sistema de transmissão 138 kV

### 2.3.1 Descrição dos Arranjos Físicos

Serão apresentadas, inicialmente, as propostas de dois arranjos de distribuição de energia, especificamente idealizados para a alimentação apenas de cargas monofásicas. Estes são ilustrados nas figuras 2.10 e 2.11. Na figura 2.10 o retorno da corrente é realizado pela terra, por isto denominado por MRT (Monofásico com Retorno pela Terra). Na figura 2.11 o retorno da corrente é estabelecido através de um cabo metálico, neste caso, o cabo pára-raios da linha. Para facilitar a identificação dos arranjos, na medida em que são mencionados no texto, os arranjos

monofásicos das figuras 2.10 e 2.11 passam a denotar-se de arranjos 1 e 2 .

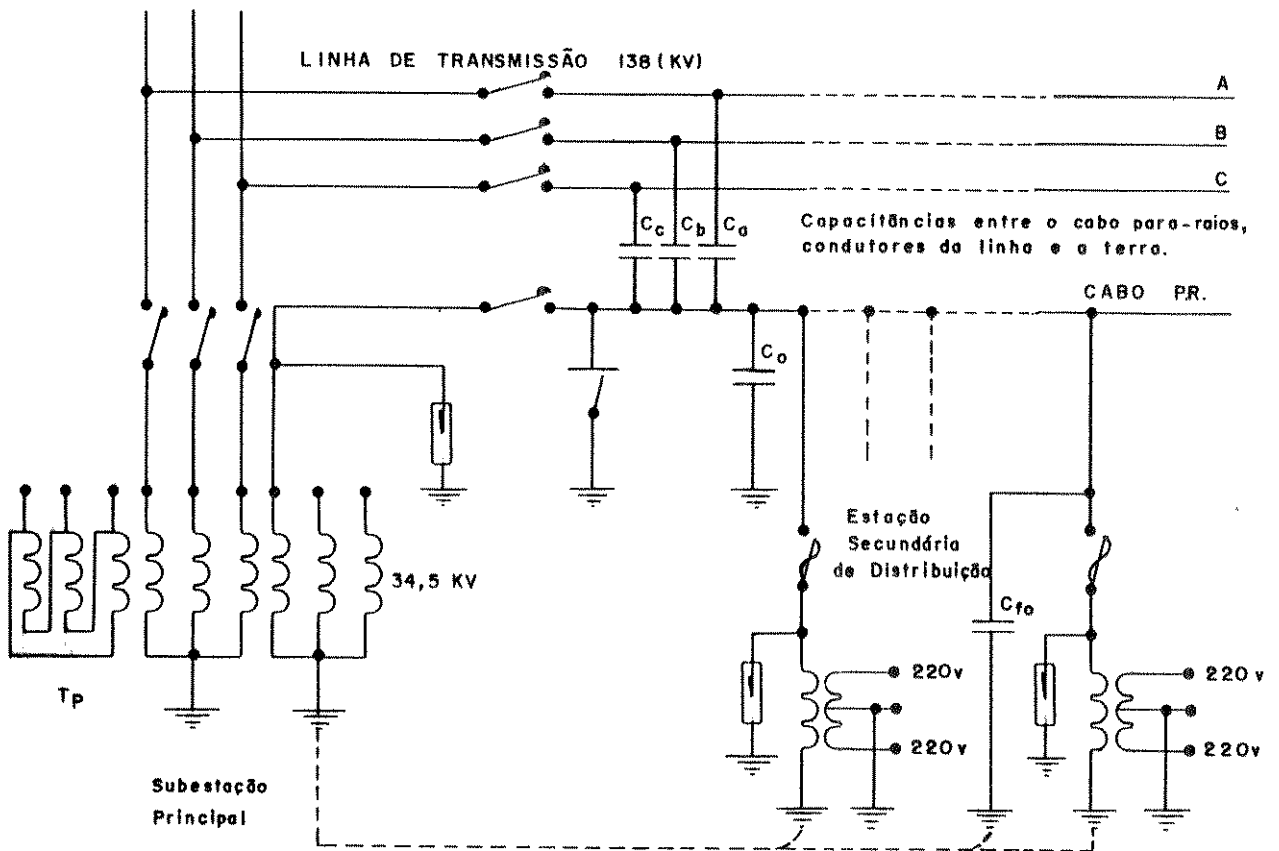


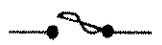

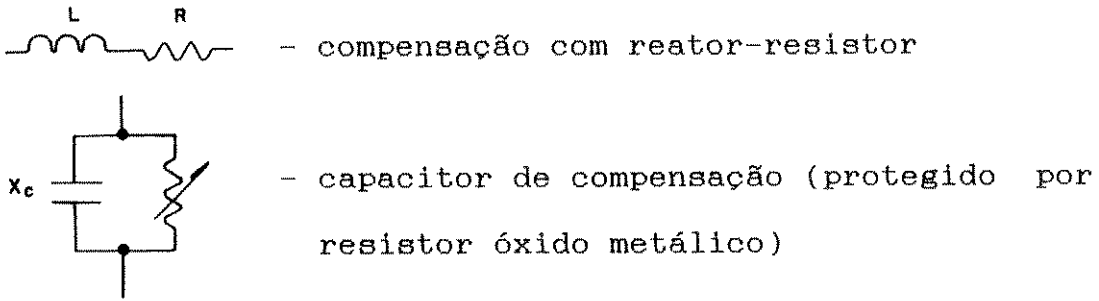


Figura 2.10 - Arranjo "1" monofásico com retorno por terra (MRT)

Simbologia utilizada nas figuras 2.10 a 2.13

-  - disjuntor
-  - pára-raios
-  - chave corta-circuito fusível
-  - seccionadora de aterramento
- $C_{fo}, C_{ff}$  - capacitores de correção de fator de potência e anti-ferro-ressonância





$T_p$  - transformador principal

$T_i$  - transformador de intercalamento

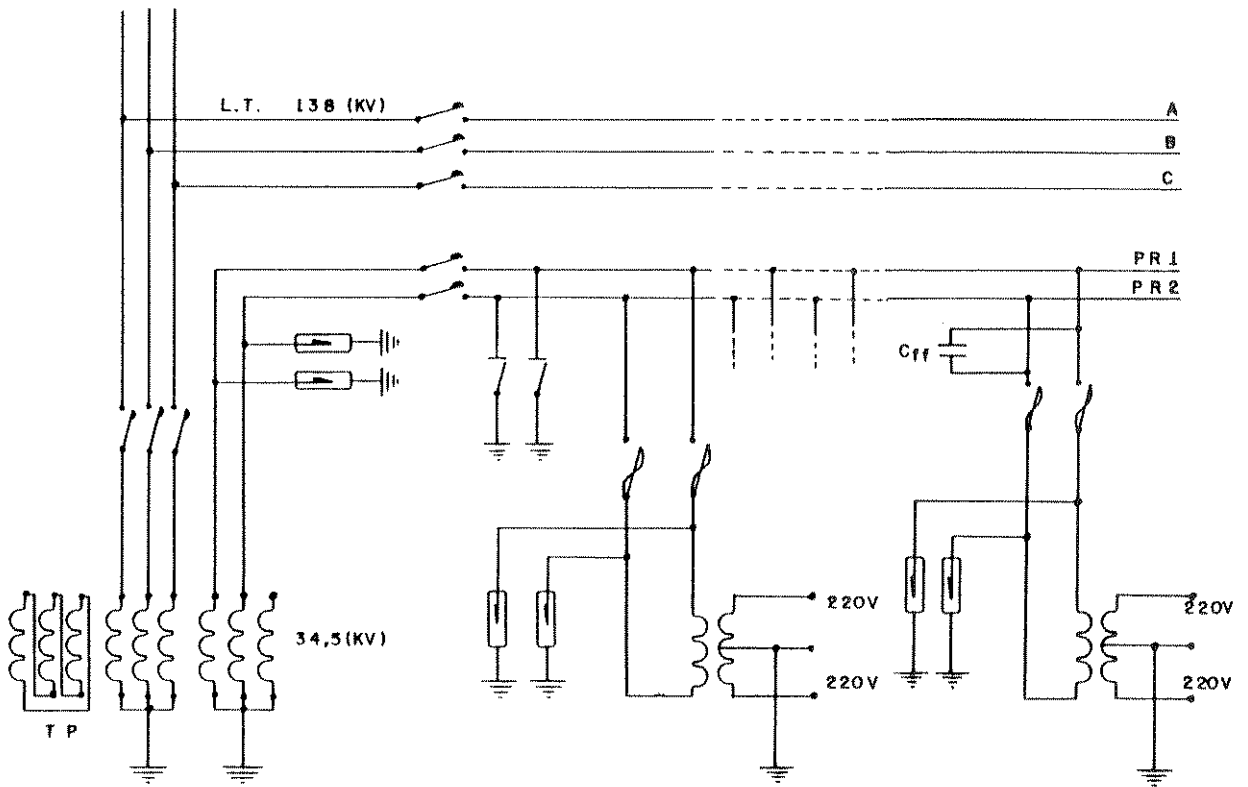


Figura 2.11 - Arranjo "2" monofásico com retorno metálico utilizando cabo pára-raios isolado.

As figuras 2.12 e 2.13 descrevem os arranjos 3 e 4, que diferem dos anteriores pelo fato de poderem alimentar cargas trifásicas e possuírem necessariamente dois cabos pára-raios isolados.

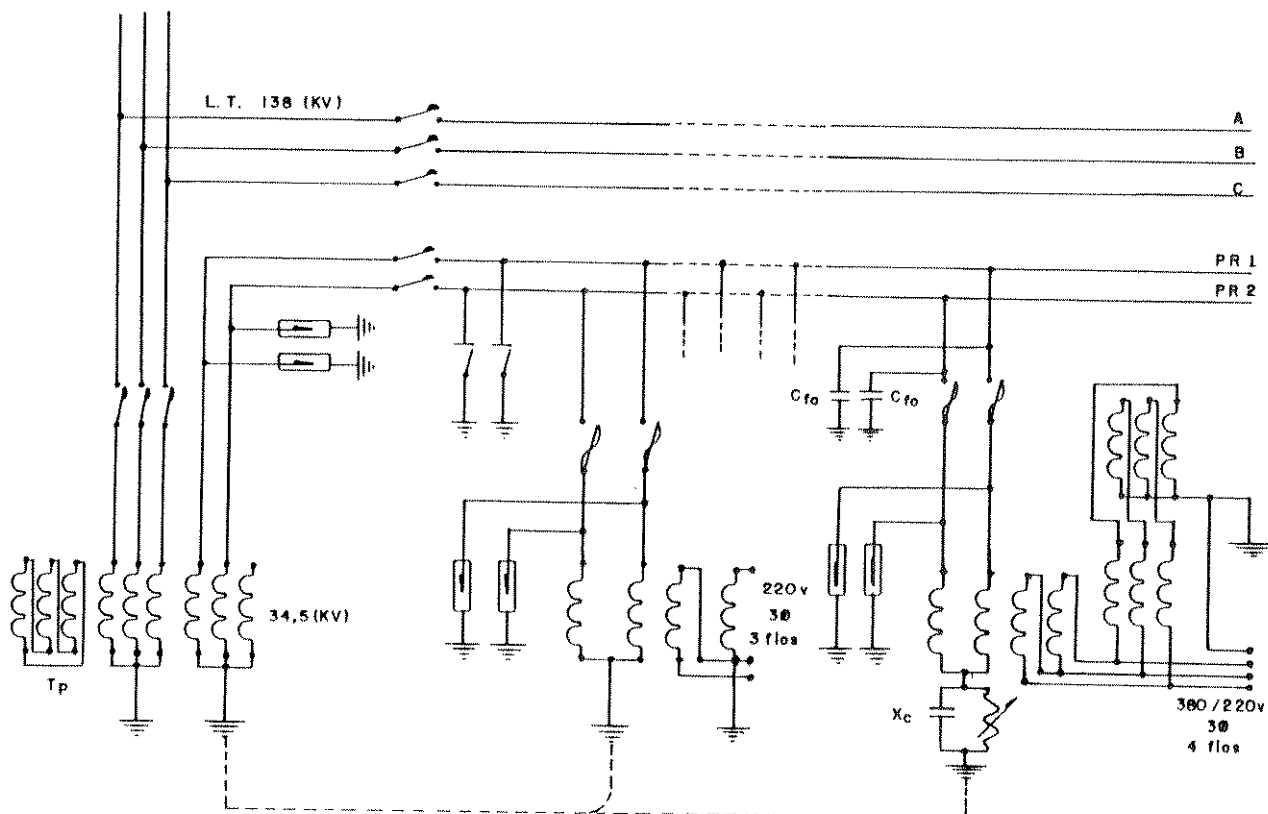


Figura 2.12 - Arranjo "3" utilizando ligação "V" para cargas trifásicas

Observa-se na figura 2.12 que a alimentação de cargas trifásicas é possível através da conexão "V" de transformadores monofásicos no lado de alta e da conexão em delta aberto no lado de baixa tensão. Necessitando da utilização à quatro fios para alimentação de cargas, emprega-se adicionalmente um transformador de aterramento.

Os arranjos de "1" a "4" tiveram seu desenvolvimento a partir de duas diferentes técnicas já realizadas no passado. A utilização de cabos pára-raios isolados, ao longo de linhas de

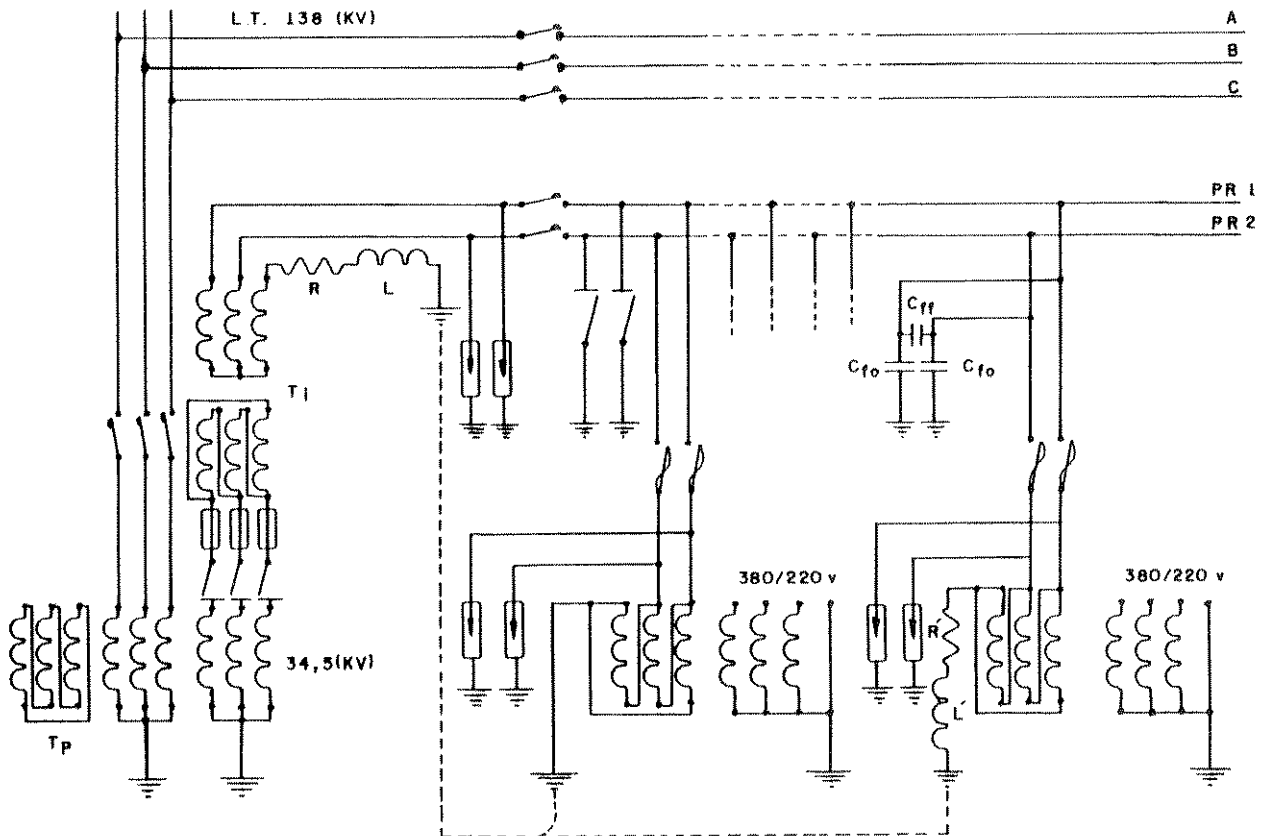


Figura 2.13 - Arranjo "4" para alimentação de cargas trifásicas.

transmissão em EHV que transportam grandes blocos de potência, tem como uma das funções, reduzir as perdas Joule causadas pelas correntes induzidas nos cabos pára-raios constituídos de aço, ACSR ou Alumoweld. A técnica anteriormente mencionada, tem sido usada por russos, americanos, turcos e outros. O emprego de dois cabos pára-raios isolados na montagem de arranjos para alimentação de cargas trifásicas é descrito no trabalho de Yurenkov [8], em 1965. Quanto a aplicação de linhas de distribuição em média tensão com um único condutor e retorno da corrente pela terra, para alimentar pequenas e remotas cargas a certa distância das tradicionais

subestações, o Canadá tem grande experiência no uso deste arranjo [10], embora exista também algumas aplicações em outros países como Austrália, Nova Zelândia e antiga União Soviética.

Os arranjos 1, 3 e 4, que apresentam retorno de corrente pelo solo, são relativamente mais econômicos onde o solo possui baixa ou média resistividade, resultando assim na utilização de pequena quantidade de eletrodos de aterramento e, conseqüentemente envolvendo pequenos custos. No arranjo 1, a corrente de retorno pelo solo é de 1,0 A para cada 20 kVA de carga instalada na tensão f-n  $34.5/\sqrt{3}$  kV. O caminho de retorno pelo solo tem uma resistência muito menor do que um cabo pára-raios e seu valor pode ser calculado através da expressão  $f \cdot \pi^2 \cdot 10^{-4} \Omega/\text{Km}$ , detalhada em [13], resultando na frequência de 60 Hz, uma resistência aproximadamente igual a 0,060  $\Omega/\text{km}$ , equivalente a um cabo de alumínio de seção 484 mm<sup>2</sup>.

Os arranjos 1 e 3, com retorno pelo solo, são exequíveis se os sistemas alimentadores em média tensão, ou seja, os sistemas que alimentam os cabos pára-raios isolados, possuem neutro solidamente aterrado, ou também aterrado através de transformador de aterramento ou reator de baixa impedância. O arranjo 2 com retorno metálico e o arranjo 4 com retorno pelo solo, são utilizados onde a alimentação do circuito em média tensão é realizada com um neutro não aterrado ou aterrado com alta impedância.

O arranjo 2, ilustrado na figura 2.11, não realiza o retorno da corrente pelo solo. Este é exequível se as linhas de transmissão em alta tensão possuem dois pára-raios isolados, a partir dos quais, transformadores de distribuição de média/baixa

tensão são utilizados na derivação de potência. O arranjo 3, necessita também, de dois cabos pára-raios isolados, que devem ser alimentados através de duas fases do circuito de média tensão originado na subestação principal e com neutro aterrado. Nas estações secundárias de distribuição, dois transformadores monofásicos de média/baixa tensão são ligados em cada cabo pára-raios isolado. Os enrolamentos secundários dos transformadores são ligados em conexão delta-aberto, gerando na condição à vazio uma fonte trifásica simétrica, o que torna possível a alimentação de uma pequena quantidade de cargas trifásicas, adionada também, de outras cargas monofásicas.

No arranjo 4, o objetivo é realizar a simetria da linha em média tensão, formada pelos dois cabos pára-raios isolados e o caminho pelo solo, a partir de componentes de compensação simples, tais como um resistor-reator série ( $R'-L'$ ), no caminho pelo solo, e um capacitor ( $C_{ff}$ ) colocado entre os dois cabos pára-raios, conforme indica a figura 2.13. Observa-se ainda dessa figura, que a linha em média tensão não convencional é alimentada com tensões trifásicas simétricas por meio de um transformador de intercalamento ( $T_i$ ), do qual uma fase terminal é aterrada. Dependendo das características da carga, transformadores monofásicos ou trifásicos com um terminal primário aterrado são utilizados ao longo do sistema de distribuição.

### 2.3.2 Considerações de Desempenho dos Cabos Pára-Raios Isolados às Descargas Atmosféricas

Como mencionado anteriormente, neste método de alimentação de cargas, existe a necessidade de isolar os cabos pára-raios das estruturas das linhas de transmissão, quando estes se encontram aterrados às mesmas. Esta situação é encontrada em praticamente todos os sistemas de transmissão aéreos de energia, em operação no Brasil. Entre outras, uma preocupação que se destaca quando da realização de tal tarefa é a continuidade da eficiência do funcionamento dos cabos pára-raios na função de proteção à linha de transmissão contra descargas atmosféricas. A análise de desempenho elétrico quanto às descargas atmosféricas deve ser verificada para a linha de transmissão e para o circuito composto pelos cabos pára-raios isolados alimentados em média tensão. Quanto a este último é necessário comparar o desempenho às descargas atmosféricas e isolamento, com o de um sistema de distribuição convencional de mesma classe de tensão.

Das linhas de transmissão em extra-alta-tensão que possuem cabos pára-raios isolados, sabe-se que a capacidade de proteção praticamente não se altera [14], quando hastes em formas de chifres para extinção de arcos com um pequeno "gap" são montados em cada parte da suspensão dos cabos. O potencial dos cabos pára-raios isolados é muito pequeno em comparação ao potencial de uma descarga líder próxima do solo. Pode-se então, esperar que a eficiência de proteção dos mesmos não será reduzida. Quando descargas atmosféricas caem em um cabo pára-raios ou em uma torre os "gaps" de proteção mais próximos devem emitir centelhas e aterrar o cabo pára-raios através do arco, fazendo com que estes funcionem como se estivessem aterrados. Como o cabo pára-raios está energizado na subestação transformadora, o arco no "gap"

iniciará um curto-circuito para a terra e desta forma o relé de proteção deve atuar e desenergizar o cabo pára-raios da linha, a menos que, a potência do arco rapidamente se auto-extinga, como pode ocorrer quando a corrente de falta for pequena. Este comportamento não deve gerar preocupações, uma vez que é típico em todas as linhas convencionais em média tensão.

Após a abertura do cabo pára-raios na linha, uma corrente de arco secundária pode ainda passear pelo "gap" acionado e esta é mantida através da indução eletrostática (capacitiva) e eletromagnética (indutiva) gerada pelo circuito de alta tensão que compõe a linha de transmissão. A corrente de arco secundária nos "gaps" do isolador deve ser extinta rapidamente para se evitar danos nos equipamentos e permitir a restauração da fonte de potência a partir dos cabos pára-raios isolados.

A altura dos cabos pára-raios isolados de uma linha classe de tensão 138 kV em relação a terra é maior que a dos condutores de uma linha convencional em média tensão. Por este motivo, a taxa de descargas atmosféricas sofre um acréscimo, para um determinado nível de isolamento projetado na linha de transmissão, principalmente devido as seguintes características:

- incidência direta de descargas atmosféricas, por causa da maior faixa de exposição da linha;
- sobretensões induzidas pelas incidências de descargas atmosféricas à terra e próximas a linha, sendo a amplitude da sobretensão aproximadamente proporcional a altura do condutor em relação ao solo.

A configuração da linha de transmissão ilustrada na figura 2.9 apresenta, para a altura média dos cabos pára-raios, cerca de 24 m em relação ao solo e vão médio na ordem de 300 m. A altura dos condutores de fase de uma linha de transmissão convencional classe de tensão 34.5 kV com vão médio de 100 m é aproximadamente 10 m. Este acréscimo de altura média deve provocar um aumento de taxa de descargas atmosféricas de incidência direta na linha de transmissão, com intensidades de correntes que podem variar de 10 kA a 80 kA.

A figura 2.14 apresenta uma distribuição de probabilidades de intensidade de corrente de raios levantada a partir de dados obtidos na estação de mediação do Monte San Salvatore [14].

Observa-se da figura 2.14 que o valor médio (50%) para as primeiras descargas negativas é aproximadamente 30 kA, enquanto as descargas positivas, que são menos frequentes, apresentam um valor médio aproximado de 35 kA. Porém, ainda da figura 2.14, pode ser visto que, enquanto apenas 5% das descargas negativas excedem 80 kA, este valor para as descargas positivas é de 250 kA. As descargas positivas apresentam, portanto, amplitudes muito maiores do que as negativas.

A taxa de descargas devido as sobretensões induzidas, está também, diretamente relacionada com a densidade de raios para a terra (número de raios para a terra por quilômetro quadrado por ano) que por sua vez pode ser obtida a partir do nível cerâmico de cada região. A conversão do nível cerâmico para densidade de descarga para a terra é feita através de um fator de proporcionalidade  $K$  que varia de 0,1 a 0,25, conforme indica a



equação (2.33), havendo uma tendência para a utilização de valores próximos a 0,1.

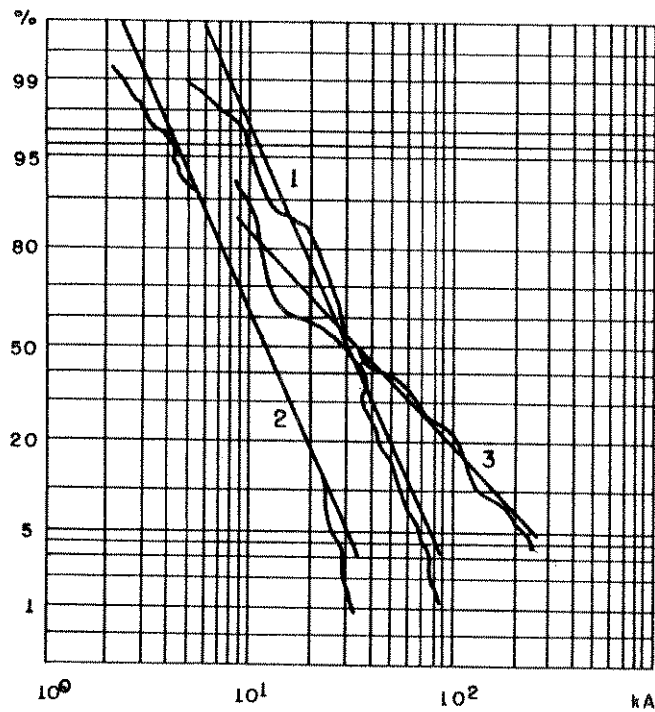
$$N_g = K \cdot C \quad (2.33)$$

onde:

$N_g$  - densidade de raios (raios/km<sup>2</sup>/ano)

K - fator de proporcionalidade

C - nível cerâmico



- 1- Primeiras descargas negativas
- 2- Descargas negativas subsequentes
- 3- Descargas positivas

Figura 2.14 - Distribuição de correntes máximas de descargas atmosféricas.

Portanto, para um determinado nível ceráunico e quando a altura do cabo pára-raios isolado é aumentada de 10 m para 24 m (de uma linha convencional 34.5 kV para uma linha 138 kV) é de se esperar um aumento na taxa de descargas.

Por outro lado, quando se estima o risco de falha de isolamento, deve-se também levar em conta, o fato de se ter os cabos pára-raios na posição mais alta da linha de transmissão de alta tensão, o que pode reduzir as falhas de isolamento causadas por contatos de árvores, galhos crescidos e objetos estranhos, porém, estas faltas nas linhas de transmissão convencionais de média tensão de 34.5 kV, podem contribuir consideravelmente na taxa de desligamento.

Como os cabos pára-raios serão energizados a partir das subestações localizadas ao longo da linha, os mesmos deverão ser isolados, utilizando-se por exemplo uma cadeia de isoladores com disco de vidro temperado ou porcelana, composta de três ou quatro unidades, dependendo da tensão nominal de operação do circuito à cabos pára-raios. A auto-extinção dos arcos gerados na linha, poderá ser realizada através de hastes com abertura ajustável, montadas na cadeia de isoladores conforme indica a figura 2.15.

### 2.3.3 Desempenho dos Arranjos Físicos em Regime Permanente

Uma vez descritos os arranjos que podem ser empregados nessa estratégia, torna-se conveniente apresentar algumas considerações do funcionamento em regime permanente dos mesmos.

Para tal, considere a figura 2.16, que ilustra o

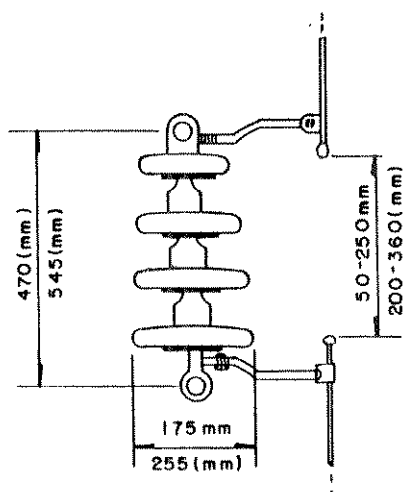


Figura 2.15 - Cadeia de isoladores rígida e típica para a linha dos cabos pára-raios.

circuito equivalente do arranjo da configuração da figura 2.9, levando-se em consideração, apenas o sistema composto pelos cabos pára-raios e a terra.

Sabendo-se que os cabos pára-raios são energizados, procurou-se utilizar para estes, condutores do tipo ACSR ou CAA, cujo material diferente do aço galvanizado pode proporcionar melhores níveis de potência transmitida. Assim, adotou-se um condutor ACSR (CAA) código "Raven" com as seguintes características:

- Raio médio geométrico: 0,00135 m
- Seção Nominal:  $53 \text{ mm}^2$
- Diâmetro Nominal: 10,109 mm

A figura 2.16, indica também, a resistência e reatância indutiva dos cabos pára-raios isolados e energizados, a resistência e reatância indutiva do caminho de retorno pelo solo, admitindo-se

uma resistividade igual a  $100 \Omega \cdot m$ , e as capacitâncias envolvidas. Todos os parâmetros são dados por unidade de quilômetro.

A influência dos condutores fases da linha de transmissão foram desprezados, uma vez que, a tensão induzida nos cabos pára-raios isolados neste sistema de transmissão é muito menor que a tensão nominal de operação no circuito dos cabos pára-raios isolados e energizados, cujo valor é igual a  $34.5 \text{ kV}$ . O caminho de retorno pelo solo tem uma reatância série praticamente igual a reatância dos cabos pára-raios, enquanto, a resistência é muito menor que a resistência dos cabos pára-raios. O circuito pode tornar-se útil na explicação física dos fenômenos que ocorrem principalmente quando os cabos pára-raios são energizados utilizando-se os arranjos 3 e 4.

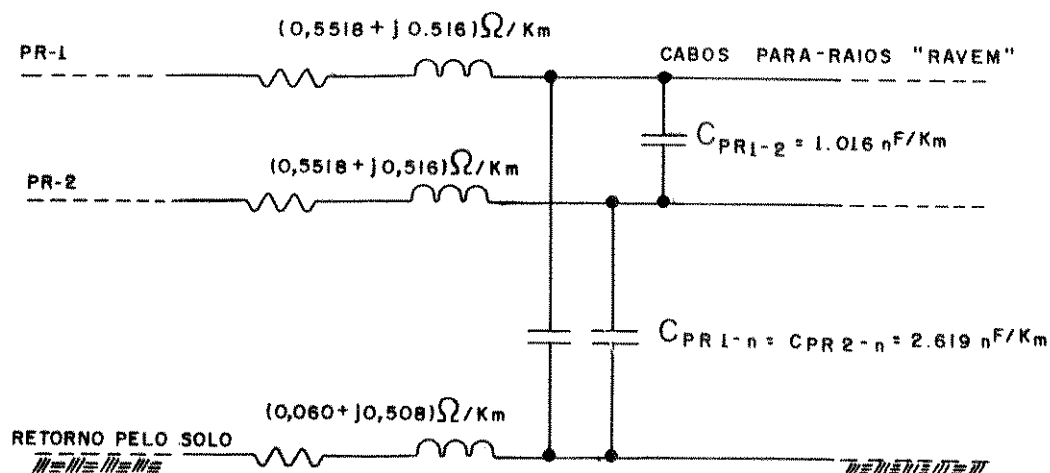


Figura 2.16 - Circuito equivalente composto dos cabos pára-raios isolados e energizados e a terra.

Como se viu anteriormente, sabe-se que uma carga trifásica pode ser alimentada conforme se observa no arranjo 3 [8]

e ilustrado na figura 2.12, isto é, por meio de transformadores conectados no secundário em delta aberto. Entretanto, esta carga é limitada pela componente de sequência negativa da tensão  $V_2$  que pode causar sobre-aquecimentos em motores de indução. Pode-se admitir, para o arranjo 3, que os cabos pára-raios são energizados através de um sistema simétrico, isto é, com tensões eficazes fase-neutro de valores iguais e defasadas de  $120^\circ$ . Se as correntes ao longo dos cabos pára-raios isolados e energizados possuem as mesmas intensidades e defasamentos iguais em relação aos vetores de tensão fase-neutro, o fasor queda de tensão na impedância série de cada cabo pára-raios terá o mesmo valor eficaz e defasamento de  $120^\circ$ . Nestas condições, se a impedância de retorno pelo solo for nula, as tensões dos cabos pára-raios em relação a terra podem manter um mesmo valor eficaz e defasamento constante de  $120^\circ$ , em qualquer ponto ao longo da linha de transmissão, como as tensões aplicadas no terminal emissor. Portanto, se a impedância de retorno pelo solo torna-se zero, por meio de algum método e, as cargas que serão alimentadas a partir da subestação principal, forem divididas igualmente em duas cargas monofásicas ramificadas entre cada cabo pára-raios e a terra, as tensões trifásicas obtidas nos secundários dos transformadores de distribuição conectados em delta aberto, à vazio, permanecem simétricas, independente do valor das cargas monofásicas alimentadas pelos cabos pára-raios. Para que os aspectos acima mencionados tornem-se resultados práticos é necessário compensar a impedância equivalente do caminho de retorno pelo solo. Desta forma, deve-se procurar analisar as duas componentes da impedância do caminho de retorno pelo solo. A parte resistiva, já mostrada

anteriormente, é pequena, sendo suficiente compensar apenas a reatância indutiva. Esta compensação, pode ser realizada através da ligação de capacitores entre o neutro da conexão "V" dos transformadores e a terra, observado na figura 2.12. A reatância capacitiva é, portanto, selecionada com o propósito de compensar a queda de tensão na reatância do caminho de retorno pelo solo, particularmente no local onde cargas trifásicas estão instaladas.

Se a linha constituída dos cabos pára-raios isolados, alimentar somente cargas localizadas no final receptor deste ou se várias cargas são derivadas ao longo da linha e variarem proporcionalmente mantendo o fator de potência constante, o capacitor ligado no neutro e terra deve fornecer uma compensação exata para a queda de tensão reativa. Porém, se as cargas não estiverem nestas condições a compensação deverá ser aproximada. Os capacitores destinados ao objetivo anteriormente assinalado, devem ter pequena capacidade e serem protegidos, preferencialmente, por um resistor óxido metálico colocado em paralelo com o mesmo. Se a carga total e as cargas trifásicas ligadas em um arranjo 3 forem consideradas modestas, é possível limitar o desequilíbrio, mesmo sem utilizar os capacitores de compensação.

Concentrando a atenção sobre o arranjo 4, na tentativa de se proceder a análise do mesmo, considere a figura 2.13. Neste, o conjunto dos cabos pára-raios e o caminho de retorno pelo solo formam um circuito trifásico que é desbalanceado. Um trecho da linha de média tensão dos cabos pára-raios, pode tornar-se simétrico, compensando-se a impedância série desequilibrada da linha através de um resistor-reator colocado no caminho da terra (parâmetros R e L na figura 2.13) e pela inserção de um capacitor

$C_{ff}$  entre os dois cabos pára-raios, a fim de aumentar a capacitância cabo a cabo para um valor próximo da capacitância cabo-terra, uma vez que, esta última é maior que as anteriores, no circuito equivalente dos cabos pára-raios e caminho de retorno pelo solo, conforme ilustra a figura 2.16. O resistor-reator série pode ser inserido no caminho de retorno pelo solo no terminal emissor da linha de média tensão e no terminal receptor dos transformadores de média/baixa tensão, localizados nas vilas que serão abastecidas.

Para alimentar uma linha trifásica composta de dois cabos pára-raios e um terceiro condutor como sendo a terra, com tensões simétricas, é necessário utilizar-se um transformador de intercalamento. Uma possível ligação está indicada no esquema 4 da figura 2.13.

No arranjo 4 ou trifásico, as cargas trifásicas são alimentadas pelos transformadores de média/baixa tensão ligados de forma convencional, isto é, em delta-estrela aterrado ou em estrela/zig-zag aterrado e devem ser projetados para funcionar em operação contínua com um terminal primário aterrado e os outros terminais com uma tensão em relação à terra, igual a tensão fase-fase.

No arranjo 4, existe também, a possibilidade da alimentação de cargas monofásicas, e quando esta condição se efetuar, a carga é suprida por transformadores monofásicos, que devem ser ligados entre as fases dos cabos pára-raios, a fim de se obter uma carga balanceada. Entretanto, como a linha não tem neutro, é necessário conectar parte dos transformadores entre os dois cabos pára-raios, requerendo desta forma transformadores com

duas buchas no lado de média tensão.

Comparando o arranjo 3 e arranjo 4, este último apresenta algumas desvantagens, entre as quais, pode-se destacar:

- A tensão do cabo pára-raios em relação à terra é igual a tensão cabo-cabo e portanto uma maior isolação é necessária na linha e nos equipamentos da subestação;

- O transformador de intercalamento trará investimentos adicionais com maiores perdas de potência, quedas de tensão e possíveis riscos de falha como em qualquer outro transformador usual;

- O resistor de compensação, R, deve causar perdas de potência não desprezíveis.

Convém observar que, caso for utilizado apenas os arranjos 1 e 2 que fornecem os sistemas de alimentação monofásicos, MRT e a dois fios, é possível o suprimento de cargas trifásicas a partir do uso de conversores rotativos monofásicos.

Os tipos de condutores que podem ser utilizados como cabos pára-raios são: Alumoweld, Alumínio-Aço (ACSR) e o aço galvanizado. O critério de escolha do mesmo deve atender a um estudo seletivo, levando-se em consideração, alguns fatores importantes na análise em regime permanente e transitória, entre as quais pode-se mencionar: desempenho mecânico, corrosão, perdas, capacidade de transmissão, capacidade de suportar correntes de curto-circuito e custos de instalação.

Como em qualquer sistema de transmissão de energia elétrica, o sistema simplificado constituído dos cabos pára-raios, também merece um amplo estudo das sobretensões que o sistema pode



ficar sujeito. Quanto a este aspecto, podem ocorrer sobretensões temporárias, tais como: ferro-ressonância, que pode surgir quando o disjuntor que alimenta os cabos pára-raios na origem do suprimento, estiver aberto; sobretensões induzidas pelas correntes de curto-circuito originadas na linha de transmissão em alta tensão; sobretensões devido a contatos entre os cabos pára-raios energizados e um condutor fase do circuito de alta tensão (embora de pequena probabilidade, mas não desprezível). Há ainda, as sobretensões de chaveamento (transitórias) que afetam os esquemas de distribuição à cabos pára-raios durante a energização dos próprios cabos ou do circuito de alta tensão. Sobretensões transitórias podem também ser induzidas nos cabos pára-raios quando ocorrer curto-circuitos no circuito de alta tensão.

Os arranjos 1, 3 e 4 utilizam em seu funcionamento correntes, com caminho pelo solo. Este fato resulta em uma grande preocupação e o adequado estudo a ser dado ao sistema de aterramento nesses sistemas. Os eletrodos de aterramento e o fluxo contínuo de corrente através do solo devem ser observados quanto a tensão de passo e toque, aquecimento do solo e interferências em linhas telefônicas. As soluções destas questões não devem ser difíceis em função dos pequenos valores do fluxo de corrente em cada estação transformadora de média/baixa tensão, como também pelas grandes dimensões do sistema de aterramento das subestações de alta tensão, onde flui maiores correntes.

É necessário evitar o ressecamento da terra nas proximidades do eletrodo, pois pode ocorrer um aumento descontrolado da resistência, resultando em instabilidade térmica.

Se a corrente pelo solo for igual a 10 A ou 50 A, (isto

equivale a estações transformadoras com capacidade de 200 kVA ou 1000 kVA em  $34.5/\sqrt{3}$  kV), e considerando um potencial de eletrodo de 50 V, a resistência de aterramento limite será de 5  $\Omega$  ou de 1 $\Omega$ , respectivamente. Neste caso, as correspondentes tensão de passo e toque serão pequenas (usualmente uma pequena fração de 50 V).

Até 1982 o valor máximo de resistência de aterramento dos transformadores estava fixado em 10  $\Omega$  para o sistema 34.5 kV e 20  $\Omega$  para 13.8 kV.

Este critério revelou-se totalmente seguro, mas por outro lado, conduzia a custos relativamente elevados, principalmente quando a resistividade do solo não apresentava valores favoráveis.

Com base em estudo elaborado pela ELETROBRAS foi realizada uma nova reavaliação deste critério, passando-se a adotar os valores máximos de resistência de aterramento indicados na tabela 2.3.

Existe uma tendência das empresas distribuidoras de energia a estender os mesmos valores máximos de resistências de aterramento adotados para os transformadores de potência mais elevadas aos de menor potência. A LIGHT e a CELPE definem valores mais próximos ao recomendado pela ELETROBRAS. A CESP não estabelece valores limites para a resistência de aterramento, controlando ao invés deste parâmetro, os níveis de potenciais de superfície ao redor do aterramento.

Tabela 2.3 - Valores máximos de resistência de aterramento ( $\Omega$ )

EMPRESA	TENSÃO (kV)	TRANSFORMADORES (kVA)				
		3	5	10	15	25
ELETROBRAS	$13.8/\sqrt{3}$	71	42.5	21.2	14.2	8.5
CEEE	$13.8/\sqrt{3}$	-	20	20	20	10
CELPE	$13.8/\sqrt{3}$	65	40	20	15	-
LIGHT	$13.8/\sqrt{3}$	-	42.5	21.2	14.2	8.5
ELETROBRAS	$34.5/\sqrt{3}$	100	100	53.1	35.4	21.2
COPEL	$34.5/\sqrt{3}$	50	50	50	33	20
LIGHT	$34.5/\sqrt{3}$	-	100	53.1	35.4	21.2
CESP	(1)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

(1) - Tensões  $13.8/\sqrt{3}$  e  $34.5/\sqrt{3}$  kV.

(2) - verifica os valores de potenciais.

#### 2.3.4 Considerações de Custos

Após os esclarecimentos de ordem técnica, uma questão que merece ser enfocada pela sua importância e pelo fato de avaliar o investimento financeiro a ser empregado nesta estratégia de derivação de potência, inclusive de forma comparativa com outros sistemas de distribuição de energia, é o custo estimado da instalação.

Para analisar e estimar os custos envolvidos nesta proposta de arranjo de distribuição de energia, utilizando-se os cabos pára-raios isolados e energizados das linhas de transmissão em alta tensão, é preciso, a princípio, considerar nesta avaliação uma série de fatores. Para sistemas de transmissão que

se encontram em funcionamento, operando normalmente, no que se refere apenas ao circuito de média tensão, haveria a necessidade de se isolar das estruturas os cabos pára-raios já existentes, quando estes estiverem aterrados no trecho a ser utilizado para o abastecimento das virtuais cargas existentes, e providenciar na subestação mais próxima a geração do nível de tensão necessário à alimentação dos cabos pára-raios isolados. Dependendo do tipo de configuração do sistema de transmissão e da classe de tensão, o preço de lançamento de condutor por quilômetro pode estar sujeito a grandes variações. Através da coleta de preços realizada junto à Companhia Energética de São Paulo - CESP, no que tange a materiais e equipamentos utilizados em redes e linhas de distribuição convencionais, nível de tensão 13.8 kV, e da mão de obra empreitada, procurou-se na tabela 2.4 ilustrar o custo total envolvido, em dólares, na construção do sistema apresentado no arranjo 1 e correspondente a figura 2.10.

Admitindo-se que a extensão total do sistema à cabos pára-raios isolado e energizado, referente a tabela 2.4, tenha 50 km, somente o custo envolvendo o lançamento de dois cabos pára-raios e os respectivos isoladores com hastes de extinção de arco em cada estrutura do sistema, demandará nesse trecho, o total de US\$ 46900,00 (adotando-se vão médio de 200 m). Deve-se observar que em regra geral, as empresas de montagem de linhas de transmissão incluem ainda nos seus custos multiplicadores de taxas incidentes, relativas a fatores de supervisão de mão de obra, de engenharia e inspeção e de contingência, não levados em consideração na elaboração da tabela 2.4. Pode-se também registrar que, no relatório de estudo de pré-instalação do sistema de

transmissão em CA de Itaipú, realizado pela Eletrobrás, o custo global de instalação dos cabos pára-raios, considerando estes aterrados e isolados com transposição, foi de US\$ 1407,00 e US\$ 1578,00 por quilômetro, respectivamente, sem considerar o custo do próprio cabo, admitindo-se uma linha à circuito simples e com as taxas incidentes incluídas.

Tabela 2.4 - Custo total de uma instalação arranjo 1  
Capacidade 20 kVA

MATERIAIS/EQUIPAMENTOS	CUSTO POR UNIDADE
Transformador Mono 20 kVA/19900/230 V	561,00
Pára-Raios Distribuição	61,00
Chave Corta-Circuito Fusível	51,80
Chave Seccionadora tipo Faca Mono	172,70
Isolador com Arcing Horns	21,80
<b>MÃO DE OBRA NAS ATIVIDADES</b>	
Transformador	140,80
Pára-raios	12,80
Chave Unipolar	16,60
Poste Distribuído	38,40
Equipamento Unipolar	85,20
Lançamento de Condutor	(*)
<b>TOTAL (US\$)</b>	<b>1162,10</b>

(\*) O valor de lançamento do condutor é estipulado, neste nível de tensão, em US\$ 360,00/km.

Tratando-se de montagem completa, com todas as despesas incluídas, das linhas de transmissão tradicionais na classe de tensão 34.5 kV, o custo global para a mesma é cerca de US\$ 25000,00 por quilômetro.

Se houver necessidade de se efetuar a aquisição dos cabos pára-raios para posterior instalação, a tabela 2.5 indica os custos por quilômetro para os principais tipos de cabos utilizados para esse fim, com várias bitolas.

Para a mesma extensão de 50 km, citada anteriormente, do circuito a cabos pára-raios isolado, se for necessário realizar a aquisição dos dois cabos pára-raios e supondo que será utilizado cabo alumoweld 7 nº 8 AWG, o custo destes cabos resultará em US\$ 115200,00.

Em vista do exposto, verifica-se que, na análise da estimativa do custo da instalação é importante o conhecimento e consideração de todos aqueles fatores, para uma avaliação mais exata e orientada no sentido da busca de resultados mais próximos da realidade.

Tabela 2.5 - Custo total dos cabos ACSR, aço EHS e alumoweld

TIPO DE CABO	CUSTO DO CABO [US\$]
ACSR	
101.8 MCM - 12/7	1003,00
110.8 MCM - 12/7	1091,00
134.6 MCM - 12/7	1326,00
159.0 MCM - 12/7	1568,00
176.9 MCM - 12/7	1743,00
190.8 MCM - 12/7	1882,00
211.3 MCM - 12/7	2082,00
336.4 MCM - 30/7	2082,00
AÇO EHS	
5/16" - 7 fios	819,00
3/8" - 7 fios	1091,00
7/16" - 7 fios	1596,00
1/2" - 7 fios	2060,00
3/4" - 19 fios	4618,00
ALUMOWELD	
7 nº 9 AWG	913,00
7 nº 8 AWG	1152,00
7 nº 7 AWG	1451,00
7 nº 6 AWG	1832,00
7 nº 5 AWG	2308,00
19 nº 7 AWG	3957,00

## 2.4 DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO ACOPLAMENTO DOS CABOS PÁRA-RAIOS ISOLADOS

Nesta técnica, utiliza-se o acoplamento eletrostático dos condutores da linha de transmissão e cabo pára-raios isolado, para extração de energia deste último.

Tendo em vista ser esta a solução a ser enfocada com maiores detalhes nesta tese, os estudos pertinentes a esta proposta serão objeto do capítulo 3.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Das estratégias analisadas, verificou-se a possibilidade da utilização destas para suprimento à pequenas cargas.

O divisor de tensão capacitivo fornece uma fonte de potência elétrica bastante razoável, para a alimentação de cargas rurais típicas, embora, apresente algumas restrições na alimentação de cargas com grandes potências nominais ou com o uso preponderante de cargas indutivas.

A regulação de tensão sugerida é a mais simples. Utiliza-se uma indutância de controle colocada no lado primário ou secundário do transformador. Deve-se observar que na adoção desta técnica de regulação, principalmente no uso da primeira sugestão, é preciso preocupar-se com o valor obtido para a indutância de controle resultante dos cálculos de projeto, uma vez que, nem sempre estes e os valores encontrados em mercado são compatíveis.



Não se conhece, até o momento, instalações deste tipo que estejam operando no país, porém, estão em funcionamento em outros países.

A localização da instalação do divisor de tensão capacitivo e transformador abaixador, podem ser diferentes, se houver necessidade, e separados por alguns quilômetros. Para tanto, é preciso, que a tensão primária disponível leve em conta a ocorrência das possíveis perdas e os eventuais problemas de regulação.

A derivação de potência através de cabos pára-raios isolados e energizados, é também, uma técnica que não apresenta nenhuma experiência operativa no Brasil.

Os principais aspectos de funcionamento em regime permanente para as quatro propostas de arranjo foram apresentados e indicam que incentivos devem ser investidos para a aplicação efetiva desta estratégia derivativa. Verifica-se ainda que, este procedimento pode alimentar cargas com potências nominais maiores que o divisor de tensão capacitivo, apesar de seu custo ser superior ao anterior, dependendo do tipo de arranjo.

Dos arranjos 1,2,3 e 4 ilustrados nas figuras 2.10 a 2.14, nota-se a importância que deve ser dada ao projeto dos sistemas de aterramento para um perfeito funcionamento dos mesmos.

## CAPÍTULO 3

### DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA ATRAVÉS DO ACOPLAMENTO ELETROSTÁTICO

#### 3.1 INTRODUÇÃO

O capítulo 2 enfocou diferentes estratégias para a obtenção alternativa de energia elétrica para a alimentação de pequenas cargas existentes ao longo e nas proximidades das linhas de transmissão. Neste capítulo apresenta-se uma proposta de derivação de potência utilizando um condutor isolado próximo à linha de transmissão e através do acoplamento capacitivo entre condutores obtém-se energia suficiente no condutor isolado para suprimento de pequenas cargas.

Concentrando-se as atenções na indução eletrostática, procurar-se-á mostrar as principais etapas dos desenvolvimentos matemáticos correspondentes, propor um procedimento para a análise do comportamento de um condutor isolado face a uma série de variações das condições da linha principal, verificar e comparar a influência dos campos elétrico e magnético sobre o condutor isolado e, finalmente, analisar os efeitos da variação de determinados parâmetros do sistema de transmissão sobre a tensão induzida no condutor isolado e na capacitância equivalente vista a partir do mesmo. Estas considerações serão feitas para as

principais configurações de sistemas de transmissão em corrente alternada utilizadas no Brasil.

## 3.2 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

As configurações básicas dos sistemas de transmissão e condutor isolado que serão utilizadas para análise e comparação de resultados, são ilustradas nas figuras 3.1 a 3.6. Tais arranjos são aqueles tipicamente empregados pelas Empresas ou Concessionárias de energia elétrica.

A disposição dos condutores é definida em relação a um sistema de coordenadas, tendo o plano de terra como referência do eixo horizontal  $x$  e o eixo de simetria da torre como referência do eixo vertical  $y$ , como indicado na figura 3.1. Tal procedimento, se justifica, para a utilização do programa elaborado e obtenção dos parâmetros elétricos desejados.

### 3.2.1 Sistemas de Transmissão 1 e 2

Os sistemas de transmissão 1 e 2 são tipicamente empregados para a classe de tensão de 138 kV. A primeira constituída por uma estrutura de concreto armado, circuito simples em forma de lençol horizontal, enquanto que a estrutura da figura 3.2 é formada por um circuito duplo com disposição das fases em forma vertical e estrutura de aço do tipo auto-portante.

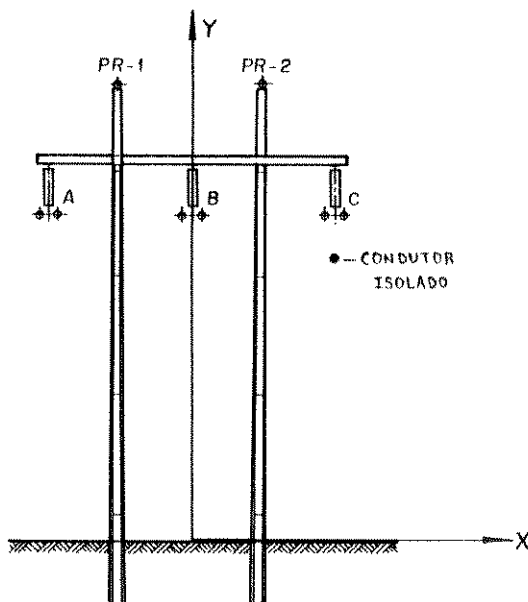


Figura 3.1 - Configuração do sistema de transmissão 1

Para o condutor isolado, será adotado duas situações diferentes na análise. Uma delas, consiste em considerar como condutor isolado um novo condutor adicionado às configurações dos sistemas de transmissão, alojado em local previamente determinado e estrategicamente adequado, na outra utilizar-se-á como condutor isolado um dos cabos pára-raios da própria linha, isolando-o das estruturas quando estiver multiterrado nas mesmas.

Os principais dados e características básicas dos sistemas de transmissão 1 e 2 a condutor isolado, encontram-se descritos nas tabelas 3.1 a 3.4

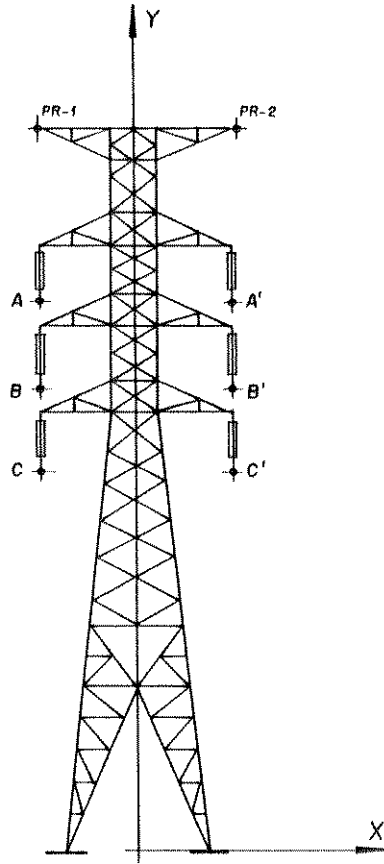


Figura 3.2 - Configuração do sistema de transmissão 2

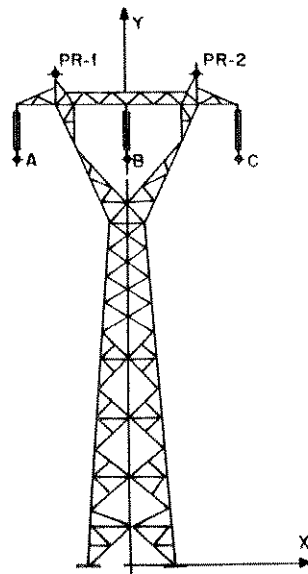


Figura 3.3 - Configuração do sistema de transmissão 3

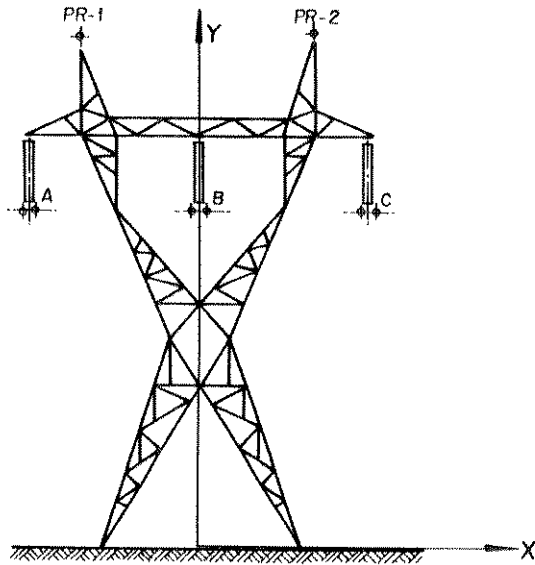


Figura 3.4 - Configuração do sistema de transmissão 4

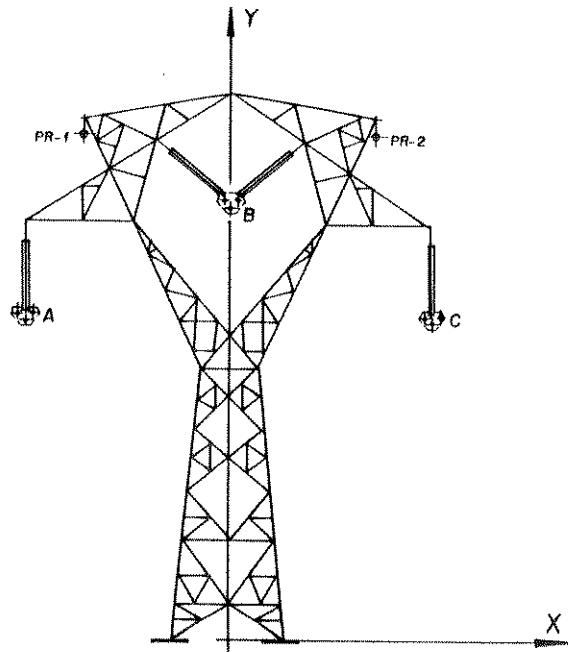


Figura 3.5 - Configuração do sistema de transmissão 5

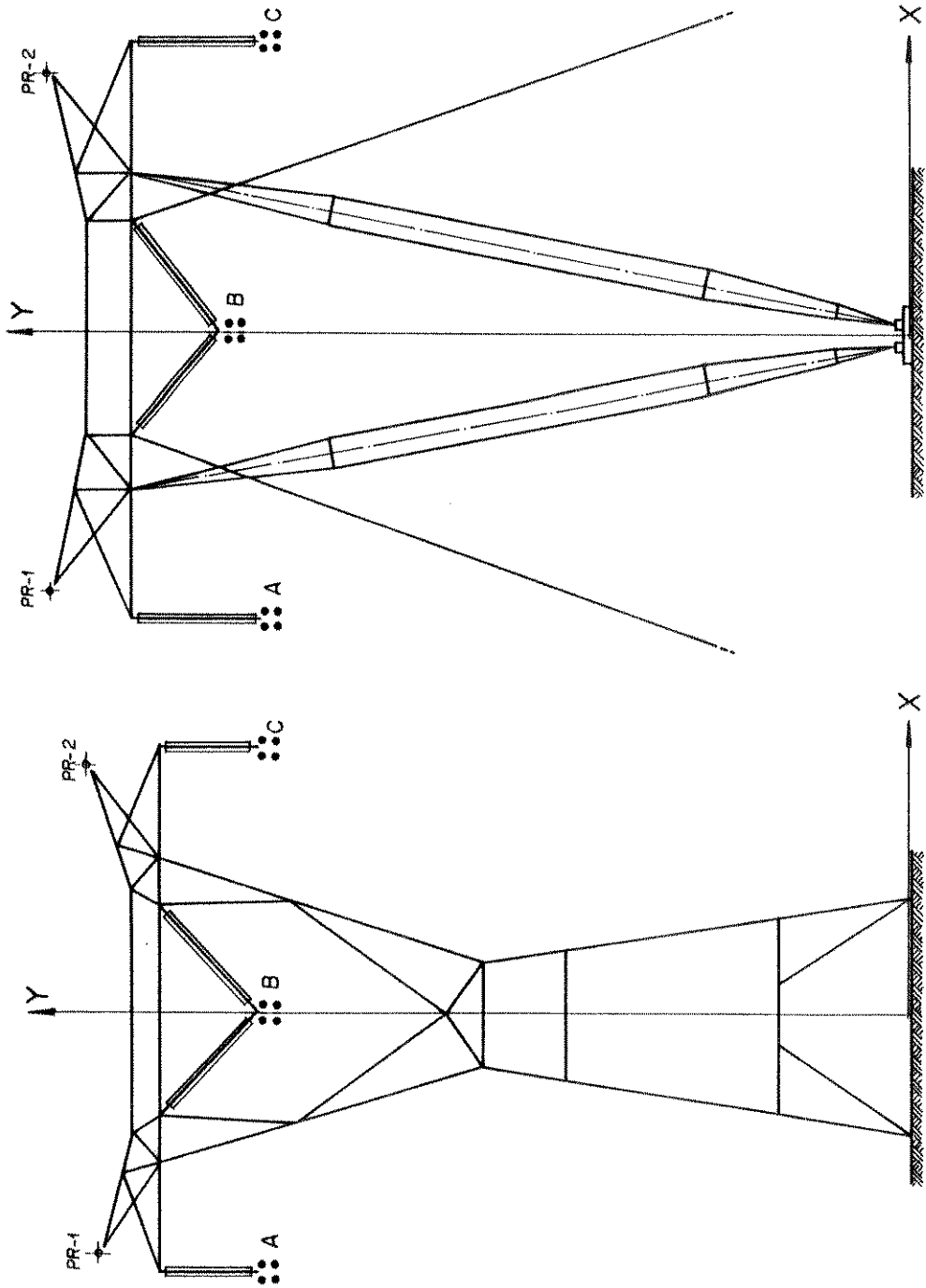


Figura 3.6 - Configuração do sistema de transmissão 6

Tabela 3.1 - Dados da sistema de transmissão 1 e condutor isolado

## CABOS CONDUTORES :

-NOME= PENGUIN BITOLA= 107.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .3679 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .007150 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .002480 m  
-CONDUTORES MULTIPLOS= 2 ESPACAMENTO= .400 m

## CABOS PARA-RAIOS :

-NOME= EHS BITOLA= 42.1 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 2.4850 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .003970 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .90459E-04 m  
-NUMERO DE CABOS PARA-RAIOS= 2

## CABOS ISOLADOS :

-NOME= PENGUIN BITOLA= 107.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .3679 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .007150 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .24800E-02 m  
-NUMERO DE CABOS ISOLADOS= 1  
-COMPRIMENTO DO CONDUTOR= 10 km



Tabela 3.2 - Dados do sistema de transmissão 1 e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO= 100. Ohm x m

NUMERO DE CIRCUITOS= 1

FLECHA DOS CONDUTORES= 6.500 m

FLECHA DOS CABOS PARA-RAIOS= 6.000 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS= 6.500 m

FREQUENCIA DO SISTEMA= 60.00 Hertz

COORDENADAS	DO	CIRCUITO 1
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-4.50	12.00
FASE B	.00	12.00
FASE C	4.50	12.00

COORDENADAS	DOS	PARA-RAIOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-2.25	16.00
PR- 2	2.25	16.00

COORDENADAS	DOS	CONDUTORES ISOLADOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 6	4.50	10.50

Tabela 3.3 - Dados do sistema de transmissão 2 e condutor isolado

CABOS CONDUTORES :

-NOME= PARTRIDGE BITOLA= 135.0 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .2393 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .008153 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .006610 m  
 -CONDUTORES MULTIPLOS= 1 ESPACAMENTO= .000 m

CABOS PARA-RAIOS :

-NOME= HS BITOLA= 127.0 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .006350 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .62800E-09 m  
 -NUMERO DE CABOS PARA-RAIOS= 1

CABOS ISOLADOS :

-NOME= HS BITOLA= 127.0 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .006350 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .62800E-09 m  
 -NUMERO DE CABOS ISOLADOS= 1  
 -COMPRIMENTO DO CONDUTOR= 10 km

Tabela 3.4 - Dados do sistema de transmissão 2 e condutor isolado

RESISTTIVIDADE DO SOLO= 100. Ohm x m  
 NUMERO DE CIRCUITOS= 2  
 FLECHA DOS CONDUTORES= 6.500 m  
 FLECHA DOS CABOS PARA-RAIOS= 6.000 m  
 FLECHA DOS CABOS ISOLADOS= 6.000 m  
 FREQUENCIA DO SISTEMA= 60.00 Hertz

COORDENADAS DO CIRCUITO 1		
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-3.00	17.50
FASE B	-3.00	21.30
FASE C	-3.00	25.10

COORDENADAS DO CIRCUITO 2		
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	3.00	17.50
FASE B	3.00	21.30
FASE C	3.00	25.10

COORDENADAS DOS PARA-RAIOS		
	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-3.00	29.00

COORDENADAS DOS CONDUTORES ISOLADOS		
	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 8	3.00	29.00

### 3.2.2 Sistemas de Transmissão 3 e 4

Os sistemas de transmissão 3 e 4 são constituídos de estruturas de aço do tipo auto-portante e estão associados as classes de tensão de 230 kV e 345 kV, respectivamente. Das correspondentes figuras verifica-se que as mesmas possuem circuito simples em forma de lençol horizontal e dois cabos pára-raios. Os principais dados e características básicas dos sistemas de transmissão 3 e 4 a condutor isolado encontram-se descritos nas tabelas 3.5 a 3.8.

### 3.2.3 Sistemas de Transmissão 5 e 6

Os sistemas de transmissão 5 e 6 são constituídos de estruturas de aço com torres do tipo rígida e estaiada. Tais arranjos são tipicamente empregados para as classes de tensão 500 kV e 750 kV, respectivamente, e são formados por circuitos simples com dois cabos pára-raios. Os principais dados e as características básicas para estes sistemas de transmissão a condutor isolado encontram-se descritos nas tabelas 3.9 a 3.12.

Tabela 3.5 - Dados do sistema de transmissão 3 e condutor isolado

CABOS CONDUTORES:

-NOME= GROSBEAK BITOLA= 322.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .1005 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .012573 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .010210 m  
-CONDUTORES MULTIPLOS= 1 ESPACAMENTO= .000 m

CABOS PARA-RAIOS :

-NOME= HS BITOLA= 127.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .006350 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .60628E-08 m  
-NUMERO DE CABOS PARA-RAIOS= 1

CABOS ISOLADOS :

-NOME= HS BITOLA= 127.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .006350 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .60628E-08 m  
-NUMERO DE CABOS ISOLADOS= 1  
-COMPRIMENTO DO CONDUTOR= 10 km

Tabela 3.6 - Dados do sistema de transmissão 3 e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO= 100. Ohm x m

NUMERO DE CIRCUITOS= 1

FLECHA DOS CONDUTORES= 9.700 m

FLECHA DOS CABOS PARA-RAIOS= 9.000 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS= 9.000 m

FREQUENCIA DO SISTEMA= 60.00 Hertz

COORDENADAS	DO	CIRCUITO 1
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-7.80	23.50
FASE B	.00	23.50
FASE C	7.80	23.50

COORDENADAS	DOS	PARA-RAIOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-5.20	28.50

COORDENADAS	DOS	CONDUTORES ISOLADOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 5	5.20	28.50

Tabela 3.7 - Dados do sistema de transmissão 4 e condutor isolado

CABOS CONDUTORES :

-NOME= GROSBEAK BITOLA= 322.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .1005 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .012573 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .010210 m  
-CONDUTORES MULTIPLOS= 2 ESPACAMENTO= .400 m

CABOS PARA-RAIOS :

-NOME= HS BITOLA= 127.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .006350 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .60628E-08 m  
-NUMERO DE CABOS PARA-RAIOS= 1

CABOS ISOLADOS :

-NOME= HS BITOLA= 127.0 mm<sup>2</sup>  
-RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ohm/km/subc  
-RAIO EXTERNO= .006350 m  
-RAIO MEDIO GEOMETRICO= .60628E-08 m  
-NUMERO DE CABOS ISOLADOS= 1  
-COMPRIMENTO DO CONDUTOR= 10 km

Tabela 3.8 - Dados do sistema de transmissão 4 e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO= 100. Ohm x m

NUMERO DE CIRCUITOS= 1

FLECHA DOS CONDUTORES= 9.700 m

FLECHA DOS CABOS PARA-RAIOS= 9.000 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS= 9.000 m

FREQUENCIA DO SISTEMA= 60.00 Hertz

COORDENADAS	DO	CIRCUITO 1
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-10.00	19.40
FASE B	.00	19.40
FASE C	10.00	19.40

COORDENADAS	DO	CIRCUITO 2
	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-4.80	29.40

COORDENADAS	DOS	CONDUTORES ISOLADOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 5	4.80	29.40



Tabela 3.9 - Dados do sistema de transmissão 5 e condutor isolado

CABOS CONDUTORES:

-NOME= RAIL BITOLA= 516.8 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .0708 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .014796 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .011769 m  
 -CONDUTORES MULTIPLOS= 3 ESPACAMENTO= .457 m

CABOS PARA-RAIOS :

-NOME= ALUMOWELD BITOLA= 303.0 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 1.5350 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .009821 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .71300E-02 m  
 -NUMERO DE CABOS PARA-RAIOS= 1

CABOS ISOLADOS :

-NOME= ALUMOWELD BITOLA= 303.0 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 1.5350 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .009821 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .71300E-02 m  
 -NUMERO DE CABOS ISOLADOS= 1  
 -COMPRIMENTO DO CONDUTOR= 10 km

Table 3.10 - Dados do sistema de transmissão 5 e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO= 100. Ohm x m

NUMERO DE CIRCUITOS= 1

FLECHA DOS CONDUTORES= 9.500 m

FLECHA DOS CABOS PARA-RAIOS= 7.140 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS= 7.140 m

FREQUENCIA DO SISTEMA= 60.00 Hertz

COORDENADAS DO CIRCUITO 1

HORIZONTAL VERTICAL

FASE A -9.15 29.90

FASE B .00 36.10

FASE C 9.15 29.90

COORDENADAS DOS PARA-RAIOS

HORIZONTAL VERTICAL

PR- 1 -7.63 40.00

COORDENADAS DOS CONDUTORES ISOLADOS

HORIZONTAL VERTICAL

IS- 5 7.63 40.00

Tabela 3.11 - Dados do sistema de transmissão 6 e condutor isolado

CABOS CONDUTORES :

-NOME= BLUEJAY BITOLA= 602.9 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .0588 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .015990 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .012680 m  
 -CONDUTORES MULTIPLOS= 4 ESPACAMENTO= .457 m

CABOS PARA-RAIOS :

-NOME= MINORCA BITOLA= 88.9 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .6364 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .006100 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .51320E-02 m  
 -NUMERO DE CABOS PARA-RAIOS= 1

CABOS ISOLADOS :

-NOME= MINORCA BITOLA= 88.9 mm<sup>2</sup>  
 -RESISTENCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= .6364 Ohm/km/subc  
 -RAIO EXTERNO= .006100 m  
 -RAIO MEDIO GEOMETRICO= .51320E-02 m  
 -NUMERO DE CABOS ISOLADOS= 1  
 -COMPRIMENTO DO CONDUTOR= 10 km

Tabela 3.12 - Dados do sistema de transmissão 6 e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO= 300. Ohm x m

NUMERO DE CIRCUITOS= 1

FLECHA DOS CONDUTORES= 19.000 m

FLECHA DOS CABOS PARA-RAIOS= 12.500 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS= 12.500 m

FREQUENCIA DO SISTEMA= 60.00 Hertz

COORDENADAS	DO	CIRCUITO 1
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-15.40	37.00
FASE B	.00	37.00
FASE C	15.40	37.00

COORDENADAS	DOS	PARA-RAIOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-13.95	46.50

COORDENADAS	DOS	CONDUTORES ISOLADOS
	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 5	13.95	46.50

### 3.3 MATRIZES DE ADMITÂNCIAS TRANVERSAIS E DE IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

Uma vez conhecidas as estruturas típicas e seus principais parâmetros, para atender aos propósitos dos estudos objeto desta tese, deve-se obter a seguir, seus modelos representativos através das matrizes  $\underline{\dot{Y}}$  e  $\underline{\dot{Z}}$ . Em virtude da complexidade e ao excessivo número de expressões matemáticas que utilizarão as matrizes  $\underline{\dot{Y}}$  e  $\underline{\dot{Z}}$ , surgiu a preocupação quanto a otimização de tempo dos cálculos, e, face a isto, a necessidade de um programa para se obter expressiva velocidade de cálculo com considerável versatilidade.

#### 3.3.1 Matriz de Admitâncias Transversais

A matriz de admitâncias  $\underline{\dot{Y}}$  depende da posição dos condutores da linha de transmissão em relação a um sistema de coordenadas, e, dos raios dos condutores envolvidos. Nesta matriz a parte real não é considerada, já que a condutância representativa das fugas pelo ar é desprezível e a parte imaginária, em última análise, é representada pelo efeito capacitivo da linha de transmissão.

A matriz de admitâncias  $\underline{\dot{Y}}$ , pode ser definida como:

$$\underline{\dot{Y}} = j \omega \underline{C} \quad (3.1)$$

onde  $\underline{C}$  é a matriz das capacitâncias do sistema de condutores em Farad/km e calculada como a inversa da matriz dos coeficientes de potencial.

A matriz  $\dot{\underline{Y}}$  deve incluir os condutores de fase, os cabos pára-raios e os condutores isolados. Desta forma, a mesma, terá dimensão  $3n + p + i$ , onde  $n$  é o número de circuitos,  $p$  é o número de cabos pára-raios e  $i$  é o número de condutores isolados. Assim a matriz  $\dot{\underline{Y}}$  pode ser representada de forma particionada como:

$$\dot{\underline{Y}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{\underline{Y}}_{cc} & \dot{\underline{Y}}_{cp} & \dot{\underline{Y}}_{ci} \\ \hline \dot{\underline{Y}}_{pc} & \dot{\underline{Y}}_{pp} & \dot{\underline{Y}}_{pi} \\ \hline \dot{\underline{Y}}_{ic} & \dot{\underline{Y}}_{ip} & \dot{\underline{Y}}_{ii} \\ \hline \end{array} \quad (3.2)$$

onde os índices  $c$ ,  $p$  e  $i$  significam, respectivamente, os condutores de fase, os cabos pára-raios e os condutores isolados. As sub-matrizes  $\dot{\underline{Y}}_{cc}$ ,  $\dot{\underline{Y}}_{pp}$  e  $\dot{\underline{Y}}_{ii}$  possuem elementos do tipo próprio, enquanto as outras sub-matrizes contém elementos do tipo mútuo, relacionando uns aos outros.

Se os cabos pára-raios se encontrarem multiaterrados junto às estruturas é possível eliminar a influência dos mesmos na matriz de admitâncias  $\dot{\underline{Y}}$ . Para tanto deve-se promover a eliminação das linhas e colunas relativas aos cabos pára-raios, incorporando, no entanto a sua influência no fenômeno de propagação. Assim

procedendo, estar-se-á obtendo uma matriz de admitâncias reduzida.

Para os sistemas de transmissão 1, 4 e 6 e adotando-se um condutor adicional como condutor isolado no sistema de transmissão 1 e um dos cabos pára-raios como condutor isolado nos outros dois sistemas, as tabelas 3.13, 3.14 e 3.15 indicam, respectivamente, as matrizes de admitâncias transversais em Siemens/km.

Se os sistemas de transmissão 1, 4 e 6 possuem os cabos pára-raios multiterrados, é possível eliminá-los na matriz de admitâncias transversais  $\underline{\dot{Y}}$  e obter a matriz de admitâncias reduzida, conforme mencionado anteriormente. Nestas circunstâncias a matriz de admitâncias reduzida para os sistemas de transmissão 1, 4 e 6 são mostradas nas tabelas 3.16, 3.17 e 3.18, respectivamente.

### 3.3.2 Matriz de Impedâncias Longitudinais

Uma vez considerados os aspectos de definição e formação da matriz  $\underline{\dot{Y}}$ , resta analisar a matriz de impedâncias longitudinais  $\underline{\dot{Z}}$ . Esta última, como se sabe, é constituída de três partes independentes, cada uma possuindo características peculiares. Estas particularidades estão associadas : a geometria da disposição espacial dos condutores do sistema,  $\underline{\dot{Z}}_g$ ; aos efeitos dos próprios condutores,  $\underline{\dot{Z}}_c$ , e, a correção de Carson [13], que representa a influência do retorno pelo solo,  $\underline{\dot{Z}}_t$ . Portanto, a

Tabela 3.13 - Matriz de admitâncias  $\underline{\underline{Y}}$  do sistema de transmissão 1 (S/km)

!	Y(1,1)=	.404491E-05	!
!	Y(1,2)=	-.674752E-06	!
!	Y(1,3)=	-.164691E-06	!
!	Y(1,4)=	-.469684E-06	!
!	Y(1,5)=	-.200012E-06	!
!	Y(1,6)=	-.871108E-07	!
!	Y(2,1)=	-.674752E-06	!
!	Y(2,2)=	.424984E-05	!
!	Y(2,3)=	-.575235E-06	!
!	Y(2,4)=	-.401426E-06	!
!	Y(2,5)=	-.394807E-06	!
!	Y(2,6)=	-.307263E-06	!
!	Y(3,1)=	-.164691E-06	!
!	Y(3,2)=	-.575235E-06	!
!	Y(3,3)=	.444098E-05	!
!	Y(3,4)=	-.179267E-06	!
!	Y(3,5)=	-.422599E-06	!
!	Y(3,6)=	-.113578E-05	!
!	Y(4,1)=	-.469684E-06	!
!	Y(4,2)=	-.401426E-06	!
!	Y(4,3)=	-.179267E-06	!
!	Y(4,4)=	.264235E-05	!
!	Y(4,5)=	-.358572E-06	!
!	Y(4,6)=	-.698437E-07	!
!	Y(5,1)=	-.200012E-06	!
!	Y(5,2)=	-.394807E-06	!
!	Y(5,3)=	-.422599E-06	!
!	Y(5,4)=	-.358572E-06	!
!	Y(5,5)=	.264686E-05	!
!	Y(5,6)=	-.139584E-06	!
!	Y(6,1)=	-.871108E-07	!
!	Y(6,2)=	-.307263E-06	!
!	Y(6,3)=	-.113578E-05	!
!	Y(6,4)=	-.698437E-07	!
!	Y(6,5)=	-.139584E-06	!
!	Y(6,6)=	.323780E-05	!



Tabela 3.14 - Matriz de admitâncias  $\underline{\underline{Y}}$  do sistema de transmissão 4 (S/km)

!	Y(1,1)=	.375596E-05	!
!	Y(1,2)=	-.510391E-06	!
!	Y(1,3)=	-.137428E-06	!
!	Y(1,4)=	-.367782E-06	!
!	Y(1,5)=	-.170923E-06	!
!	Y(2,1)=	-.510391E-06	!
!	Y(2,2)=	.386639E-05	!
!	Y(2,3)=	-.510391E-06	!
!	Y(2,4)=	-.328368E-06	!
!	Y(2,5)=	-.328368E-06	!
!	Y(3,1)=	-.137428E-06	!
!	Y(3,2)=	-.510391E-06	!
!	Y(3,3)=	.375596E-05	!
!	Y(3,4)=	-.170923E-06	!
!	Y(3,5)=	-.367782E-06	!
!	Y(4,1)=	-.367782E-06	!
!	Y(4,2)=	-.328368E-06	!
!	Y(4,3)=	-.170923E-06	!
!	Y(4,4)=	.252232E-05	!
!	Y(4,5)=	-.356692E-06	!
!	Y(5,1)=	-.170923E-06	!
!	Y(5,2)=	-.328368E-06	!
!	Y(5,3)=	-.367782E-06	!
!	Y(5,4)=	-.356692E-06	!
!	Y(5,5)=	.252232E-05	!

Tabela 3.15 - Matriz de admitâncias  $\underline{Y}$  do sistema de transmissão 6 (S/km)

!	Y(1,1)=	.423239E-05	!
!	Y(1,2)=	-.729756E-06	!
!	Y(1,3)=	-.203071E-06	!
!	Y(1,4)=	-.538063E-06	!
!	Y(1,5)=	-.149847E-06	!
!	Y(2,1)=	-.729756E-06	!
!	Y(2,2)=	.434100E-05	!
!	Y(2,3)=	-.729756E-06	!
!	Y(2,4)=	-.325622E-06	!
!	Y(2,5)=	-.325622E-06	!
!	Y(3,1)=	-.203071E-06	!
!	Y(3,2)=	-.729756E-06	!
!	Y(3,3)=	.423239E-05	!
!	Y(3,4)=	-.149847E-06	!
!	Y(3,5)=	-.538063E-06	!
!	Y(4,1)=	-.538063E-06	!
!	Y(4,2)=	-.325622E-06	!
!	Y(4,3)=	-.149847E-06	!
!	Y(4,4)=	.237639E-05	!
!	Y(4,5)=	-.161626E-06	!
!	Y(5,1)=	-.149847E-06	!
!	Y(5,2)=	-.325622E-06	!
!	Y(5,3)=	-.538063E-06	!
!	Y(5,4)=	-.161626E-06	!
!	Y(5,5)=	.237639E-05	!

Tabela 3.16 - Matriz de admitâncias reduzida  $\underline{\dot{Y}}$  do sistema de transmissão 1 (S/km)

!	Y(1,1)=	.404491E-05	!
!	Y(1,2)=	-.674752E-06	!
!	Y(1,3)=	-.164691E-06	!
!	Y(1,4)=	-.871108E-07	!
!	Y(2,1)=	-.674752E-06	!
!	Y(2,2)=	.424984E-05	!
!	Y(2,3)=	-.575235E-06	!
!	Y(2,4)=	-.307263E-06	!
!	Y(3,1)=	-.164691E-06	!
!	Y(3,2)=	-.575235E-06	!
!	Y(3,3)=	.444098E-05	!
!	Y(3,4)=	-.113578E-05	!
!	Y(4,1)=	-.871108E-07	!
!	Y(4,2)=	-.307263E-06	!
!	Y(4,3)=	-.113578E-05	!
!	Y(4,4)=	.323780E-05	!

Tabela 3.17 - Matriz de admitâncias reduzida  $\underline{\dot{Y}}$  do sistema de transmissão 4 (S/km)

!	Y(1,1)=	.375596E-05	!
!	Y(1,2)=	-.510391E-06	!
!	Y(1,3)=	-.137428E-06	!
!	Y(1,4)=	-.170923E-06	!
!	Y(2,1)=	-.510391E-06	!
!	Y(2,2)=	.386639E-05	!
!	Y(2,3)=	-.510391E-06	!
!	Y(2,4)=	-.328368E-06	!
!	Y(3,1)=	-.137428E-06	!
!	Y(3,2)=	-.510391E-06	!
!	Y(3,3)=	.375596E-05	!
!	Y(3,4)=	-.367782E-06	!
!	Y(4,1)=	-.170923E-06	!
!	Y(4,2)=	-.328368E-06	!
!	Y(4,3)=	-.367782E-06	!
!	Y(4,4)=	.252232E-05	!

Tabela 3.18 - Matriz de admitâncias reduzida  $\underline{\dot{Y}}$  do sistema de transmissão 6 (S/km)

!	Y(1,1)=	.423239E-05	!
!	Y(1,2)=	-.729756E-06	!
!	Y(1,3)=	-.203071E-06	!
!	Y(1,4)=	-.149847E-06	!
!	Y(2,1)=	-.729756E-06	!
!	Y(2,2)=	.434100E-05	!
!	Y(2,3)=	-.729756E-06	!
!	Y(2,4)=	-.325622E-06	!
!	Y(3,1)=	-.203071E-06	!
!	Y(3,2)=	-.729756E-06	!
!	Y(3,3)=	.423239E-05	!
!	Y(3,4)=	-.538063E-06	!
!	Y(4,1)=	-.149847E-06	!
!	Y(4,2)=	-.325622E-06	!
!	Y(4,3)=	-.538063E-06	!
!	Y(4,4)=	.237639E-05	!

matriz total de impedâncias longitudinais  $\underline{\dot{Z}}$ , em Ohms/km, pode ser expressa pela soma das três componentes e terá dimensão igual a  $3n + p + i$ . Logo:

$$\underline{\dot{Z}} = \underline{\dot{Z}}_g + \underline{\dot{Z}}_c + \underline{\dot{Z}}_t \quad (3.3)$$

Devido a geometria da disposição espacial dos condutores, a matriz de impedâncias,  $\underline{\dot{Z}}_g$ , é constituída somente da reatância indutiva,  $\underline{X}_g$ , do grupo de condutores, calculada através da matriz dos coeficientes de potencial. Assim:

$$\underline{\dot{Z}}_g = j \underline{X}_g \quad (3.4)$$

A matriz de impedâncias que contém os efeitos dos próprios condutores,  $\underline{\dot{Z}}_c$ , é dada pela equação (3.5). Esta é determinada através da resistência ôhmica à 60 [Hz]  $\underline{R}_c$  (parte real) e da indutância interna  $\underline{X}_c$  (parte imaginária), obtida pelo conceito do raio médio geométrico. Desta forma:

$$\underline{\dot{Z}}_c = \underline{R}_c + j \underline{X}_c \quad (3.5)$$

A matriz de impedâncias que considera a influência do retorno pelo solo,  $\underline{\dot{Z}}_t$ , é calculada com o uso da série desenvolvida por Carson [13], truncando-a para os problemas relacionados com sistemas de energia elétrica, onde, em geral, o parâmetro  $r$  da série é menor que 0.25. A parte real é representada por uma matriz  $\underline{P}$  e a parte imaginária por  $\underline{Q}$ .

$$\underline{\dot{Z}}_t = \underline{P} + j \underline{Q} \quad (3.6)$$

A matriz de impedâncias longitudinais  $\underline{\dot{Z}}$ , obtida da equação (3.3), pode ser representada pela equação (3.7), em forma particionada:

$$\underline{\dot{Z}} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline \dot{Z}_{cc} & \dot{Z}_{cp} & \dot{Z}_{ci} \\ \hline \dot{Z}_{pc} & \dot{Z}_{pp} & \dot{Z}_{pi} \\ \hline \dot{Z}_{ic} & \dot{Z}_{ip} & \dot{Z}_{ii} \\ \hline \end{array} \quad (3.7)$$

onde os índices  $c$ ,  $p$  e  $i$  devem ser interpretados tal como na expressão (3.2).

Para o sistema de transmissão 6, as matrizes  $\dot{Z}_g$ ,  $\dot{Z}_c$ ,  $\dot{Z}_t$ , e  $\underline{\dot{Z}}$  estão representadas nas tabelas 3.19, 3.20, 3.21 e 3.22, respectivamente em  $\Omega/\text{Km}$ .

Tabela 3.19 - Matriz componente  $\dot{Z}_g$  de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão 6 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	I(1,1)=	.4066400	!
!	I(1,2)=	.0885499	!
!	I(1,3)=	.0457832	!
!	I(1,4)=	.1108793	!
!	I(1,5)=	.0556824	!
!	I(2,1)=	.0885499	!
!	I(2,2)=	.4066400	!
!	I(2,3)=	.0885499	!
!	I(2,4)=	.0872894	!
!	I(2,5)=	.0872894	!
!	I(3,1)=	.0457832	!
!	I(3,2)=	.0885499	!
!	I(3,3)=	.4066400	!
!	I(3,4)=	.0556824	!
!	I(3,5)=	.1108793	!
!	I(4,1)=	.1108793	!
!	I(4,2)=	.0872894	!
!	I(4,3)=	.0556824	!
!	I(4,4)=	.7105227	!
!	I(4,5)=	.0798850	!
!	I(5,1)=	.0556824	!
!	I(5,2)=	.0872894	!
!	I(5,3)=	.1108793	!
!	I(5,4)=	.0798850	!
!	I(5,5)=	.7105227	!

Tabela 3.20 - Matriz componente  $\underline{\underline{Z}}_c$  de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão 6 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.0147000	I(1,1)=	.0043719	!
!	R(1,2)=	.0000000	I(1,2)=	.0000000	!
!	R(1,3)=	.0000000	I(1,3)=	.0000000	!
!	R(1,4)=	.0000000	I(1,4)=	.0000000	!
!	R(1,5)=	.0000000	I(1,5)=	.0000000	!
!	R(2,1)=	.0000000	I(2,1)=	.0000000	!
!	R(2,2)=	.0147000	I(2,2)=	.0043719	!
!	R(2,3)=	.0000000	I(2,3)=	.0000000	!
!	R(2,4)=	.0000000	I(2,4)=	.0000000	!
!	R(2,5)=	.0000000	I(2,5)=	.0000000	!
!	R(3,1)=	.0000000	I(3,1)=	.0000000	!
!	R(3,2)=	.0000000	I(3,2)=	.0000000	!
!	R(3,3)=	.0147000	I(3,3)=	.0043719	!
!	R(3,4)=	.0000000	I(3,4)=	.0000000	!
!	R(3,5)=	.0000000	I(3,5)=	.0000000	!
!	R(4,1)=	.0000000	I(4,1)=	.0000000	!
!	R(4,2)=	.0000000	I(4,2)=	.0000000	!
!	R(4,3)=	.0000000	I(4,3)=	.0000000	!
!	R(4,4)=	.6364000	I(4,4)=	.0130283	!
!	R(4,5)=	.0000000	I(4,5)=	.0000000	!
!	R(5,1)=	.0000000	I(5,1)=	.0000000	!
!	R(5,2)=	.0000000	I(5,2)=	.0000000	!
!	R(5,3)=	.0000000	I(5,3)=	.0000000	!
!	R(5,4)=	.0000000	I(5,4)=	.0000000	!
!	R(5,5)=	.6364000	I(5,5)=	.0130283	!

Tabela 3.21 - Matriz componente  $\underline{Z}_t$  de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão 6 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.0572433	I(1,1)=	.2612449	!
!	R(1,2)=	.0572339	I(1,2)=	.2574606	!
!	R(1,3)=	.0572058	I(1,3)=	.2479647	!
!	R(1,4)=	.0566963	I(1,4)=	.2422760	!
!	R(1,5)=	.0566655	I(1,5)=	.2345499	!
!	R(2,1)=	.0572339	I(2,1)=	.2574606	!
!	R(2,2)=	.0572433	I(2,2)=	.2612449	!
!	R(2,3)=	.0572339	I(2,3)=	.2574606	!
!	R(2,4)=	.0566894	I(2,4)=	.2404024	!
!	R(2,5)=	.0566894	I(2,5)=	.2404024	!
!	R(3,1)=	.0572058	I(3,1)=	.2479647	!
!	R(3,2)=	.0572339	I(3,2)=	.2574606	!
!	R(3,3)=	.0572433	I(3,3)=	.2612449	!
!	R(3,4)=	.0566655	I(3,4)=	.2345499	!
!	R(3,5)=	.0566963	I(3,5)=	.2422760	!
!	R(4,1)=	.0566963	I(4,1)=	.2422760	!
!	R(4,2)=	.0566894	I(4,2)=	.2404024	!
!	R(4,3)=	.0566655	I(4,3)=	.2345499	!
!	R(4,4)=	.0561639	I(4,4)=	.2273997	!
!	R(4,5)=	.0561382	I(4,5)=	.2225728	!
!	R(5,1)=	.0566655	I(5,1)=	.2345499	!
!	R(5,2)=	.0566894	I(5,2)=	.2404024	!
!	R(5,3)=	.0566963	I(5,3)=	.2422760	!
!	R(5,4)=	.0561382	I(5,4)=	.2225728	!
!	R(5,5)=	.0561639	I(5,5)=	.2273997	!



Tabela 3.22 - Matriz total de impedâncias longitudinais,  $\underline{Z}$  do sistema de transmissão 6 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.0719433	I(1,1)=	.6722568	!
!	R(1,2)=	.0572339	I(1,2)=	.3460105	!
!	R(1,3)=	.0572058	I(1,3)=	.2937479	!
!	R(1,4)=	.0566963	I(1,4)=	.3531553	!
!	R(1,5)=	.0566655	I(1,5)=	.2902322	!
!	R(2,1)=	.0572339	I(2,1)=	.3460105	!
!	R(2,2)=	.0719433	I(2,2)=	.6722568	!
!	R(2,3)=	.0572339	I(2,3)=	.3460105	!
!	R(2,4)=	.0566894	I(2,4)=	.3276919	!
!	R(2,5)=	.0566894	I(2,5)=	.3276919	!
!	R(3,1)=	.0572058	I(3,1)=	.2937479	!
!	R(3,2)=	.0572339	I(3,2)=	.3460105	!
!	R(3,3)=	.0719433	I(3,3)=	.6722568	!
!	R(3,4)=	.0566655	I(3,4)=	.2902322	!
!	R(3,5)=	.0566963	I(3,5)=	.3531553	!
!	R(4,1)=	.0566963	I(4,1)=	.3531553	!
!	R(4,2)=	.0566894	I(4,2)=	.3276919	!
!	R(4,3)=	.0566655	I(4,3)=	.2902322	!
!	R(4,4)=	.6925638	I(4,4)=	.9509506	!
!	R(4,5)=	.0561382	I(4,5)=	.3024578	!
!	R(5,1)=	.0566655	I(5,1)=	.2902322	!
!	R(5,2)=	.0566894	I(5,2)=	.3276919	!
!	R(5,3)=	.0566963	I(5,3)=	.3531553	!
!	R(5,4)=	.0561382	I(5,4)=	.3024578	!
!	R(5,5)=	.6925638	I(5,5)=	.9509506	!

Para os sistemas de transmissão 1 e 4, as tabelas 3.23 e 3.24, indicam, respectivamente, a matriz de impedâncias,  $\underline{\dot{Z}}$ , em Ohms/km.

Tabela 3.23 - Matriz total de impedâncias longitudinais,  $\underline{\dot{Z}}$ , do sistema de transmissão 1 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.2420654	I(1,1)=	.7705183	!
!	R(1,2)=	.0581124	I(1,2)=	.3963932	!
!	R(1,3)=	.0581035	I(1,3)=	.3441308	!
!	R(1,4)=	.0578057	I(1,4)=	.3903475	!
!	R(1,5)=	.0578002	I(1,5)=	.3530627	!
!	R(1,6)=	.0582110	I(1,6)=	.3429821	!
!	R(2,1)=	.0581124	I(2,1)=	.3963932	!
!	R(2,2)=	.2420654	I(2,2)=	.7705183	!
!	R(2,3)=	.0581124	I(2,3)=	.3963932	!
!	R(2,4)=	.0578057	I(2,4)=	.3903475	!
!	R(2,5)=	.0578057	I(2,5)=	.3903475	!
!	R(2,6)=	.0582201	I(2,6)=	.3923056	!
!	R(3,1)=	.0581035	I(3,1)=	.3441308	!
!	R(3,2)=	.0581124	I(3,2)=	.3963932	!
!	R(3,3)=	.2420654	I(3,3)=	.7705183	!
!	R(3,4)=	.0578002	I(3,4)=	.3530627	!
!	R(3,5)=	.0578057	I(3,5)=	.3903475	!
!	R(3,6)=	.0582231	I(3,6)=	.4791111	!
!	R(4,1)=	.0578057	I(4,1)=	.3903475	!
!	R(4,2)=	.0578057	I(4,2)=	.3903475	!
!	R(4,3)=	.0578002	I(4,3)=	.3530627	!
!	R(4,4)=	2.5425020	I(4,4)=	1.2124740	!
!	R(4,5)=	.0574999	I(4,5)=	.3970647	!
!	R(4,6)=	.0579060	I(4,6)=	.3449207	!
!	R(5,1)=	.0578002	I(5,1)=	.3530627	!
!	R(5,2)=	.0578057	I(5,2)=	.3903475	!
!	R(5,3)=	.0578057	I(5,3)=	.3903475	!
!	R(5,4)=	.0574999	I(5,4)=	.3970647	!
!	R(5,5)=	2.5425020	I(5,5)=	1.2124740	!
!	R(5,6)=	.0579116	I(5,6)=	.3716305	!
!	R(6,1)=	.0582110	I(6,1)=	.3429821	!
!	R(6,2)=	.0582201	I(6,2)=	.3923056	!
!	R(6,3)=	.0582231	I(6,3)=	.4791111	!
!	R(6,4)=	.0579060	I(6,4)=	.3449207	!
!	R(6,5)=	.0579116	I(6,5)=	.3716305	!
!	R(6,6)=	.4262317	I(6,6)=	.9619194	!

Tabela 3.24 - Matriz total de impedâncias longitudinais,  $\underline{Z}$ , do sistema de transmissão 4 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.1076406	I(1,1)=	.7179664	!
!	R(1,2)=	.0573783	I(1,2)=	.3369836	!
!	R(1,3)=	.0573420	I(1,3)=	.2847208	!
!	R(1,4)=	.0566781	I(1,4)=	.3259040	!
!	R(1,5)=	.0566575	I(1,5)=	.2928892	!
!	R(2,1)=	.0573783	I(2,1)=	.3369836	!
!	R(2,2)=	.1076406	I(2,2)=	.7179664	!
!	R(2,3)=	.0573783	I(2,3)=	.3369836	!
!	R(2,4)=	.0566785	I(2,4)=	.3270204	!
!	R(2,5)=	.0566785	I(2,5)=	.3270204	!
!	R(3,1)=	.0573420	I(3,1)=	.2847208	!
!	R(3,2)=	.0573783	I(3,2)=	.3369836	!
!	R(3,3)=	.1076406	I(3,3)=	.7179664	!
!	R(3,4)=	.0566575	I(3,4)=	.2928892	!
!	R(3,5)=	.0566781	I(3,5)=	.3259040	!
!	R(4,1)=	.0566781	I(4,1)=	.3259040	!
!	R(4,2)=	.0566785	I(4,2)=	.3270204	!
!	R(4,3)=	.0566575	I(4,3)=	.2928892	!
!	R(4,4)=	3.1009950	I(4,4)=	1.9388330	!
!	R(4,5)=	.0559864	I(4,5)=	.3416826	!
!	R(5,1)=	.0566575	I(5,1)=	.2928892	!
!	R(5,2)=	.0566785	I(5,2)=	.3270204	!
!	R(5,3)=	.0566781	I(5,3)=	.3259040	!
!	R(5,4)=	.0559864	I(5,4)=	.3416826	!
!	R(5,5)=	3.1009950	I(5,5)=	1.9388330	!

Nos sistemas de transmissão apresentados, se os cabos pára-raios se encontram multiterrados, torna-se possível eliminar a presença dos mesmos na matriz de impedâncias longitudinais  $\underline{\underline{\dot{Z}}}$ . Aplicando-se a redução de Kron nas linhas e colunas relativas aos cabos pára-raios chega-se às matrizes reduzidas. Para os sistemas de transmissão 1, 4 e 6 estas matrizes estão indicadas nas tabelas 3.25, 3.26 e 3.27.

Tabela 3.25 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida  $\underline{\underline{\dot{Z}}}$  do sistema de transmissão 1 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.3025015	I(1,1)=	.7001237	!
!	R(1,2)=	.1217782	I(1,2)=	.3230962	!
!	R(1,3)=	.1180347	I(1,3)=	.2739020	!
!	R(1,4)=	.1156880	I(1,4)=	.2748603	!
!	R(2,1)=	.1217782	I(2,1)=	.3230962	!
!	R(2,2)=	.3094066	I(2,2)=	.6941162	!
!	R(2,3)=	.1217782	I(2,3)=	.3230962	!
!	R(2,4)=	.1192203	I(2,4)=	.3212241	!
!	R(3,1)=	.1180347	I(3,1)=	.2739020	!
!	R(3,2)=	.1217782	I(3,2)=	.3230962	!
!	R(3,3)=	.3025015	I(3,3)=	.7001237	!
!	R(3,4)=	.1160620	I(3,4)=	.4108705	!
!	R(4,1)=	.1156880	I(4,1)=	.2748603	!
!	R(4,2)=	.1192203	I(4,2)=	.3212241	!
!	R(4,3)=	.1160620	I(4,3)=	.4108705	!
!	R(4,4)=	.4815948	I(4,4)=	.8957654	!

Tabela 3.26 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida  $\underline{\underline{Z}}$  do sistema de transmissão 4 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.1261658	I(1,1)=	.6944705	!
!	R(1,2)=	.0759786	I(1,2)=	.3134203	!
!	R(1,3)=	.0736451	I(1,3)=	.2632199	!
!	R(1,4)=	.0762870	I(1,4)=	.2684872	!
!	R(2,1)=	.0759786	I(2,1)=	.3134203	!
!	R(2,2)=	.1263164	I(2,2)=	.6943355	!
!	R(2,3)=	.0737480	I(2,3)=	.3154205	!
!	R(2,4)=	.0763874	I(2,4)=	.3025486	!
!	R(3,1)=	.0736451	I(3,1)=	.2632199	!
!	R(3,2)=	.0737480	I(3,2)=	.3154205	!
!	R(3,3)=	.1219741	I(3,3)=	.6983020	!
!	R(3,4)=	.0739615	I(3,4)=	.3035671	!
!	R(4,1)=	.0762870	I(4,1)=	.2684872	!
!	R(4,2)=	.0763874	I(4,2)=	.3025486	!
!	R(4,3)=	.0739615	I(4,3)=	.3035671	!
!	R(4,4)=	3.1217900	I(4,4)=	1.9134940	!

Tabela 3.27 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida  $\underline{\underline{Z}}$  do sistema de transmissão 6 ( $\Omega/\text{km}$ )

!	R(1,1)=	.1052309	I(1,1)=	.5687284	!
!	R(1,2)=	.0870152	I(1,2)=	.2493845	!
!	R(1,3)=	.0818328	I(1,3)=	.2072781	!
!	R(1,4)=	.0831198	I(1,4)=	.2005215	!
!	R(2,1)=	.0870152	I(2,1)=	.2493845	!
!	R(2,2)=	.0985427	I(2,2)=	.5820875	!
!	R(2,3)=	.0791556	I(2,3)=	.2653415	!
!	R(2,4)=	.0802734	I(2,4)=	.2439892	!
!	R(3,1)=	.0818328	I(3,1)=	.2072781	!
!	R(3,2)=	.0791556	I(3,2)=	.2653415	!
!	R(3,3)=	.0898884	I(3,3)=	.6001230	!
!	R(3,4)=	.0760612	I(3,4)=	.2782928	!
!	R(4,1)=	.0831198	I(4,1)=	.2005215	!
!	R(4,2)=	.0802734	I(4,2)=	.2439892	!
!	R(4,3)=	.0760612	I(4,3)=	.2782928	!
!	R(4,4)=	.7134319	I(4,4)=	.8732634	!

### 3.4 CÁLCULO DA TENSÃO INDUZIDA EM UM CONDUTOR ISOLADO EM VAZIO

A formulação matemática, que traduz em regime permanente, o comportamento das tensões e correntes em um sistema de transmissão em presença da terra, pode ser obtida através da solução das equações (3.8) e (3.9)

$$\frac{d\dot{\underline{V}}}{dx} = - \underline{\dot{Z}} \cdot \dot{\underline{I}} \quad (3.8)$$

$$\frac{d\dot{\underline{I}}}{dx} = - \underline{\dot{Y}} \cdot \dot{\underline{V}} \quad (3.9)$$

A solução tradicional para estas equações apresenta grandes dificuldades, pelo fato de que as equações diferenciais de segunda ordem das tensões em cada fase são funções das tensões de todas as outras. Uma das possíveis soluções é o desenvolvimento em série de Mac-Laurin das equações (3.8) e (3.9), como indica as equações (3.10) e (3.11), truncando-se a série no terceiro termo, sem impor erros expressivos.

$$\frac{d\dot{\underline{V}}}{dx} = \left. \frac{d\dot{\underline{V}}}{dx} \right|_{x=0} + x \left. \frac{d^2\dot{\underline{V}}}{dx^2} \right|_{x=0} + \frac{x^2}{2!} \left. \frac{d^3\dot{\underline{V}}}{dx^3} \right|_{x=0} + \dots \quad (3.10)$$

$$\frac{d\dot{\underline{I}}}{dx} = \left. \frac{d\dot{\underline{I}}}{dx} \right|_{x=0} + x \left. \frac{d^2\dot{\underline{I}}}{dx^2} \right|_{x=0} + \frac{x^2}{2!} \left. \frac{d^3\dot{\underline{I}}}{dx^3} \right|_{x=0} + \dots \quad (3.11)$$

Derivando as equações (3.8) e (3.9) em relação a  $x$ , duas vezes sucessivamente, vem:

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dx^2} = \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{V}} \quad (3.12)$$

$$\frac{d^3 \dot{V}}{dx^3} = - \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}} \quad (3.13)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}} \quad (3.14)$$

$$\frac{d^3 \dot{I}}{dx^3} = - \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{V}} \quad (3.15)$$

Substituindo-se as equações (3.12) a (3.15) em (3.10) e (3.11) chega-se as equações (3.16) e (3.17).

$$\dot{V} = \dot{V}_0 - x \underline{\dot{Z}} \dot{I}_0 + \frac{x^2}{2!} \underline{\dot{Z}} \underline{\dot{Y}} \dot{V}_0 \quad (3.16)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_0 - x \underline{\dot{Y}} \dot{V}_0 + \frac{x^2}{2!} \underline{\dot{Y}} \underline{\dot{Z}} \dot{I}_0 \quad (3.17)$$

onde  $\dot{V}_0$  e  $\dot{I}_0$  são respectivamente os vetores das tensões e correntes nos condutores do sistema para  $x = 0$ .

Se os cabos pára-raios se encontrarem multiaterrados junto às estruturas do sistema de transmissão, é possível reduzir as matrizes de impedância longitudinais  $\underline{\dot{Z}}$  e de admitâncias

transversais,  $\dot{\underline{Y}}$ . Com esta redução, pode-se expressar as equações (3.16) e (3.17) na forma de matrizes particionadas, como nas equações (3.18) e (3.19)

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_c \\ \dot{\underline{V}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_{co} \\ \dot{\underline{V}}_{io} \end{bmatrix} - x \begin{bmatrix} \dot{\underline{Z}}_{cc} & \dot{\underline{Z}}_{ci} \\ \dot{\underline{Z}}_{ic} & \dot{\underline{Z}}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{I}}_{co} \\ \dot{\underline{I}}_{io} \end{bmatrix} + \frac{x}{2!} \begin{bmatrix} \dot{\underline{Z}}_{cc} & \dot{\underline{Z}}_{ci} \\ \dot{\underline{Z}}_{ic} & \dot{\underline{Z}}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{Y}}_{cc} & \dot{\underline{Y}}_{ci} \\ \dot{\underline{Y}}_{ic} & \dot{\underline{Y}}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_{co} \\ \dot{\underline{V}}_{io} \end{bmatrix}$$

(3.18)

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{I}}_c \\ \dot{\underline{I}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{I}}_{co} \\ \dot{\underline{I}}_{io} \end{bmatrix} - x \begin{bmatrix} \dot{\underline{Y}}_{cc} & \dot{\underline{Y}}_{ci} \\ \dot{\underline{Y}}_{ic} & \dot{\underline{Y}}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_{co} \\ \dot{\underline{V}}_{io} \end{bmatrix} + \frac{x}{2!} \begin{bmatrix} \dot{\underline{Y}}_{cc} & \dot{\underline{Y}}_{ci} \\ \dot{\underline{Y}}_{ic} & \dot{\underline{Y}}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{Z}}_{cc} & \dot{\underline{Z}}_{ci} \\ \dot{\underline{Z}}_{ic} & \dot{\underline{Z}}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\underline{I}}_{co} \\ \dot{\underline{I}}_{io} \end{bmatrix}$$

(3.19)

Fazendo  $x=\ell$  na equação (3.19), obtém-se a equação (3.20)

$$\begin{aligned} \dot{\underline{I}}_{i\ell} = & \dot{\underline{I}}_{io} - \ell \cdot \left( \dot{\underline{Y}}_{ic} \cdot \dot{\underline{V}}_{co} + \dot{\underline{Y}}_{ii} \cdot \dot{\underline{V}}_{io} \right) + \frac{\ell^2}{2} \cdot \left( \dot{\underline{Y}}_{ic} \cdot \dot{\underline{Z}}_{cc} + \dot{\underline{Y}}_{ii} \cdot \dot{\underline{Z}}_{ic} \right) \cdot \dot{\underline{I}}_{co} + \frac{\ell^2}{2} \cdot \\ & \left( \dot{\underline{Y}}_{ic} \cdot \dot{\underline{Z}}_{ic} + \dot{\underline{Y}}_{ii} \cdot \dot{\underline{Z}}_{ii} \right) \cdot \dot{\underline{I}}_{io} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Como o condutor isolado se encontra em vazio em suas extremidades, então  $\dot{\underline{I}}_{i\ell} = \dot{\underline{I}}_{io} = 0$ . Introduzindo essa condição na equação (3.20),



é possível obter:

$$\dot{V}_{i0} = -\dot{Y}_{ii}^{-1} \cdot \dot{Y}_{ic} \cdot \dot{V}_{co} + \frac{\ell}{2} \cdot \dot{Y}_{ii}^{-1} \left( \dot{Y}_{ic} \cdot \dot{Z}_{cc} + \dot{Y}_{ii} \cdot \dot{Z}_{ic} \right) \cdot \dot{I}_{co} \quad (3.21)$$

A expressão anterior fornece a tensão induzida na origem do condutor isolado. Fazendo  $x=\ell$ , na equação (3.18), é possível obter a equação (3.22), que fornece a tensão induzida no terminal do condutor isolado.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i\ell} = & \dot{V}_{i0} - \ell \cdot \left( \dot{Z}_{ic} \cdot \dot{I}_{co} + \dot{Z}_{ii} \cdot \dot{I}_{io} \right) + \frac{\ell^2}{2} \left( \dot{Z}_{ic} \cdot \dot{Y}_{cc} + \dot{Z}_{ii} \cdot \dot{Y}_{ic} \right) \cdot \dot{V}_{co} + \frac{\ell^2}{2} \cdot \\ & \cdot \left( \dot{Z}_{ic} \cdot \dot{Y}_{ic} + \dot{Z}_{ii} \cdot \dot{Y}_{ii} \right) \cdot \dot{V}_{i0} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Examinando a equação (3.21), pode-se observar que a tensão induzida na origem do condutor isolado é composta de dois termos. O primeiro devido aos efeitos da capacitância do sistema, denominado componente eletrostática da tensão e o outro devido a influência da corrente de carga da linha de transmissão, conhecido como componente eletromagnética.

### 3.4.1 Efeitos dos Campos Magnético e Elétrico

Com o objetivo de se ilustrar e observar a influência dos campos magnético e elétrico sobre a tensão induzida no

condutor isolado, utilizar-se-á o sistema de transmissão 1. Variando-se o nível de tensão dos condutores de fase e calculando a tensão induzida no condutor isolado, considerando-se apenas os efeitos eletrostáticos, chega-se aos resultados da tabela 3.28. Cabe ressaltar, que algumas classes de tensões citadas não são apropriadas à configuração do sistema de transmissão 1.

Tabela 3.28 - Tensão induzida no condutor isolado devido aos efeitos eletrostáticos

TENSÃO APLICADA [kV]	TENSÃO INDUZIDA NO COND. ISOLADO [kV]
34.5	6.05
69.0	11.94
138.0	23.74
230.0	39.43
345.0	59.07
500.0	85.57

Variando-se agora a corrente nominal da linha de transmissão e calculando-se a tensão induzida no condutor isolado,

tem-se os resultados associados aos efeitos magnéticos. A tabela 3.29 mostra os resultados correspondentes.

Tabela 3.29 - Tensão induzida no condutor isolado devido aos efeitos magnéticos

CORRENTE APLICADA [A]	TENSÃO INDUZIDA NO COND. ISOLADO [kV]
50	0.0616
100	0.1232
150	0.1848
200	0.2464
250	0.3080
300	0.3696

Comparando-se os valores obtidos nas tabelas 3.28 e 3.29 nota-se que a tensão induzida eletrostáticamente é muito maior que a tensão induzida magnéticamente no condutor isolado. Por esta razão, pode-se concluir que a tensão total induzida sobre o condutor isolado, apresenta característica preponderantemente capacitiva. Tal afirmação é válida quando o comprimento do condutor é pequeno, com algumas unidades ou até mesmo dezenas de quilômetros. Se o condutor isolado possuir grandes extensões, isto é, da ordem de centenas de quilômetros, o efeito magnético pode ser significativo, conforme se observa na tabela 3.30, que emprega o mesmo sistema de transmissão 1. Estes resultados foram obtidos

variando-se o comprimento do condutor isolado e calculando-se a tensão induzida no mesmo devido ao efeito magnético, considerando dois valores distintos de correntes nominais aplicadas.

Tabela 3.30 - Tensão induzida eletromagneticamente no condutor isolado para diversos comprimentos e duas condições de carga

COMPRIMENTO DO COND. ISOLADO  ( km)	CORRENTE NA LINHA TRANS. I=200 [A]	CORRENTE NA LINHA TRANS. I=400 [A]
	TENSÃO IND. ( kV)	TENSÃO IND. ( kV)
10	0.246	0.984
50	1.230	4.920
100	2.460	9.840
200	4.920	19.680
300	7.380	29.520
400	9.840	39.520
500	12.300	49.200

Na sequência, apresenta-se resultados de estudos associados ao sistema de transmissão 6, no qual como condutor isolado adotou-se um dos cabos pára-raios. A tabela 3.31 apresenta

os níveis de tensão induzida devido aos efeitos eletrostático, eletromagnético e a componente total no início e fim do condutor isolado, para diversos comprimentos de condutor isolado, admitindo-se a linha de transmissão com um carregamento de 2100 MW e fator de potência unitário. Através desta pode-se também observar que, para grandes comprimentos de condutor isolado, a componente eletromagnética é considerável.

Tabela 3.31 - Tensões induzidas no condutor isolado para diversos comprimentos

COMPR. DO COND. ISOL [km]	TENSÃO IND ELESTOST. [kV]	TENSÃO IND ELETROMAG. [kV]	TENSÃO IND TOTAL (Inicial) [kV]	TENSÃO IND TOTAL (Final) [kV]
5	61.35	0.557	61.35	61.35
10	61.35	1.114	61.35	61.52
50	61.35	5.568	61.01	62.31
100	61.35	11.136	60.68	63.52
200	61.35	22.273	60.01	66.54
400	61.35	44.545	58.68	72.25
600	61.35	66.818	57.38	86.52
800	61.35	89.090	56.09	100.12
1000	61.35	111.360	54.83	115.36

### 3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para o conhecimento, análise e praticabilidade da extração de potências de linhas de transmissão através do acoplamento destas com os cabos pára-raios isolados, torna-se relevante o conhecimento dos valores de tensão induzida e da capacitância equivalente vista a partir do cabo pára-raios isolado. Estas variáveis contribuem significativamente para a definição do valor final da potência a ser extraída. Nesse sentido a influência das alturas, diâmetros, espaçamentos dos condutores de fase e do cabo pára-raios e tipo de configuração de sistema de transmissão sobre estes dois parâmetros são fundamentais e constituem-se em pontos investigados a seguir.

#### 3.5.1 Análise da Tensão Induzida e Capacitância Equivalente

A tensão induzida no condutor isolado é determinada pelas equações (3.21) e (3.22), enquanto a capacitância equivalente vista a partir do condutor isolado pode ser calculada através da equação (3.1), resultando para a matriz de capacitâncias  $\underline{C}$  :

$$\underline{C} = - \frac{j}{\omega} \underline{\dot{Y}} \quad (3.23)$$

Considerando um sistema de transmissão qualquer constituído de uma linha à circuito simples, um condutor isolado e

dois cabos pára-raios multiaterrados cujas influências foram eliminadas através da redução da matriz, a matriz de capacitâncias  $\underline{\underline{C}}$  expandida será:

$$\underline{\underline{C}} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{1i} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{2i} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{3i} \\ C_{i1} & C_{i2} & C_{i3} & \boxed{C_{ii}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

onde os elementos fora da diagonal principal representam as capacitâncias parciais entre condutores e os elementos da diagonal principal resultam da somatória de todas as capacitâncias concorrentes ao mesmo. Levando em consideração o elemento correspondente a posição do condutor isolado na matriz  $\underline{\underline{C}}$ , pode-se escrever:

$$C_{ii} = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + C_{in} \quad (3.25)$$

Por outro lado, seja a figura 3.7, que representa o esquema das capacitâncias envolvidas no sistema de transmissão anterior.

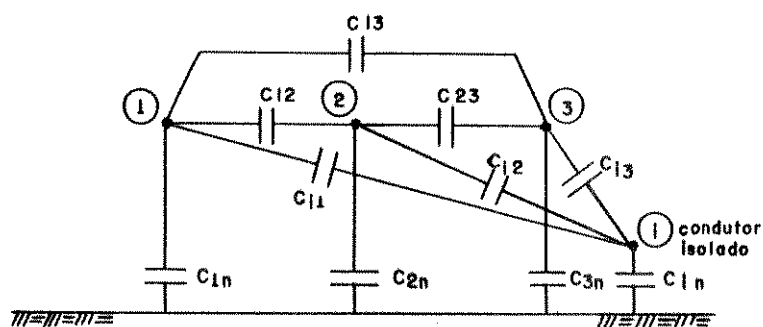


Figura 3.7 - Esquema das capacitâncias

Da figura 3.7 verifica-se que a capacitância equivalente vista a partir do condutor isolado é calculada como:

$$C_{eq} = C_{i1} + C_{i2} + C_{i3} + C_{in} \quad (3.26)$$

Comparando-se as equações (3.25) e (3.26), conclui-se que a capacitância equivalente vista a partir do condutor isolado é facilmente obtida através do valor contido no elemento da diagonal " $C_{ii}$ " que corresponde ao condutor isolado, na matriz  $\underline{C}$ .

Para análise destes parâmetros, tomar-se-á por base o sistema de transmissão 4, descrito na figura 3.4, adotando-se como condutor isolado um dos cabos pára-raios, conforme indica as tabelas 3.7 e 3.8. Os resultados estão associados com um carregamento de 360 MW para a linha de transmissão.

Nestas condições, os níveis de tensões induzida no cabo pára-raios isolado e nos condutores de fase, estão indicados nas tabelas 3.32 e 3.33.

Considere agora, a figura 3.8, que reproduz de forma mais simplificada o sistema de transmissão descrito na figura 3.4, apresentando nesta situação as dimensões:

$$\begin{aligned} h_c &= 19,40 \text{ m} ; h_{cg} = 10,0 \text{ m} ; S_a = -4,8 \text{ m} \\ d_c &= 2,51 \text{ cm} ; d_g = 1,27 \text{ cm} ; V_{base_{ff}} = 345/\sqrt{3} \text{ kV} \end{aligned}$$



Tabela 3.32 - Tensão induzida na origem do condutor isolado à vazio e nos condutores fases

VTOTI(1)=	.1905255E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.0000000E+00	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1905255E+03	KV	(MODULO)
	.00	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOTI(2)=	-.9526276E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J	-.1649999E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1905255E+03	KV	(MODULO)
	-120.00	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOTI(3)=	-.9526276E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.1649999E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1905255E+03	KV	(MODULO)
	120.00	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOTI(4)=	-.1338106E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.2585496E+01	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1362856E+02	KV	(MODULO)
	169.06	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 3.33 - Tensões induzidas eletrostática e eletromagnética no condutor isolado à vazio

- TENSÃO INDUZIDA ELETROMAGNETICAMENTE NO CONDUTOR ISOLADO SENDO CONSIDERADO APENAS OS DOIS PRIMEIROS TERMOS DA SERIE:

VETM=	-.3707068E-01	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.6328648E-01	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.7334448E-01	KV	(MODULO)
	120.36	GRAUS	(ARGUMENTO)

- TENSÃO INDUZIDA ELETROSTATICAMENTE NO CONDUTOR ISOLADO SENDO CONSIDERADO APENAS OS DOIS PRIMEIROS TERMOS DA SERIE:

VETS=	-.1338128E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J	.2578334E+01	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1362742E+02	KV	(MODULO)
	169.09	GRAUS	(ARGUMENTO)

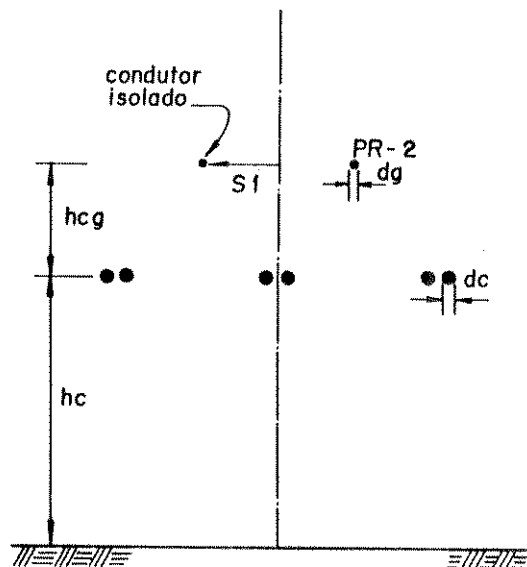


Figura 3.8 - Configuração simplificada do sistema de transmissão 4

Para o sistema de transmissão apresentado na figura 3.8 e com o mesmo carregamento anterior, procurou-se investigar os os efeitos da alteração de alguns fatores, a influência dos quais se manifesta de forma e com intensidades distintas, na busca das possíveis variações que estariam sujeitas a tensão induzida e a capacitância equivalente vista a partir do condutor isolado. As figuras 3.9 a 3.12 apresentam essas variações, para mudanças na altura do plano dos condutores de fase da linha,  $h_c$ ; na altura entre os condutores de fase e o cabo pára-raios isolado,  $h_{cg}$ ; no deslocamento horizontal  $S_1$  do cabo pára-raios isolado e no diâmetro dos condutores de fase e do cabo pára-raios isolado. Adotou-se na escala da tensão induzida valores em pu., tomando como base a tensão da linha e na escala da capacitância equivalente a unidade nF/km. Cabe ressaltar que algumas situações simuladas não se aplicariam a um sistema de transmissão real.

Observa-se na figura 3.9 que a variação da altura do plano dos condutores de fase com relação ao cabo pára-raios isolado provocou considerável alteração no valor da tensão induzida variando neste caso, aproximadamente, de 0,01 a 0.2 pu, enquanto a capacitância equivalente, embora apresente uma curva semelhante a tensão induzida, variou na pequena faixa de 6.4 a 7.4 nF/km. Para as demais figuras, verifica-se que as simulações efetuadas não provocaram grandes mudanças nos níveis da tensão induzida e nos valores da capacitância equivalente e para esta última, todas as variações ocorridas nos casos analisados, estiveram dentro da faixa de valores acima mencionado.

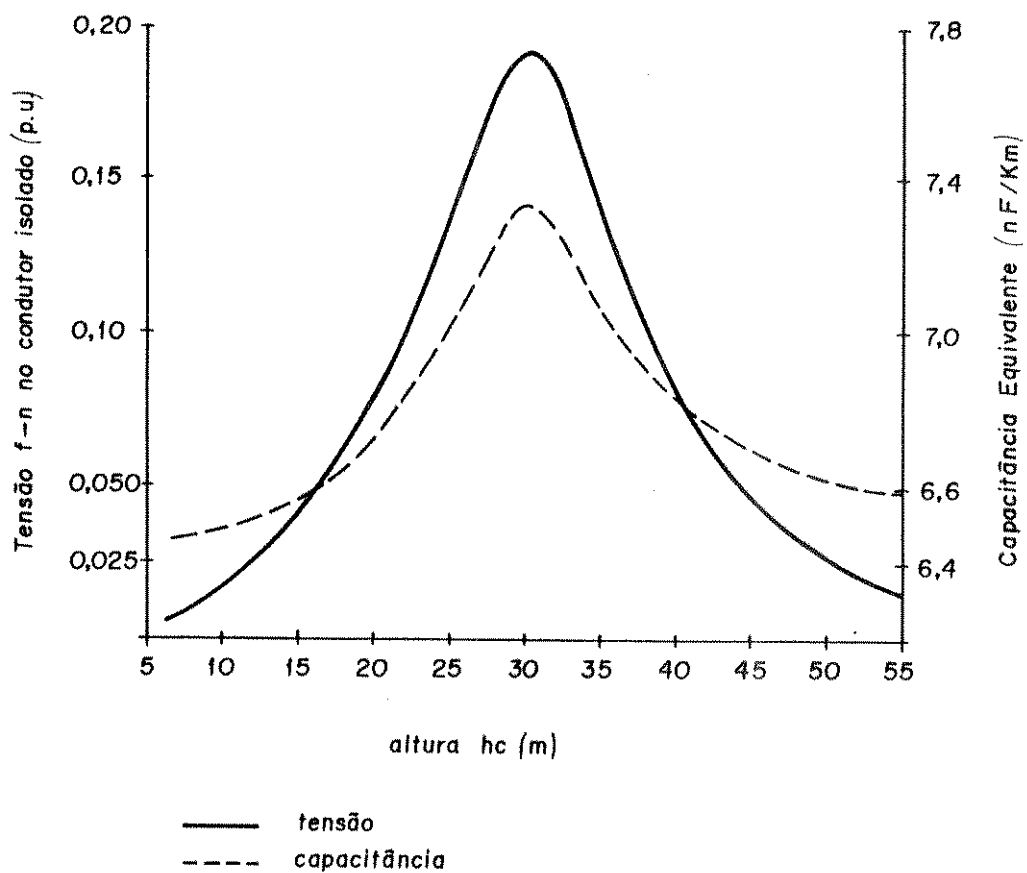


Figura 3.9 - Tensão induzida e capacitância equivalente vista do cabo pára-raios isolado em função da altura do plano dos condutores de fase,  $h_c$

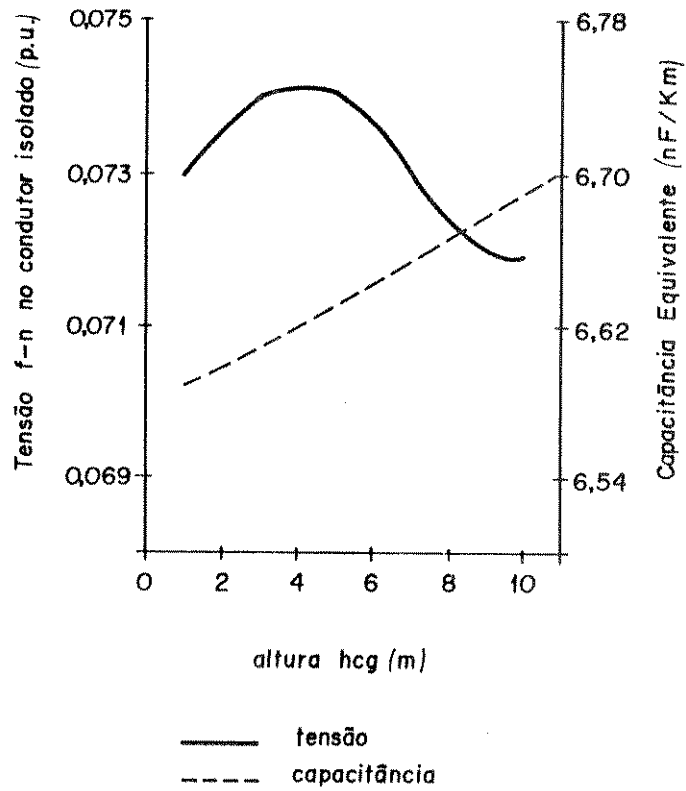


Figura 3.10 - Tensão induzida e capacitância equivalente vista do cabo pára-raios isolado em função da altura entre os condutores de fase e o cabo pára-raios isolado,  $h_{cg}$

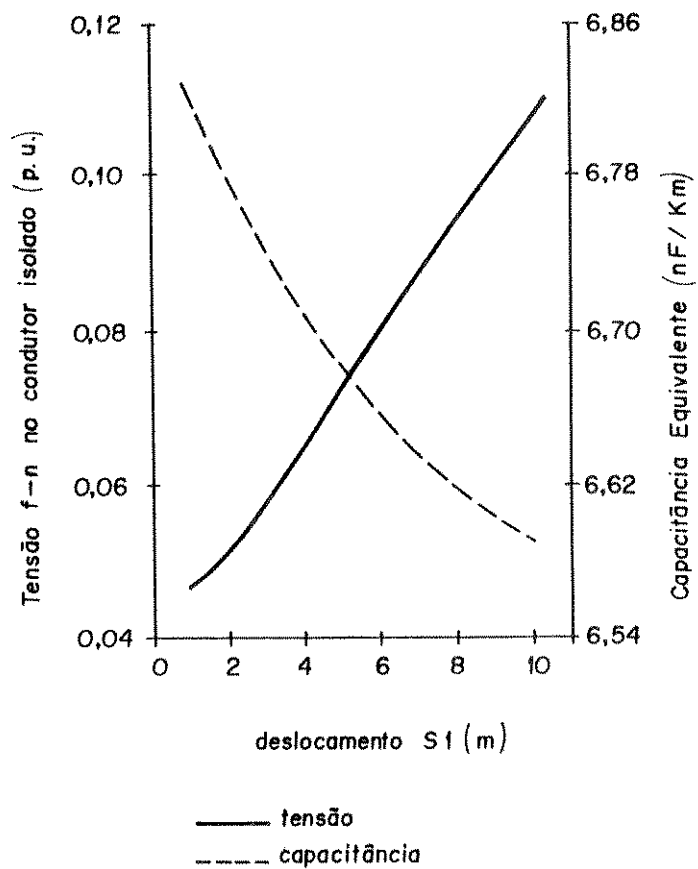


Figura 3.11 - Tensão induzida e capacitância equivalente vista do cabo pára-raios isolado em função do deslocamento horizontal,  $S_1$

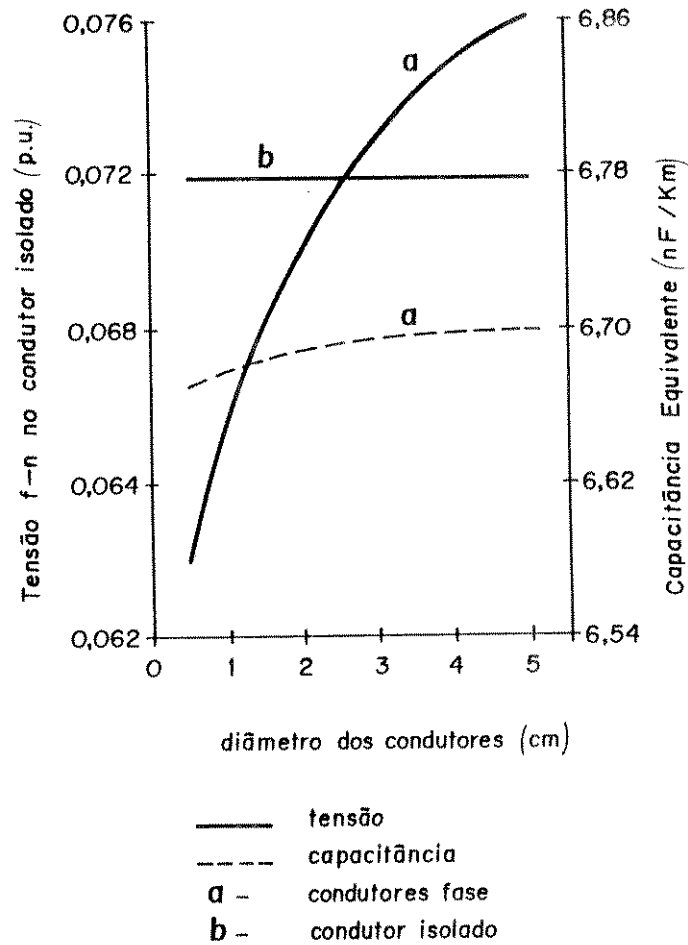


Figura 3.12 - Tensão induzida e capacitância equivalente vista a partir do cabo pára-raios isolado em função do diâmetro dos condutores de fase e do cabo isolado

Ainda, com a atenção voltada a investigação e avaliação do que ocorre com os níveis de tensão induzida e capacitância equivalente vista a partir do condutor isolado, considere as configurações dos sistemas de transmissão ilustradas nas figuras 3.1 a 3.6, onde como condutor isolado adotou-se um dos cabos pára-raios da linha de transmissão e de mesma extensão em todos eles, igual a 10 km.

A tabela 3.34 indica, para os sistemas de transmissão descritos nas figuras anteriores, os níveis de tensão induzida e capacitância equivalente no cabo pára-raios isolado.

Tabela 3.34 - Tensão induzida e capacitância equivalente vista a partir do cabo pára-raios isolado.

TIPO DE CONFIGUR.	TIPO DE CIRCUITO	CLASSE DE TENSÃO (kV)	TENSÃO INDUZIDA (kV)	CAPACITÂNCIA EQUIVALENTE (nF/km)
Figura 3.1	simples	138	7.38	7.004
Figura 3.2	duplo	138	14.66	7.151
Figura 3.3	simples	230	14.54	6.902
Figura 3.4	simples	345	13.65	6.691
Figura 3.5	simples	500	40.71	7.008
Figura 3.6	simples	750	62.01	6.303



O posicionamento do cabo pára-raios, é definido pelo projeto da linha de transmissão, ou seja, este possui um lugar fixo no sistema de transmissão e, não sofre alterações nas linhas em operação. Esta situação é que estabelece o valor da tensão induzida sobre o cabo pára-raios isolado, cujos resultados encontram-se descritos na tabela anterior, para as configurações ali mencionadas, destacando-se as grandes variações ocorridas nas tensões induzidas, aproximadamente, de 7 a 62 kV. Outro fato interessante é ilustrado na tabela 3.34, observando-se os níveis de tensão induzida nas configurações de classe de tensão 138 kV, circuito duplo e 230 kV circuito simples, que apresentam valores praticamente iguais, considerando que a posição desses cabos nos sistemas de transmissão são bem distintas. Face a isto, é de se esperar que os níveis de tensão induzida no cabo pára-raios isolado, dependam do tipo de configuração do sistema de transmissão e de sua classe de tensão, em se tratando de sistemas de transmissão já em operação.

Ao contrário do nível de tensão induzida, a capacitância equivalente apresenta uma faixa estreita de valores para as principais configurações. O valor de capacitância máxima obtida, não chega a ultrapassar 12% do valor mínimo, conforme constata-se da tabela anterior. Assim, o uso de qualquer tipo das configurações mencionadas anteriormente, utilizando um cabo pára-raios como condutor isolado, proporciona para a capacitância equivalente resultados muito próximos, com valores bem comportados, definidos dentro de uma pequena faixa e sem grandes alterações.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A derivação de potência através do acoplamento eletrostático das linhas de transmissão e cabo pára-raios foi enfocada com grandes detalhes, e por isso, procurou-se estender o estudo abrangendo as principais configurações de sistemas de transmissão nas suas respectivas classes de tensão, adotadas no país.

A utilização do programa elaborado forneceu resultados de forma que permitiu a análise e conhecimento dos parâmetros elétricos associados com os sistemas anteriormente mencionados e possibilitou avaliação detalhada da tensão induzida e capacitância equivalente vista do cabo pára-raios isolado, em vazio.

Os resultados indicam que a tensão induzida e a capacitância equivalente são parâmetros que contribuem significativamente no cálculo da potência a ser extraída e, face a isso, merecem particular atenção na análise desta fonte de derivação de potência. O conhecimento e comportamento destas duas quantidades foram investigados para um tipo de configuração de sistema de transmissão e suas variações registradas de forma a tornar as informações conclusivas em simples estimações e fácil análise visual. Tal estudo pode ser aplicado a qualquer tipo de configuração de sistema de transmissão, classe de tensão e tipo de circuito.

## CAPÍTULO 4

### DESEMPENHO E ANÁLISE ESTÁTICA DO CIRCUITO AUXILIAR DE DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA POR ACOPLAMENTO ELETROSTÁTICO

#### 4.1 INTRODUÇÃO

O capítulo anterior analisou o comportamento da tensão induzida, da capacitância equivalente e outros desempenhos sobre o condutor isolado, em vazio.

A colocação de cargas no terminal receptor do condutor isolado e sua variação, conduz a obtenção da máxima potência extraída sobre o condutor isolado, aspecto este que será analisado para os sistemas de transmissão apresentados anteriormente.

Reconhecendo que a tensão em uma linha de transmissão não é constante ao longo da mesma, visto que o perfil de tensão é alterado com o seu carregamento e comprimento, deve-se avaliar a influência deste fato sobre a tensão induzida nos terminais da carga ligada no final do condutor isolado, como também, sobre o circuito auxiliar de derivação de potência, cuja localização ao longo da linha de transmissão pode situar-se em qualquer trecho. Para tanto empregar-se-á a teoria modal de propagação em multi-condutores e de quadripolos.

Por outro lado, o circuito auxiliar formado pelo

condutor isolado (ou cabo pára-raios isolado) após seu terminal receptor, na maioria dos casos, deve percorrer alguns quilômetros (ou dezenas) até encontrar a carga a alimentar. Neste trecho, que pode ser considerado um pequeno ramal de distribuição de energia, será utilizado um nível de tensão igual aquela induzida no condutor isolado, para somente no local onde a carga se encontra efetuar-se a redução a um nível de consumo, através do transformador. Desta forma, o sistema composto da pequena linha de distribuição, transformador e carga será também motivo de análise e desempenho neste capítulo.

#### 4.2 TEORIA MODAL DE PROPAGAÇÃO EM SISTEMAS FORMADOS POR MULTICONDUTORES

A localização exata do sistema auxiliar formado pelo condutor isolado e transformador abaixador, em relação ao comprimento total da linha, não fica definida no início da análise do projeto, uma vez que, esta decisão está diretamente ligada com o conhecimento do local em que a carga se encontra. A figura 4.1 ilustra esta situação. Assim, percebe-se a necessidade da aplicação de uma teoria que vise a obtenção dos valores de tensão e corrente ao longo do sistema linha de transmissão-condutor isolado de forma precisa, que leve em conta, a variação do perfil das tensões das linhas de transmissão.

Para atingir este propósito empregar-se-á a teoria modal de propagação a qual baseia-se na definição da chamada transformação modal. Quando aplicada convenientemente às equações

de propagação de ondas em um sistema com N condutores, o comportamento das tensões e correntes em qualquer ponto da linha é calculado como uma combinação linear de N equações diferenciais independentes (modos de propagação) de corrente e de tensão. Esta estrutura não se modifica com a distância de propagação, mas tem a sua amplitude atenuada em função das constantes de propagação, que variam de modo para modo [15,16].

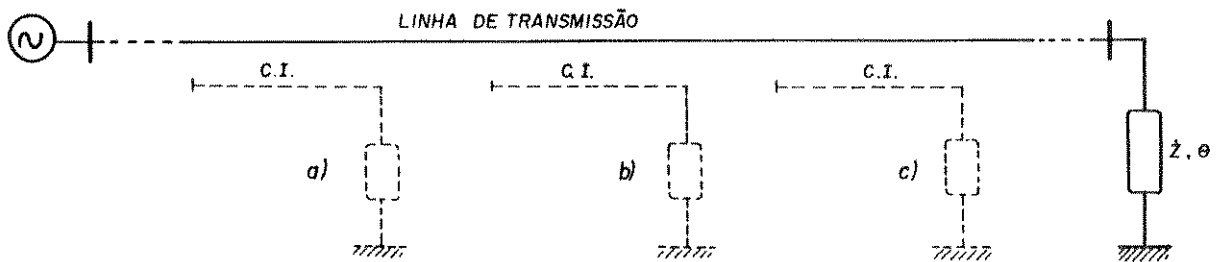


Figura 4.1 - Representação da linha de transmissão e possíveis localizações do sistema condutor isolado

Seja um sistema de transmissão formado por N condutores. Como citado anteriormente, as equações (3.12) e (3.14), podem ser escritas na forma:

$$\frac{d^2 \underline{\dot{V}}^f}{dx^2} = \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{V}}^f = \underline{\dot{\Psi}}^2 \cdot \underline{\dot{V}}^f \quad (4.1)$$

$$\frac{d^2 \underline{\dot{I}}^f}{dx^2} = \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}}^f = \underline{\dot{\Psi}}_t^2 \cdot \underline{\dot{I}}^f \quad (4.2)$$

onde  $\dot{\underline{\psi}}$  é a matriz de coeficientes de propagação definida pela multiplicação da matriz de impedâncias longitudinais  $\dot{\underline{Z}}$  e da matriz de admitâncias transversais  $\dot{\underline{Y}}$ ,  $\dot{\underline{\psi}}_t$  é a matriz transposta de  $\dot{\underline{\psi}}$  e  $\dot{\underline{V}}^f$  é o vetor das tensões de fase.

A solução da equação diferencial (4.1) é dada por :

$$\dot{\underline{V}}^f = e^{-\dot{\underline{\psi}} \cdot x} \cdot \dot{\underline{V}}_i^f + e^{\dot{\underline{\psi}} \cdot x} \cdot \dot{\underline{V}}_r^f \quad (4.3)$$

onde os vetores  $\dot{\underline{V}}_i^f$  e  $\dot{\underline{V}}_r^f$  são constantes de integração que dependem das condições de contorno do problema.

O cálculo de  $\dot{\underline{V}}^f$  a partir da equação (4.3) não é imediato, uma vez que a matriz  $\dot{\underline{\psi}}$  não é diagonal e os termos  $e^{-\dot{\underline{\psi}} \cdot x}$  e  $e^{\dot{\underline{\psi}} \cdot x}$  são funções da matriz  $\dot{\underline{\psi}}$ . Um método possível de solução é a aplicação da transformação modal, que consiste em diagonalizar a matriz  $\dot{\underline{\psi}}$ . Para tanto seja a equação (4.4):

$$\dot{\underline{\psi}} = \dot{\underline{Q}} \cdot \dot{\underline{\chi}} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \quad (4.4)$$

onde  $\dot{\underline{Q}}$  é a matriz modal da matriz  $\dot{\underline{\psi}}$ , cujas colunas são os autovetores de  $\dot{\underline{\psi}}$ , e  $\dot{\underline{\chi}}$  é a uma matriz diagonal cujos elementos não nulos, são os autovalores de  $\dot{\underline{\psi}}$ . Logo, da equação (4.4), se reconhece que:

$$\dot{\underline{\psi}}^2 = \dot{\underline{Q}} \cdot \dot{\underline{\chi}} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \cdot \dot{\underline{Q}} \cdot \dot{\underline{\chi}} \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} = \dot{\underline{Q}} \cdot \dot{\underline{\chi}}^2 \cdot \dot{\underline{Q}}^{-1} \quad (4.5)$$

Por outro lado, considere a seguinte transformação:

$$\underline{\dot{V}}^f = \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{V}}^c \quad (4.6)$$

Na expressão acima  $\underline{\dot{V}}^c$  é chamado vetor de tensões componentes.

Substituindo-se a equação (4.6) na equação (4.1), vem:

$$\frac{d^2}{dx^2} (\underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{V}}^c) = \underline{\dot{\psi}}^2 \cdot \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{V}}^c$$

$$\frac{d^2 \underline{\dot{V}}^c}{dx^2} = \underline{\dot{Q}}^{-1} \cdot \underline{\dot{\psi}}^2 \cdot \underline{\dot{Q}} \cdot \underline{\dot{V}}^c \quad (4.7)$$

Utilizando agora a equação (4.5) na equação (4.7), resulta :

$$\frac{d^2 \underline{\dot{V}}^c}{dx^2} = \underline{\dot{\chi}}^2 \cdot \underline{\dot{V}}^c \quad (4.8)$$

A solução da equação (4.8) é dada por:

$$\underline{\dot{V}}^c = e^{-\underline{\dot{\chi}} \cdot x} \cdot \underline{\dot{V}}_i^c + e^{\underline{\dot{\chi}} \cdot x} \cdot \underline{\dot{V}}_r^c \quad (4.9)$$

A solução da equação (4.9) torna-se agora muito mais simples, principalmente levando-se em consideração as propriedades de funções de matrizes.

Em se tratando da solução das equações de propagação em

sistemas de N condutores, a transformação linear aplicada facilita a solução, uma vez que transforma um sistema de N condutores mutuamente acoplados em N sistemas monofásicos, desacoplados entre si .

Análise semelhante pode ser dada à solução da equação (4.2). Utiliza-se a matriz de transformação modal  $\underline{\dot{S}}$ , definida pela equação (4.10).

$$\underline{\dot{\psi}}_t = \underline{\dot{S}} \cdot \underline{\dot{\chi}}' \cdot \underline{\dot{S}}^{-1} \quad (4.10)$$

e, considerando a transformação dada pela equação (4.11),

$$\underline{\dot{I}}^f = \underline{\dot{S}} \cdot \underline{\dot{I}}^c, \quad (4.11)$$

resulta para o vetor de correntes componentes a equação (4.12).

$$\underline{\dot{I}}^c = e^{-\underline{\dot{\chi}}' \cdot x} \cdot \underline{\dot{I}}_l^c + e^{\underline{\dot{\chi}}' \cdot x} \cdot \underline{\dot{I}}_r^c \quad (4.12)$$

Informações complementares para o cálculo das matrizes de transformação modal  $\underline{\dot{Q}}$  e  $\underline{\dot{S}}$  e conseqüentemente dos vetores de tensão  $\underline{\dot{V}}^f$  e de corrente  $\underline{\dot{I}}^f$  podem ser encontradas em [6,15,16].

### 4.3 TEORIA DE QUADRIPOLOS NO ESTUDO DO SISTEMA MULTICONDUTORES E CONDUTOR ISOLADO

O item anterior analisou um método de calcular os valores da tensão e corrente no sistema linha de transmissão-condutor isolado através de uma formulação matemática precisa. Observando-se a figura 4.1, nota-se que para o estudo proposto,



exige-se o conhecimento da tensão e corrente em apenas um determinado ponto da linha, sendo oportuno a utilização da técnica dos quadripolos. Portanto, o sistema linha de transmissão-condutor isolado pode ser representado como uma associação de quadripolos. Desta forma, tem-se nos resultados das tensões induzidas no início e final do condutor isolado valores rigorosamente determinados e suficientemente precisos.

Para a utilização desta técnica, algumas restrições são impostas aos circuitos representados por quadripolos. Estes devem conter apenas elementos passivos; devem ter apenas uma entrada e uma saída e devem ser lineares e bilaterais. A figura 4.2 ilustra tal técnica.

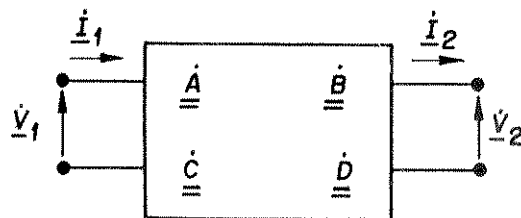


Figura 4.2 - Quadripolo Genérico

Na análise a ser realizada, considerar-se-á que  $\dot{V}_2$  e  $\dot{I}_2$  são variáveis independentes, no extremo receptor do quadripolo e que  $\dot{V}_1$  e  $\dot{I}_1$  são variáveis dependentes no extremo transmissor. Estas últimas estão relacionadas com os primeiras da seguinte forma :

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{\dot{V}}_1 \\ \hline \underline{\dot{I}}_1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \underline{\dot{A}} & \underline{\dot{B}} \\ \hline \underline{\dot{C}} & \underline{\dot{D}} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \underline{\dot{V}}_2 \\ \hline \underline{\dot{I}}_2 \\ \hline \end{array} \quad (4.13)$$

As constantes generalizadas do quadripolo podem ser obtidas como desenvolvido em [6], e aqui transcritas pelas equações (4.14) a (4.17).

$$\underline{\dot{A}} = \cosh(\underline{\dot{\psi}} \cdot \ell) \quad (4.14)$$

$$\underline{\dot{B}} = \sinh(\underline{\dot{\psi}} \cdot \ell) \quad (4.15)$$

$$\underline{\dot{C}} = \underline{\dot{Y}}^\circ \cdot \sinh(\underline{\dot{\psi}} \cdot \ell) \quad (4.16)$$

$$\underline{\dot{D}} = \underline{\dot{Y}}^\circ \cdot \cosh(\underline{\dot{\psi}} \cdot \ell) \cdot \underline{\dot{Z}}^\circ \quad (4.17)$$

Nas expressões acima  $\underline{\dot{Z}}^\circ$  e  $\underline{\dot{Y}}^\circ$  são as matrizes de impedâncias e admitâncias características, respectivamente, e  $\ell$  o comprimento do trecho de linha.

A matriz de coeficientes de propagação  $\underline{\dot{\psi}}$  pode ser calculada pela equação (4.4). Por outro lado, a álgebra matricial através de funções matriciais, permite escrever que:

$$f(\underline{\dot{\psi}}) = \underline{\dot{Q}} \cdot f(\underline{\dot{\gamma}}) \cdot \underline{\dot{Q}}^{-1} \quad (4.18)$$

Assim sendo, as matrizes constantes generalizadas do quadripolo, das equações (4.14) a (4.17), podem ser expressas como:

$$\underline{\dot{A}} = \underline{\dot{Q}} \cdot \cosh(\underline{\dot{\gamma}} \cdot \ell) \cdot \underline{\dot{Q}}^{-1} \quad (4.19)$$

$$\underline{\dot{B}} = \underline{\dot{Q}} \cdot \sinh(\underline{\dot{\gamma}} \cdot \ell) \cdot \underline{\dot{Q}}^{-1} \cdot \underline{\dot{Z}}^o \quad (4.20)$$

$$\underline{\dot{C}} = \underline{\dot{Y}}^o \cdot \underline{\dot{Q}} \cdot \sinh(\underline{\dot{\gamma}} \cdot \ell) \cdot \underline{\dot{Q}}^{-1} \quad (4.21)$$

$$\underline{\dot{D}} = \underline{\dot{Y}}^o \cdot \underline{\dot{Q}} \cdot \cosh(\underline{\dot{\gamma}} \cdot \ell) \cdot \underline{\dot{Q}}^{-1} \cdot \underline{\dot{Z}}^o \quad (4.22)$$

Pode-se demonstrar que a matriz transposta de  $\underline{\dot{A}}$ , ou seja,  $\underline{\dot{A}}_t$  é igual a matriz  $\underline{\dot{D}}$ .

#### 4.4 ANÁLISE DA TENSÃO INDUZIDA E POTÊNCIA EXTRAÍDA EM UM CONDUTOR ISOLADO ATRAVÉS DA TEORIA MODAL

As variações da tensão ao longo do comprimento da linha de transmissão podem ser consideradas de forma mais real, para a obtenção dos níveis da tensão induzida nos extremos do condutor isolado. Para tanto utiliza-se a representação do sistema formado pela linha de transmissão-condutor isolado, como uma associação de quadripolos. Quando a linha de transmissão for muito longa, este procedimento pode tornar-se de extrema utilidade, pois nestes casos as variações de tensão podem atingir valores significativos.

Para tanto seja a configuração apresentada na figura 4.3, onde se representa o sistema de transmissão principal

(particionado em três trechos), o condutor isolado e as respectivas cargas.

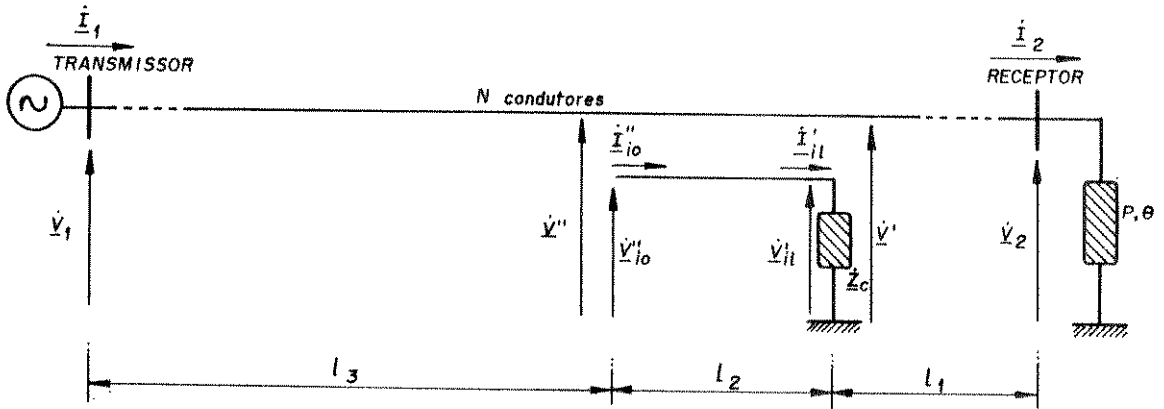


Figura 4.3 - Configuração do sistema de condutores com particionamento

Representando cada trecho particionado na forma de um quadripolo equivalente e associando-os em cascata, tem-se a figura 4.4.

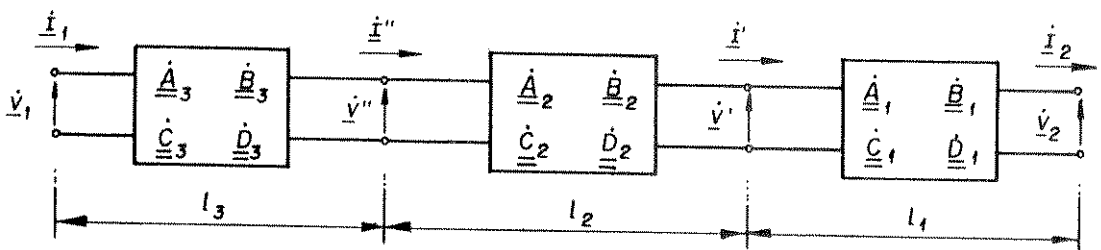


Figura 4.4 - Associação dos quadripolos em cascata

Admitindo que, para o primeiro quadripolo, são conhecidas as variáveis  $\underline{v}_2$  e  $\underline{i}_2$ , pode-se escrever:

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{\dot{V}}' \\ \hline \underline{\dot{I}}' \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline \underline{\dot{A}}_1 & \underline{\dot{B}}_1 \\ \hline \underline{\dot{C}}_1 & \underline{\dot{D}}_1 \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \underline{\dot{V}}_2 \\ \hline \underline{\dot{I}}_2 \\ \hline \end{array} \quad (4.23)$$

Da equação (4.23) tem-se os valores de  $\underline{\dot{V}}'$  e  $\underline{\dot{I}}'$ , que por sua vez, são as condições terminais do segundo quadripolo. Adicionando as variáveis  $\underline{\dot{V}}'_{i\ell}$  e  $\underline{\dot{I}}'_{i\ell}$  que são as condições terminais e conhecidas do condutor isolado, no segundo quadripolo, tem-se:

$$\begin{array}{|c|} \hline \underline{\dot{V}}'' \\ \hline \underline{\dot{V}}''_{i_0} \\ \hline \underline{\dot{I}}'' \\ \hline \underline{\dot{I}}''_{i_0} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline \underline{\dot{A}}_{cc} & \underline{\dot{A}}_{ci} & \underline{\dot{B}}_{cc} & \underline{\dot{B}}_{ci} \\ \hline \underline{\dot{A}}_{ic} & \underline{\dot{A}}_{ii} & \underline{\dot{B}}_{ic} & \underline{\dot{B}}_{ii} \\ \hline \underline{\dot{C}}_{cc} & \underline{\dot{C}}_{ci} & \underline{\dot{D}}_{cc} & \underline{\dot{D}}_{ci} \\ \hline \underline{\dot{C}}_{ic} & \underline{\dot{C}}_{ii} & \underline{\dot{D}}_{ic} & \underline{\dot{D}}_{ii} \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{|c|} \hline \underline{\dot{V}}' \\ \hline \underline{\dot{V}}'_{i\ell} \\ \hline \underline{\dot{I}}' \\ \hline \underline{\dot{I}}'_{i\ell} \\ \hline \end{array} \quad (4.24)$$

De onde pode-se escrever:

$$\underline{\dot{I}}''_{i_0} = \underline{\dot{C}}_{ic} \cdot \underline{\dot{V}}' + \underline{\dot{C}}_{ii} \cdot \underline{\dot{V}}'_{i\ell} + \underline{\dot{D}}_{ic} \cdot \underline{\dot{I}}' + \underline{\dot{D}}_{ii} \cdot \underline{\dot{I}}'_{i\ell} \quad (4.25)$$

Como a extremidade inicial do condutor isolado se encontra à vazio, pode-se afirmar que  $\underline{\dot{I}}''_{i_0}$  é nulo. Assim:

$$0 = \underline{\dot{C}}_{ic} \cdot \underline{\dot{V}}' + \underline{\dot{C}}_{ii} \cdot \underline{\dot{V}}'_{i\ell} + \underline{\dot{D}}_{ic} \cdot \underline{\dot{I}}' + \underline{\dot{D}}_{ii} \cdot \underline{\dot{I}}'_{i\ell} \quad (4.26)$$

Porém, os valores de  $\underline{\dot{V}}'_{i\ell}$  e  $\underline{\dot{I}}'_{i\ell}$  estão relacionados com a matriz de

impedâncias de carga  $\dot{\underline{Z}}_c$  existente no final do condutor isolado, expressa na equação (4.27).

$$\dot{\underline{V}}'_{i\ell} = \dot{\underline{Z}}_c \cdot \dot{\underline{I}}'_{i\ell} \quad (4.27)$$

Substituindo-se a equação (4.27) em (4.26), obtém-se as expressões para  $\dot{\underline{I}}'_{i\ell}$  e  $\dot{\underline{V}}'_{i\ell}$ .

$$\dot{\underline{I}}'_{i\ell} = (\dot{\underline{C}}_{ii} \cdot \dot{\underline{Z}}_c + \dot{\underline{D}}_{ii})^{-1} \cdot (-\dot{\underline{C}}_{ic} \cdot \dot{\underline{V}}' - \dot{\underline{D}}_{ic} \cdot \dot{\underline{I}}') \quad (4.28)$$

$$\dot{\underline{V}}'_{i\ell} = \dot{\underline{Z}}_c [ (\dot{\underline{C}}_{ii} \cdot \dot{\underline{Z}}_c + \dot{\underline{D}}_{ii})^{-1} \cdot (-\dot{\underline{C}}_{ic} \cdot \dot{\underline{V}}' - \dot{\underline{D}}_{ic} \cdot \dot{\underline{I}}') ] \quad (4.29)$$

De posse das expressões para  $\dot{\underline{I}}'_{i\ell}$  e  $\dot{\underline{V}}'_{i\ell}$  pode-se substituí-las na equação (4.24), obtendo-se desta forma as tensões e correntes na entrada do segundo quadripolo.

Novamente, para o terceiro quadripolo, com os valores de  $\dot{\underline{V}}''$  e  $\dot{\underline{I}}''$  conhecidos, calculam-se  $\dot{\underline{V}}_1$  e  $\dot{\underline{I}}_1$ , através da equação (4.30).

$$\begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}_1 \\ \dot{\underline{I}}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\underline{A}}_3 & \dot{\underline{B}}_3 \\ \dot{\underline{C}}_3 & \dot{\underline{D}}_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\underline{V}}'' \\ \dot{\underline{I}}'' \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

A título de ilustração seja o sistema de transmissão 4, alimentando uma carga trifásica equilibrada de 270 MW, com fator de potência unitário. Para este exemplo considera-se que o

quadripolo 2 inclui um condutor isolado auxiliar adicional com um comprimento de 10 km, enquanto que os quadripolos 1 e 3 representam trechos da linha com comprimentos de 200 km e 250 km, respectivamente. O condutor isolado utilizado é adotado com as mesmas características dos condutores fases e coordenadas iguais a  $x = 10.0$  m e  $y = 15.0$  m. As tabelas 4.1 a 4.4 mostram os valores das tensões e correntes na entrada de cada quadripolo e as tabelas 4.5 a 4.8 as constantes generalizadas dos quadripolos.

Outras grandezas relevantes, tais como: matriz de impedâncias características  $\underline{\dot{Z}}^{\circ}$ , matriz de admitâncias características  $\underline{\dot{Y}}^{\circ}$ , matriz modal  $\underline{\dot{Q}}$  de  $\underline{\dot{\psi}}$  e os elementos da matriz diagonal  $\underline{\dot{\chi}}$  de  $\underline{\dot{\psi}}$ , para os quadripolos 1 e 2 do sistema de transmissão 4, podem ser observadas nas tabelas 4.9 e 4.10.

Observando-se as tabelas 4.1 a 4.4, verifica-se que as tensões e correntes nas fases externas não são exatamente iguais. Tal fato não seria de imediato esperado, visto se tratar de uma configuração simétrica, pois existe a possibilidade de ocorrência de um pequeno desbalanço causado pela extração de potência do condutor isolado. A falta de identidade desses valores pode também ocorrer devido as várias manipulações de conversões entre números reais e números complexos operados com variáveis de precisão simples ou dupla na execução do programa, porém, situações estas que não invalidam os resultados obtidos, uma vez que as diferenças encontradas são desprezíveis.

A figura 4.5 indicando a variação do perfil das tensões de fase no sistema de transmissão 6 e alimentando uma carga trifásica equilibrada de 2100 MW, ilustra claramente o efeito supra citado.

Tabela 4.1 - Tensões e correntes na entrada do quadripolo 1 do sistema de transmissão 4.

VTOT(1)=		.2006376E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J		.3713357E+02	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.2040450E+03	KV	(MODULO)
		10.49	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(2)=		-.6874649E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J		-.1884233E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.2005727E+03	KV	(MODULO)
		-110.04	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(3)=		-.1290286E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J		.1485048E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.1967284E+03	KV	(MODULO)
		130.99	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(1)=		.4244620E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J		.1628534E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.4546308E+03	A	(MODULO)
		20.99	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(2)=		-.6760904E+02	A	(COMPONENTE REAL)
J		-.4661687E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.4710459E+03	A	(MODULO)
		-98.25	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(3)=		-.3655306E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J		.3087045E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.4784465E+03	A	(MODULO)
		139.82	GRAUS	(ARGUMENTO)



Tabela 4.2 - Tensões e correntes na entrada do quadripolo 2 do sistema de transmissão 4

VTOT(1)=		.2003411E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
	J	.3899285E+02	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.2041004E+03	KV	(MODULO)
		11.01	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(2)=		-.6703199E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
	J	-.1889299E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.2004689E+03	KV	(MODULO)
		-109.53	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(3)=		-.1303297E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
	J	.1470040E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.1964586E+03	KV	(MODULO)
		131.56	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(4)=		-.3267122E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
	J	.2241011E+02	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.3961845E+02	KV	(MODULO)
		145.55	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 4.3 - Correntes na entrada do quadripolo 2 do sistema de transmissão 4.

ITOT(1)=	.4228510E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.1711303E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.4561673E+03	A	(MODULO)
	22.03	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(2)=	-.5945788E+02	A	(COMPONENTE REAL)
J	-.4697909E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.4735386E+03	A	(MODULO)
	-97.21	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(3)=	-.3724896E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J	.3043258E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.4810018E+03	A	(MODULO)
	140.75	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(4)=	.1038425E-06	A	(COMPONENTE REAL)
J	.1499720E-06	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
	.1824140E-06	A	(MODULO)
	55.30	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 4.4 - Tensões e correntes na entrada do quadripolo 3 do sistema de transmissão 4

VTOT(1)=		.1815904E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J		.8399449E+02	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.2000753E+03	KV	(MODULO)
		24.82	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(2)=		-.2018496E+02	KV	(COMPONENTE REAL)
J		-.1920136E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.1930716E+03	KV	(MODULO)
		-96.00	GRAUS	(ARGUMENTO)
VTOT(3)=		-.1563622E+03	KV	(COMPONENTE REAL)
J		.1013669E+03	KV	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.1863448E+03	KV	(MODULO)
		147.05	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(1)=		.3451908E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J		.3629659E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.5009001E+03	A	(MODULO)
		46.44	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(2)=		.1499658E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J		-.5192914E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.5405120E+03	A	(MODULO)
		-73.89	GRAUS	(ARGUMENTO)
ITOT(3)=		-.5131368E+03	A	(COMPONENTE REAL)
J		.1681221E+03	A	(COMPONENTE IMAGINARIA)
		.5399763E+03	A	(MODULO)
		161.86	GRAUS	(ARGUMENTO)

Tabela 4.5 - Constantes generalizadas do quadripolo 1 do sistema de transmissão 4

A <sub>1</sub>				
!	R(1,1)=	.9533818E+00	I(1,1)= .8874545E-02	!
!	R(1,2)=	-.1301587E-01	I(1,2)= .4360950E-02	!
!	R(1,3)=	-.1312585E-01	I(1,3)= .4985432E-02	!
!	R(2,1)=	-.1406354E-01	I(2,1)= .4745880E-02	!
!	R(2,2)=	.9545127E-01	I(2,2)= .8826342E-02	!
!	R(2,3)=	-.1406351E-01	I(2,3)= .4745859E-02	!
!	R(3,1)=	-.1312582E-01	I(3,1)= .4985441E-02	!
!	R(3,2)=	-.1301587E-01	I(3,2)= .4360959E-02	!
!	R(3,3)=	.9533817E+00	I(3,3)= .8874526E-02	!
B <sub>1</sub>				
!	R(1,1)=	.2600466E+02	I(1,1)= .1326546E+03	!
!	R(1,2)=	.1652142E+02	I(1,2)= .5686797E+02	!
!	R(1,3)=	.1611483E+02	I(1,3)= .4699103E+02	!
!	R(2,1)=	.1652140E+02	I(2,1)= .5686792E+02	!
!	R(2,2)=	.2675956E+02	I(2,2)= .1318120E+03	!
!	R(2,3)=	.1652141E+02	I(2,3)= .5686793E+02	!
!	R(3,1)=	.1611483E+02	I(3,1)= .4699102E+02	!
!	R(3,2)=	.1652142E+02	I(3,2)= .5686796E+02	!
!	R(3,3)=	.2600466E+02	I(3,3)= .1326546E+03	!
C <sub>1</sub>				
!	R(1,1)=	-.2031173E-05	I(1,1)= .7400803E-03	!
!	R(1,2)=	-.7617154E-06	I(1,2)= -.1036859E-03	!
!	R(1,3)=	-.1016992E-05	I(1,3)= -.2988399E-04	!
!	R(2,1)=	-.7617336E-06	I(2,1)= -.1036862E-03	!
!	R(2,2)=	-.1993216E-05	I(2,2)= .7624039E-03	!
!	R(2,3)=	-.7617136E-06	I(2,3)= -.1036861E-03	!
!	R(3,1)=	-.1017001E-05	I(3,1)= -.2988394E-04	!
!	R(3,2)=	-.7617281E-06	I(3,2)= -.1036858E-03	!
!	R(3,3)=	-.2031149E-05	I(3,3)= .7400801E-03	!
D <sub>1</sub>				
!	R(1,1)=	.9546828E+00	I(1,1)= .8886706E-02	!
!	R(1,2)=	-.1408240E-01	I(1,2)= .4752317E-02	!
!	R(1,3)=	-.1314341E-01	I(1,3)= .4992250E-02	!
!	R(2,1)=	-.1303438E-01	I(2,1)= .4366945E-02	!
!	R(2,2)=	.9558139E+00	I(2,2)= .8838350E-02	!
!	R(2,3)=	-.1303431E-01	I(2,3)= .4366904E-02	!
!	R(3,1)=	-.1314342E-01	I(3,1)= .4992261E-02	!
!	R(3,2)=	-.1408252E-01	I(3,2)= .4752323E-02	!
!	R(3,3)=	.9546824E+00	I(3,3)= .8886675E-02	!

Tabela 4.6 - Constantes generalizadas do quadripolo 2 do sistema de transmissão 4

Az				
!	R(1,1)=	.9998826E+00	I(1,1)= .2252660E-04	!
!	R(1,2)=	-.3129244E-04	I(1,2)= .1060520E-04	!
!	R(1,3)=	-.2792478E-04	I(1,3)= .1083780E-04	!
!	R(1,4)=	-.2343766E-04	I(1,4)= .8454546E-05	!
!	R(2,1)=	-.3531575E-04	I(2,1)= .1205661E-04	!
!	R(2,2)=	.9998873E+00	I(2,2)= .2188981E-04	!
!	R(2,3)=	-.2962351E-04	I(2,3)= .1024082E-04	!
!	R(2,4)=	-.2524629E-04	I(2,4)= .8197502E-05	!
!	R(3,1)=	-.3293157E-04	I(3,1)= .1272745E-04	!
!	R(3,2)=	-.3111362E-04	I(3,2)= .1071487E-04	!
!	R(3,3)=	.9998889E+00	I(3,3)= .2103113E-04	!
!	R(3,4)=	-.2624653E-04	I(3,4)= .6690621E-05	!
!	R(4,1)=	-.3366917E-04	I(4,1)= .1242105E-04	!
!	R(4,2)=	-.3202260E-04	I(4,2)= .1046993E-04	!
!	R(4,3)=	-.3164262E-04	I(4,3)= .7078983E-05	!
!	R(4,4)=	.9998900E+00	I(4,4)= .2406002E-04	!

Bz				
!	R(1,1)=	.1357328E+01	I(1,1)= .6754424E+01	!
!	R(1,2)=	.8730114E+00	I(1,2)= .2924870E+01	!
!	R(1,3)=	.8515619E+00	I(1,3)= .2423563E+01	!
!	R(1,4)=	.8356416E+00	I(1,4)= .2421681E+01	!
!	R(2,1)=	.8730124E+00	I(2,1)= .2924872E+01	!
!	R(2,2)=	.1396579E+01	I(2,2)= .6713096E+01	!
!	R(2,3)=	.8730109E+00	I(2,3)= .2924872E+01	!
!	R(2,4)=	.8553592E+00	I(2,4)= .2875228E+01	!
!	R(3,1)=	.8515635E+00	I(3,1)= .2423566E+01	!
!	R(3,2)=	.8730113E+00	I(3,2)= .2924872E+01	!
!	R(3,3)=	.1357326E+01	I(3,3)= .6754429E+01	!
!	R(3,4)=	.8379990E+00	I(3,4)= .3580129E+01	!
!	R(4,1)=	.8356431E+00	I(4,1)= .2421682E+01	!
!	R(4,2)=	.8553597E+00	I(4,2)= .2875227E+01	!
!	R(4,3)=	.8379993E+00	I(4,3)= .3580127E+01	!
!	R(4,4)=	.1827519E+01	I(4,4)= .8169188E+01	!

Tabela 4.7 - Constantes generalizadas do quadripolo 2 do sistema de transmissão 4

Cz			
!	R(1,1)=	-.2720526E-09	I(1,1)= .3756900E-04 !
!	R(1,2)=	-.9574563E-10	I(1,2)= -.5061493E-05 !
!	R(1,3)=	-.1445528E-09	I(1,3)= -.1233654E-05 !
!	R(1,4)=	-.1018350E-09	I(1,4)= -.5827757E-06 !
!	R(2,1)=	-.9279688E-10	I(2,1)= -.5061491E-05 !
!	R(2,2)=	-.2784688E-09	I(2,2)= .3882967E-04 !
!	R(2,3)=	-.1021867E-09	I(2,3)= -.4551426E-05 !
!	R(2,4)=	-.5474021E-10	I(2,4)= -.2284909E-05 !
!	R(3,1)=	-.1403606E-09	I(3,1)= -.1233642E-05 !
!	R(3,2)=	-.1013376E-09	I(3,2)= -.4551427E-05 !
!	R(3,3)=	-.3228990E-09	I(3,3)= .3938576E-04 !
!	R(3,4)=	.7017320E-10	I(3,4)= -.7555462E-05 !
!	R(4,1)=	-.9760015E-10	I(4,1)= -.5827696E-06 !
!	R(4,2)=	-.5405809E-10	I(4,2)= -.2284912E-05 !
!	R(4,3)=	.7398171E-10	I(4,3)= -.7555475E-05 !
!	R(4,4)=	-.3416289E-09	I(4,4)= .3123550E-04 !

Dz			
!	R(1,1)=	.1001245E+01	I(1,1)= .2290402E-04 !
!	R(1,2)=	-.3587455E-04	I(1,2)= .1237122E-04 !
!	R(1,3)=	-.3400073E-04	I(1,3)= .1314003E-04 !
!	R(1,4)=	-.3452599E-04	I(1,4)= .1279637E-04 !
!	R(2,1)=	-.3111735E-04	I(2,1)= .1049461E-04 !
!	R(2,2)=	.1001252E+01	I(2,2)= .2179667E-04 !
!	R(2,3)=	-.3072992E-04	I(2,3)= .1069624E-04 !
!	R(2,4)=	-.3154576E-04	I(2,4)= .1042243E-04 !
!	R(3,1)=	-.2745539E-04	I(3,1)= .1085596E-04 !
!	R(3,2)=	-.2920628E-04	I(3,2)= .1022872E-04 !
!	R(3,3)=	.1001253E+01	I(3,3)= .2103113E-04 !
!	R(3,4)=	-.3090501E-04	I(3,4)= .7186085E-05 !
!	R(4,1)=	-.2354383E-04	I(4,1)= .8214265E-05 !
!	R(4,2)=	-.2527237E-04	I(4,2)= .8029864E-05 !
!	R(4,3)=	-.2673268E-04	I(4,3)= .6422400E-05 !
!	R(4,4)=	.1001253E+01	I(4,4)= .2383906E-04 !

Tabela 4.8 - Constantes generalizadas do quadripolo 3 do sistema de transmissão 4

A<sub>3</sub>

!	R(1,1)=	.9275143E+00	I(1,1)=	.1370549E-01	!
!	R(1,2)=	-.2014890E-01	I(1,2)=	.6701402E-02	!
!	R(1,3)=	-.2031687E-01	I(1,3)=	.7667211E-02	!
!	R(2,1)=	-.2177081E-01	I(2,1)=	.7293250E-02	!
!	R(2,2)=	.9292680E+00	I(2,2)=	.1363499E-01	!
!	R(2,3)=	-.2177078E-01	I(2,3)=	.7293229E-02	!
!	R(3,1)=	-.2031685E-01	I(3,1)=	.7667219E-02	!
!	R(3,2)=	-.2014890E-01	I(3,2)=	.6701412E-02	!
!	R(3,3)=	.9275143E+00	I(3,3)=	.1370547E-01	!

B<sub>3</sub>

!	R(1,1)=	.3171334E+02	I(1,1)=	.1641174E+03	!
!	R(1,2)=	.2000144E+02	I(1,2)=	.6994853E+02	!
!	R(1,3)=	.1950868E+02	I(1,3)=	.5770669E+02	!
!	R(2,1)=	.2000143E+02	I(2,1)=	.6994849E+02	!
!	R(2,2)=	.3263607E+02	I(2,2)=	.1630534E+03	!
!	R(2,3)=	.2000143E+02	I(2,3)=	.6994849E+02	!
!	R(3,1)=	.1950868E+02	I(3,1)=	.5770668E+02	!
!	R(3,2)=	.2000144E+02	I(3,2)=	.6994853E+02	!
!	R(3,3)=	.3171334E+02	I(3,3)=	.1641174E+03	!

C<sub>3</sub>

!	R(1,1)=	-.3940601E-05	I(1,1)=	.9173483E-03	!
!	R(1,2)=	-.1471225E-05	I(1,2)=	-.1307122E-03	!
!	R(1,3)=	-.1967539E-05	I(1,3)=	-.3901290E-04	!
!	R(2,1)=	-.1471250E-05	I(2,1)=	-.1307126E-03	!
!	R(2,2)=	-.3868548E-05	I(2,2)=	.9454163E-03	!
!	R(2,3)=	-.1471230E-05	I(2,3)=	-.1307125E-03	!
!	R(3,1)=	-.1967543E-05	I(3,1)=	-.3901281E-04	!
!	R(3,2)=	-.1471239E-05	I(3,2)=	-.1307122E-03	!
!	R(3,3)=	-.3940573E-05	I(3,3)=	.9173480E-03	!

D<sub>3</sub>

!	R(1,1)=	.9287800E+00	I(1,1)=	.1372424E-01	!
!	R(1,2)=	-.2180019E-01	I(1,2)=	.7303162E-02	!
!	R(1,3)=	-.2034424E-01	I(1,3)=	.7677687E-02	!
!	R(2,1)=	-.2017717E-01	I(2,1)=	.6710592E-02	!
!	R(2,2)=	.9305350E+00	I(2,2)=	.1365359E-01	!
!	R(2,3)=	-.2017710E-01	I(2,3)=	.6710553E-02	!
!	R(3,1)=	-.2034421E-01	I(3,1)=	.7677684E-02	!
!	R(3,2)=	-.2180022E-01	I(3,2)=	.7303152E-02	!
!	R(3,3)=	.9287798E+00	I(3,3)=	.1372420E-01	!

Tabela 4.9 - Matrizes  $\underline{\dot{Q}}$ ,  $\underline{\dot{\gamma}}$ ,  $\underline{\dot{Z}}^\circ$  e  $\underline{\dot{Y}}^\circ$  do quadripolo 1 do sistema de transmissão 4

IMPEDANCIA CARACTERISTICA (Ohms)

424.450 < -5.31	123.747 < -9.45	90.511 < -12.67
123.747 < -9.45	420.213 < -5.55	123.747 < -9.45
90.511 < -12.67	123.747 < -9.45	424.450 < -5.31

ADMITANCIA CARACTERISTICA (milisiemens)

2.627 < 4.26	.667 < -178.40	.366 < 176.61
.667 < -178.40	2.773 < 4.44	.667 < -178.40
.366 < 176.61	.667 < -178.40	2.627 < 4.26

MODO NO.	TENSAO	AUTO-VETOR CORRENTE	VELOCIDADE km/seg	ATENUACAO Np/km	ATENUAC Db/km
1	1.00000	.00 1.00000	.00		
	1.01962	.24 .94298	.36	194615.7	.000241 .002097
	1.00000	.00 1.00000	.00		
2	1.00000	.00 1.00000	.00		
	.00000	135.48 .00000	154.46	290023.9	.000076 .000657
	1.00000	-180.00 1.00000	-180.00		
3	.47149	-179.64 .50981	-179.76		
	1.00000	.00 1.00000	.00	295630.8	.000088 .000764
	.47149	-179.64 .50981	-179.76		



Tabela 4.10 - Matrizes  $\underline{\dot{Q}}$ ,  $\underline{\dot{\gamma}}$ ,  $\underline{\dot{Z}}^{\circ}$  e  $\underline{\dot{Y}}^{\circ}$  do quadripolo 2 do sistema de transmissão 4

IMPEDANCIA CARACTERISTICA (Ohms)

422.805 < -5.25	121.885 < -9.30	88.532 < -12.65	84.983 < -12.27
121.885 < -9.30	418.168 < -5.50	121.565 < -9.41	113.102 < -9.35
88.532 < -12.65	121.565 < -9.41	422.163 < -5.31	165.281 < -6.19
84.983 < -12.27	113.102 < -9.35	165.281 < -6.19	520.690 < -6.08

ADMITANCIA CARACTERISTICA (milisiemens)

2.648 < 4.15	.633 < -178.04	.294 < 175.97	.201 < 178.44
.633 < -178.04	2.827 < 4.34	.550 < -178.79	.337 < -177.31
.294 < 175.97	.550 < -178.79	2.882 < 4.53	.750 < -173.62
.201 < 178.44	.337 < -177.31	.750 < -173.62	2.266 < 5.69

MODO NO.	TENSAO	AUTO-VETOR		VELOCIDADE	ATENUACAO	ATENUAC
		CORRENTE		km/seg	Np/km	Db/km
1	1.00000	.00	1.00000	.00	185769.7	.000259
	1.02703	.49	.91061	.66		
	1.01296	.86	.85057	1.27		
	1.06493	.28	.74363	.19		
2	1.00000	.00	1.00000	.00	288329.7	.000077
	.15907	-18.24	.16155	-17.22		
	.84100	-167.91	.81514	-163.93		
	.65771	154.49	.43972	141.72		
3	.21847	-117.86	.22193	-107.31	292307.3	.000123
	.20032	-173.40	.19930	-168.11		
	.59695	153.84	.82662	161.73		
	1.00000	.00	1.00000	.00		
4	.48773	-179.36	.52709	-179.57	295610.7	.000088
	1.00000	.00	1.00000	.00		
	.37820	-177.48	.41115	-177.45		
	.13869	170.77	.08123	166.40		

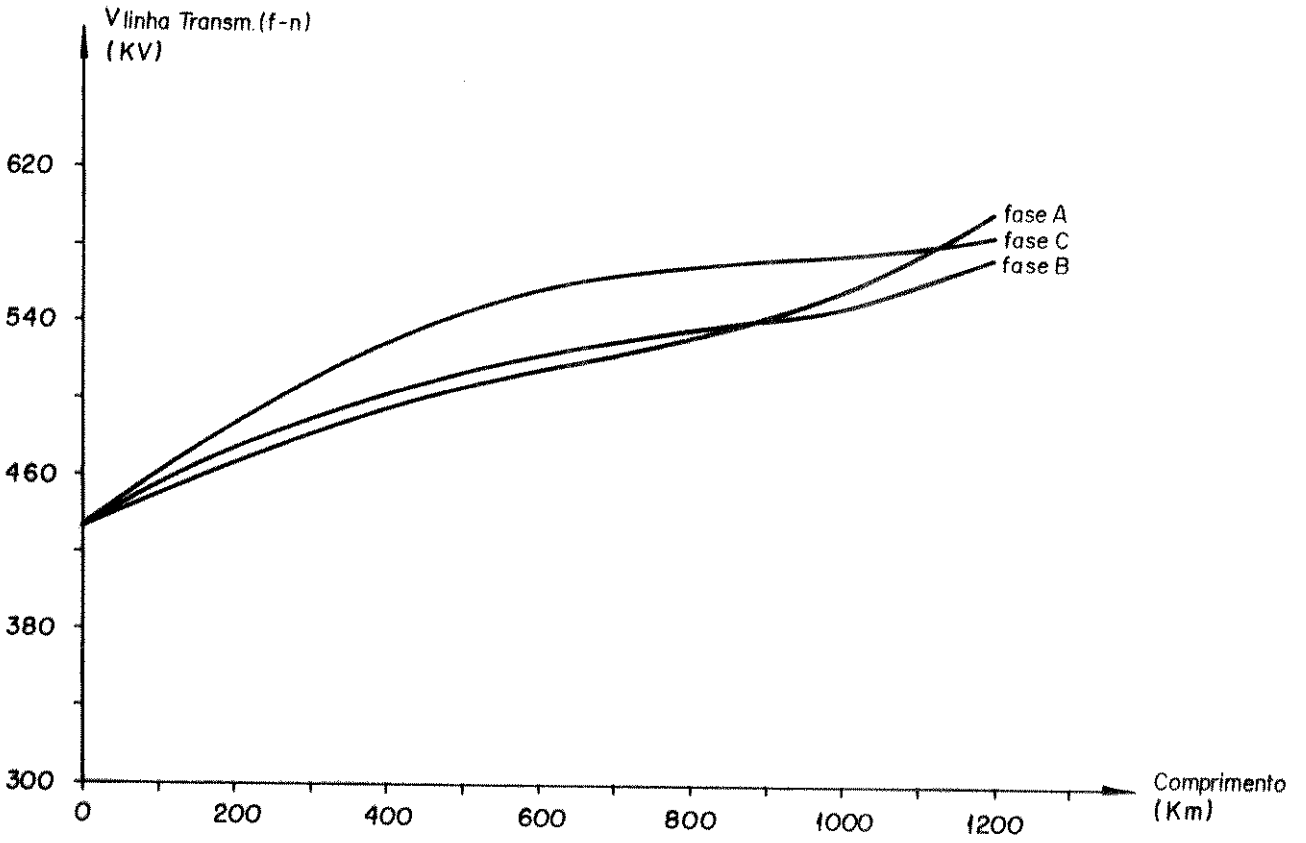


Figura 4.5 - Perfil de tensões de fase no sistema de transmissão 6

#### 4.4.1 Tensões Induzidas nos Cabos Pára-raios dos Sistemas de Transmissão Adotados

Empregando-se as configurações descritas nas figuras 3.3 a 3.6, considerando um dos cabos pára-raios como condutor isolado e adotando-se as técnicas da teoria modal e de quadripolos, procurou-se observar o comportamento da tensão induzida no cabo pára-raios isolado, sem carga. As seguintes variáveis foram observadas: tensão inicial ( $V_i$ ); tensão terminal ( $V_f$ ) e componente magnética ( $V_{mag}$ ). No tocante ao carregamento da linha foram utilizadas três condições distintas. Na primeira a linha opera com uma potência ativa igual a potência característica  $P_0$  e, nas outras, valores iguais a  $3/2$  e  $1/2$  da potência característica  $P_0$ , com fator de potência unitário na carga. O arranjo empregado foi o da figura 4.6, cujo comprimento do cabo pára-raios isolado variou de 5 km a 800 km. As tabelas 4.11 a 4.14 ilustram os correspondentes resultados.

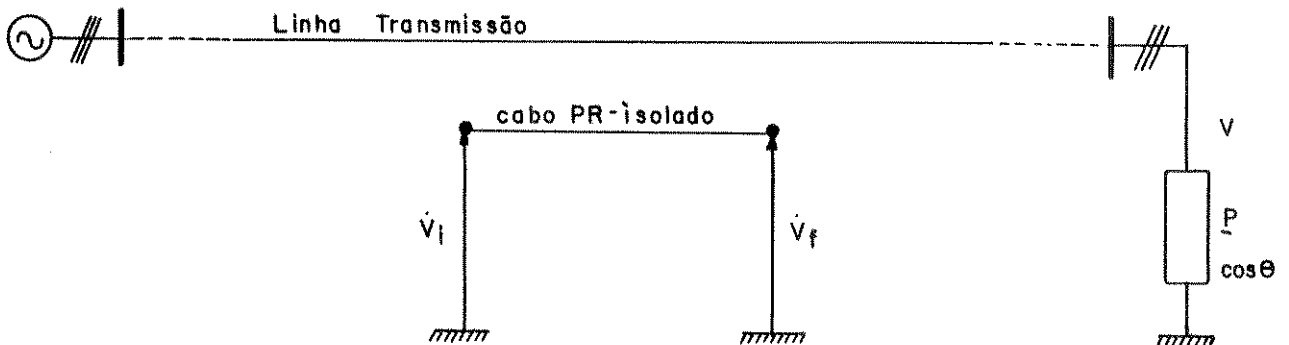


Figura 4.6 - Configuração linha de transmissão com carregamento  $P$  e cabo pára-raios isolado

Tabela 4.11 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 3

EXTENSÃO CABO PR. ISOLADO (km)	CARREGAMENTO P <sub>0</sub>			CARREGAM. = (3/2) P <sub>0</sub>			CARREGAM. = (1/2) P <sub>0</sub>		
	V <sub>i</sub> (kV)	V <sub>f</sub> (kV)	V <sub>mag</sub> (kV)	V <sub>i</sub> (kV)	V <sub>f</sub> (kV)	V <sub>mag</sub> (kV)	V <sub>i</sub> (kV)	V <sub>f</sub> (kV)	V <sub>mag</sub> (kV)
5	14.44	14.45	0.103	14.44	14.46	0.155	14.44	14.44	0.052
10	14.44	14.47	0.206	14.44	14.49	0.309	14.44	14.44	0.103
50	14.45	14.65	1.030	14.45	14.80	1.546	14.44	14.44	0.515
100	14.46	14.91	2.060	14.48	15.31	3.092	14.44	14.44	1.030
200	14.49	15.58	4.118	14.53	16.75	6.184	14.44	14.44	2.060
300	14.53	16.43	6.177	14.58	18.61	9.277	14.48	14.73	3.090
400	14.56	17.43	8.236	14.65	20.75	12.37	14.49	14.74	4.120
500	14.61	18.54	10.30	14.73	23.40	15.46	14.51	14.74	5.151

Tabela 4.12 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 4

EXTENSÃO CABO PR. ISOLADO (km)	CARREGAMENTO P <sub>0</sub>			CARREGAM. = (3/2) P <sub>0</sub>			CARREGAM. = (1/2) P <sub>0</sub>		
	V <sub>i</sub> (kV)	V <sub>f</sub> (kV)	V <sub>mag</sub> (kV)	V <sub>i</sub> (kV)	V <sub>f</sub> (kV)	V <sub>mag</sub> (kV)	V <sub>i</sub> (kV)	V <sub>f</sub> (kV)	V <sub>mag</sub> (kV)
5	14.24	14.26	0.114	14.24	14.27	0.171	14.24	14.25	0.057
10	14.23	14.28	0.227	14.23	14.30	0.341	14.24	14.26	0.114
100	14.16	14.73	2.274	14.13	15.16	3.411	14.20	14.40	1,137
300	14.02	16.46	6.821	13.92	18.87	10.23	14.13	14.60	3.411
500	13.89	19.04	11.37	13.74	24.16	17.05	14.05	14.76	5.684
700	13.77	22.29	15.92	13.59	30.37	23.87	13.98	14.99	7.958
800	13.71	24.12	18.19	13.53	33.76	27.28	13.95	15.17	9.095

Tabela 4.13 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 5

EXTENSÃO CABO PR. ISOLADO [km]	CARREGAMENTO $P_0$			CARREGAM. = $(3/2)P_0$			CARREGAM. = $(1/2)P_0$		
	$V_i$ [kV]	$V_f$ [kV]	$V_{mag}$ [kV]	$V_i$ [kV]	$V_f$ [kV]	$V_{mag}$ [kV]	$V_i$ [kV]	$V_f$ [kV]	$V_{mag}$ [kV]
5	40.54	40.68	0.307	40.54	40.51	0.460	40.54	40.53	0.154
10	40.53	40.50	0.614	40.51	40.57	0.921	40.54	40.47	0.307
100	40.40	40.32	6.135	40.33	40.69	9.207	40.47	40.18	3.071
300	40.11	41.94	18.41	39.91	45.88	27.62	40.33	38.74	9.212
500	39.84	44.83	30.68	39.64	58.74	46.03	40.19	36.63	15.35
600	39.70	47.49	36.81	39.28	63.00	55.24	40.12	35.53	18.43
800	39.42	54.73	49.09	38.87	78.65	73.65	39.98	33.85	24.57

Tabela 4.14 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 6

EXTENSÃO CABO PR. ISOLADO [km]	CARREGAMENTO $P_0$			CARREGAM. = $(3/2)P_0$			CARREGAM. = $(1/2)P_0$		
	$V_i$ [kV]	$V_f$ [kV]	$V_{mag}$ [kV]	$V_i$ [kV]	$V_f$ [kV]	$V_{mag}$ [kV]	$V_i$ [kV]	$V_f$ [kV]	$V_{mag}$ [kV]
5	61.32	61.41	0.398	61.31	61.44	0.596	61.32	61.38	0.199
10	61.30	61.47	0.795	61.28	61.52	1.193	61.31	61.36	0.398
100	60.87	62.55	7.954	60.68	63.52	11.93	60.47	61.29	3.977
300	59.98	65.17	23.86	59.34	70.58	35.79	60.27	59.18	11.93
500	58.87	68.14	30.77	58.03	80.58	59.65	59.98	57.37	19.86
600	58.50	69.93	47.72	57.38	86.52	71.59	59.63	55.54	23.86
800	57.56	74.97	63.63	56.09	100.1	95.45	59.06	51.40	31.86

Das tabelas anteriores, constata-se, novamente, que a influência da componente magnética da tensão induzida no cabo pára-raios isolado, face as condições de carregamento da linha de transmissão e comprimento do condutor isolado, não é desprezível. Percebe-se ainda, que a partir de determinadas extensões de condutor isolado, aparecem diferenças significativas entre o valor inicial,  $V_i$  e o valor final,  $V_f$  da tensão total induzida, gerando um perfil de tensão induzida no cabo pára-raios isolado inadequado ao uso.

Utilizando-se, agora, as mesmas configurações anteriores e cada uma delas com carregamento e comprimento indicados nas tabelas 4.15 a 4.18, procurou-se variar a posição do sistema auxiliar constituído do cabo pára-raios isolado, ao longo da linha, conforme ilustra a figura 4.7. Os resultados colhidos encontram-se resumidos nas tabelas 4.15 a 4.18, onde destaca-se os níveis de tensão induzida no início e término do cabo pára-raios isolado, em vazio, para duas extensões adotadas do quadripolo 2 que contém o condutor isolado, uma igual a 10 e outra 100 km.

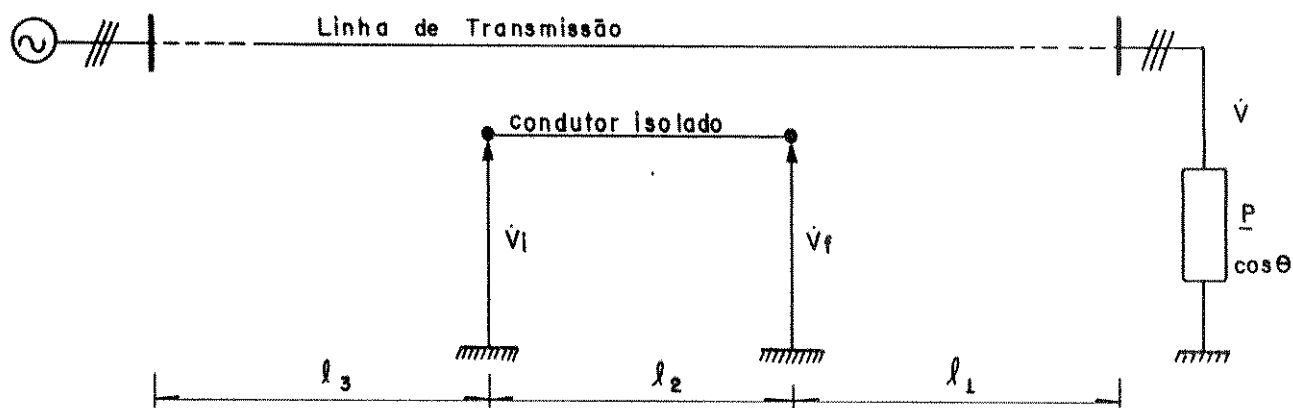


Figura 4.7 - Configuração do sistema de transmissão e condutor isolado, particionada em tres trechos

Tabela 4.15 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 3 para alguns posicionamentos

EXTENSÃO QUADRI P. $l_3$ [ km ]	EXTENSÃO QUADRI P. $l_2$ [ km ]	EXTENSÃO QUADRI P. $l_1$ [ km ]	$v_i$ [ kV ]	$v_f$ [ kV ]
10	10	180	14.89	14.91
40	10	150	14.80	14.82
90	10	100	14.66	14.69
150	10	40	14.53	14.56
180	10	10	14.44	14.48
10	100	90	14.87	14.87
40	100	60	14.56	14.80
80	100	20	14.44	14.71

Condições na linha: Comprimento = 200 km

Pot.trifásica suprida = 132 MW

Tabela 4.16 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 4 para alguns posicionamentos

EXTENSÃO QUADRI P. $l_3$ (km)	EXTENSÃO QUADRI P. $l_2$ (km)	EXTENSÃO QUADRI P. $l_1$ (km)	$v_i$ (kV)	$v_f$ (kV)
10	10	180	14.42	14.43
40	10	150	14.36	14.38
90	10	100	14.29	14.32
150	10	40	14.26	14.29
180	10	10	14.22	14.27
10	100	90	14.25	14.47
40	100	60	14.19	14.45
80	100	20	14.12	14.44

Condições na linha: Comprimento = 200 km

Pot. trifásica suprida = 370 MW



Tabela 4.17 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 5 para alguns posicionamentos

EXTENSÃO QUADRI P. $l_3$ [ km ]	EXTENSÃO QUADRI P. $l_2$ [ km ]	EXTENSÃO QUADRI P. $l_1$ [ km ]	$v_i$ [ kV ]	$v_f$ [ kV ]
30	10	360	43.99	44.06
100	10	290	43.31	43.77
160	10	230	42.71	42.77
250	10	150	41.79	41.98
380	10	10	40.64	40.67
30	100	270	43.14	43.86
150	100	150	41.98	42.65
250	100	50	41.06	41.63

Condições na linha: Comprimento = 400 km

Pot. trifásica suprida = 900 MW

Tabela 4.18 - Tensões induzidas no cabo pára-raios isolado do sistema de transmissão 6 para alguns posicionamentos

EXTENSÃO QUADRIP. $l_3$ [km]	EXTENSÃO QUADRIP. $l_2$ [km]	EXTENSÃO QUADRIP. $l_1$ [km]	$v_i$ [kV]	$v_f$ [kV]
30	10	260	60.53	60.61
100	10	190	60.45	60.58
160	10	130	60.54	60.70
230	10	60	60.80	61.01
280	10	10	61.09	61.32
30	100	170	59.97	60.96
100	100	100	59.79	61.22
160	100	40	59.81	61.56

Condições na linha: Comprimento = 300 km

Pot.trifásica suprida = 2100 MW

As tabelas 4.15 a 4.18 indicam que, o posicionamento do cabo pára-raios isolados nos trechos analisados ao longo da linha de transmissão, forneceu níveis de tensão induzida inicial e final sobre o mesmo, com diferenças não significativas, gerando novamente um perfil uniforme de tensão entre o terminal emissor e receptor, com possibilidade de aproveitamento para derivação de potência.

#### 4.5 OPERAÇÃO DO CONDUTOR ISOLADO SOB CONDIÇÕES DE CARGA

Uma vez utilizado os conceitos da teoria modal de propagação e de quadripolos aplicados a um sistema constituído da linha de transmissão e condutor isolado, procede-se a seguir, os estudos de desempenho deste último na presença de cargas. Para tanto, seja o sistema de transmissão 1, cujos dados foram anteriormente fornecidos nas tabelas 3.1 e 3.2 onde, como condutor isolado, foi adotado um cabo adicionado ao sistema e conectado, ao seu final, um transformador abaixador que alimenta uma carga  $\dot{Z}'_c$ . O caso é indicado na figura 4.8.

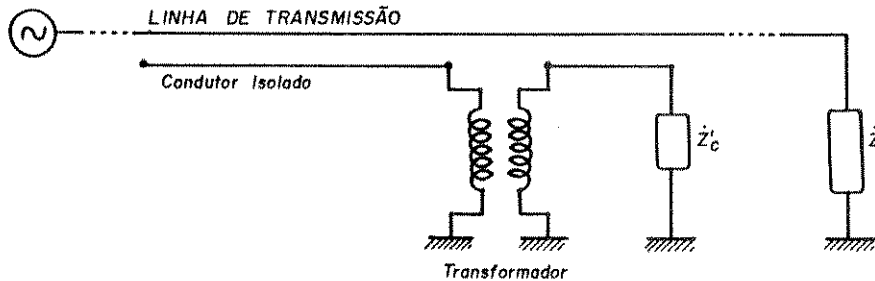


Figura 4.8 - Esquema de conexão do transformador e carga no condutor isolado

Para facilitar e compatibilizar a análise, a carga  $\dot{Z}'_c$  é referida ao primário do transformador, passando a ser denotada por  $\dot{Z}_c$ . O circuito parcial que contém o condutor isolado, indicado na figura 4.8, pode ser representado através de um circuito equivalente Thèvenin, como mostra a figura 4.9. Na figura,  $V_{th}$  é a

tensão eletrostática induzida no condutor isolado e  $C_{th}$  é a soma das capacitâncias concorrentes no condutor isolado, denominada capacitância equivalente e já analisada anteriormente.

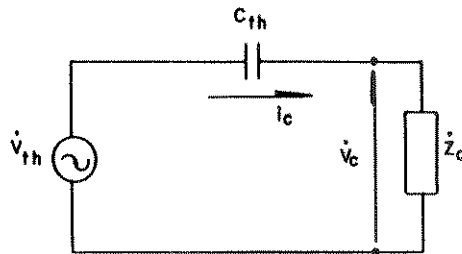


Figura 4.9 - Circuito equivalente do sistema parcial condutor isolado - carga.

Inicialmente, com o comprimento do condutor isolado mantido constante, procede-se a variação do módulo da carga  $Z_c$  ligada ao mesmo e avalia-se a tensão  $V_c$  em seus terminais. Os resultados obtidos são ilustrados nas figuras 4.10 a 4.13 e na tabela 4.19.

Os gráficos das figuras 4.10 a 4.13 representam o comportamento da tensão instantânea no terminal da carga,  $v_c$ , e da fonte de alimentação,  $v_{th}$  para um período igual 0,10 s. Para efeito de análise, considerar-se-á vencida a fase transitória inicial na simulação, após um tempo de 0,012 s. Observa-se nestas, a alteração da tensão eficaz  $V_c$  nos terminais da carga a medida que o módulo da carga  $Z_c$  é variado.

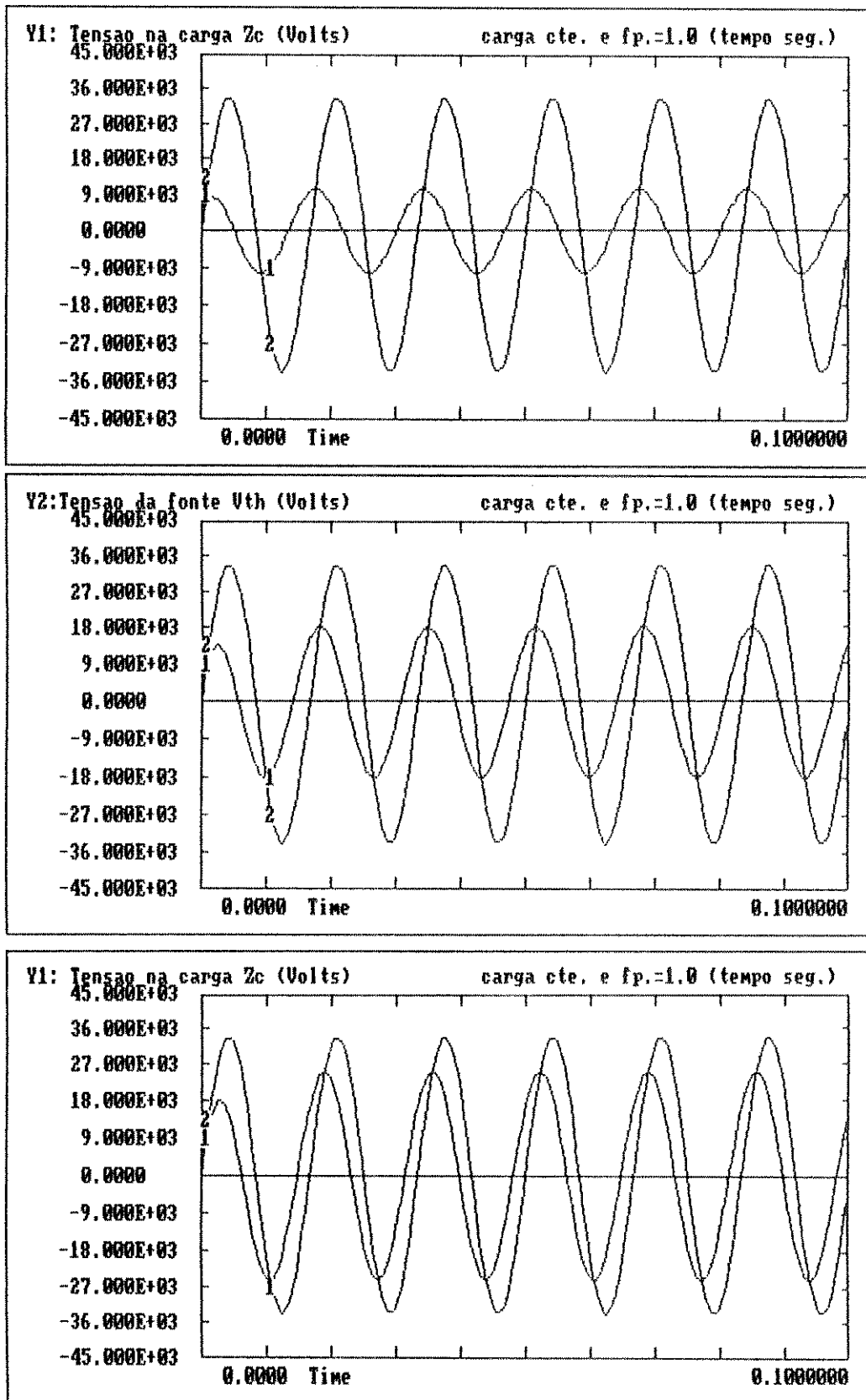


Figura 4.10 - Variação da tensão  $v_c$  nos terminais da carga e  $v_{th}$  da fonte para impedâncias  $Z_c$  com  $fp.=1,0$

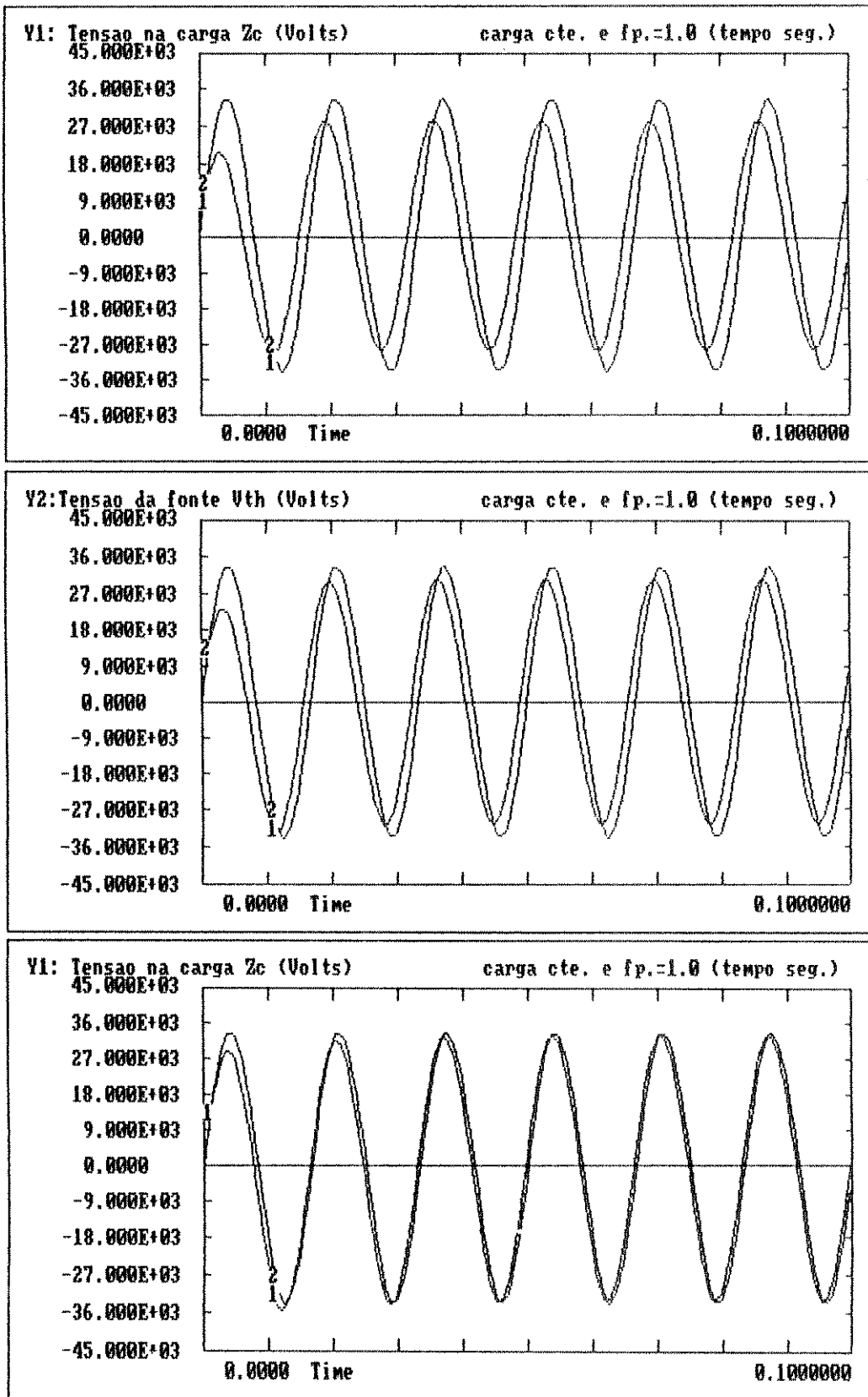


Figura 4.11 - Variação da tensão  $v_c$  nos terminais da carga e  $v_{th}$  da fonte para impedâncias  $Z_c$  com  $fp.=1,0$

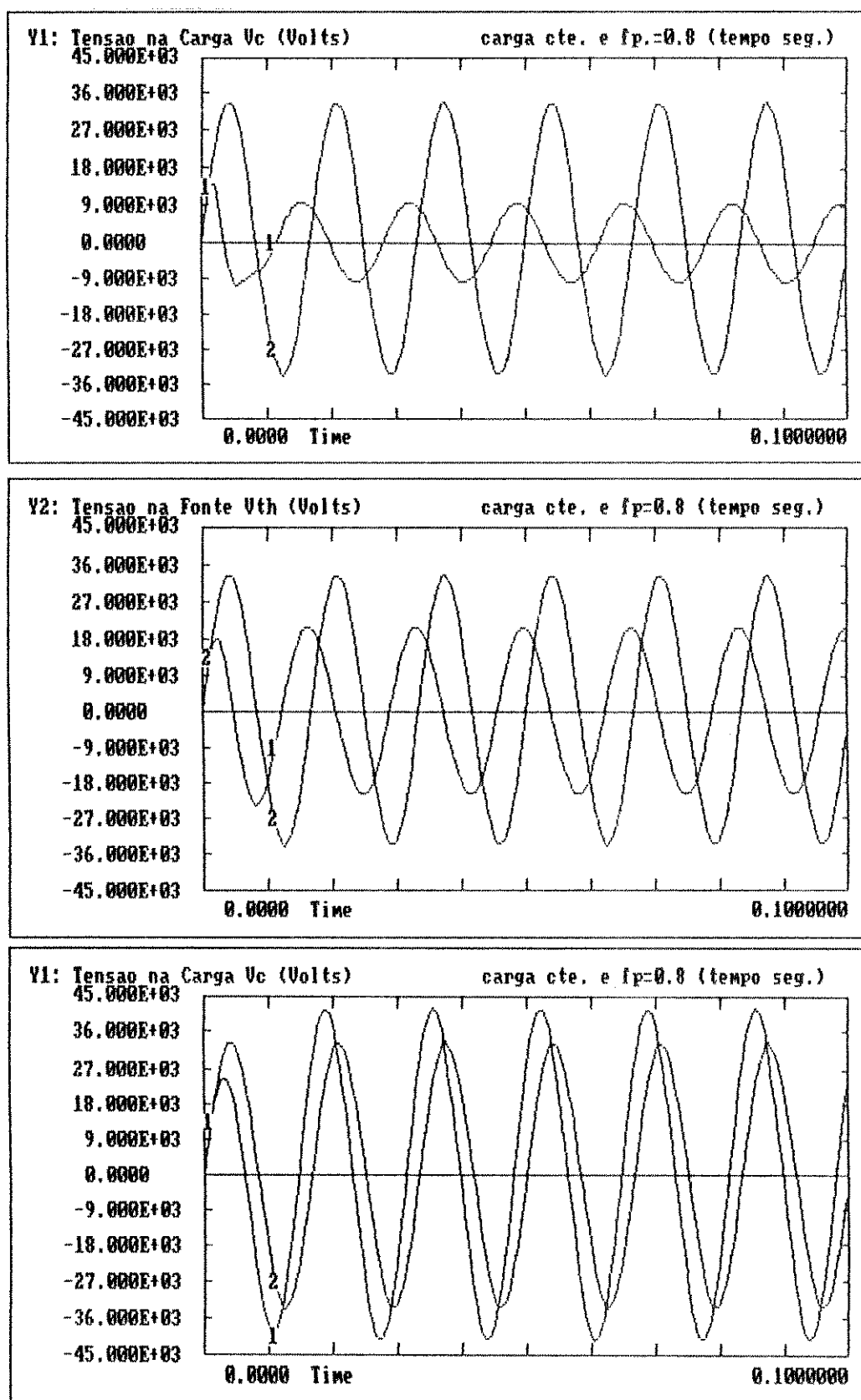


Figura 4.12 - Variação da tensão  $v_c$  nos terminais da carga e  $v_{th}$  da fonte para impedâncias  $\dot{Z}_c$  com  $fp.=0.8$  (ind.)

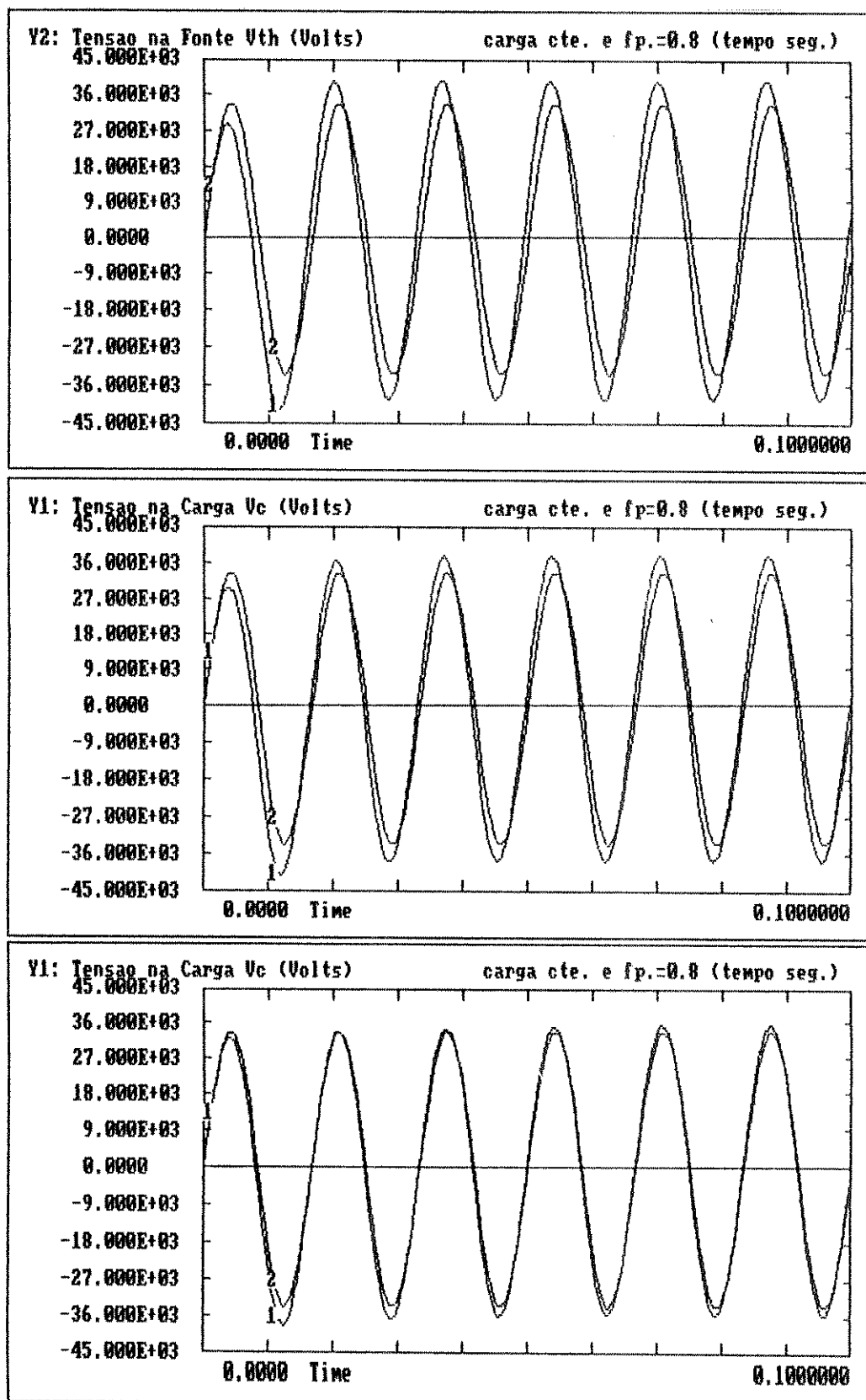


Figura 4.13 - Variação da tensão  $v_c$  nos terminais da carga e  $v_{th}$  da fonte para impedâncias  $Z_c$  com  $fp.=0.8$  (ind.)



Tabela 4.19 - Tensão na carga  $V_c$  com variação do módulo da carga  $Z_c$  de fator de potência unitário

TENSAO $V_c$ NA CARGA (kV)	IMPEDÂNCIA $Z_c$ (ohm)
4.36	5800
10.61	15500
16.71	30800
21.68	70600
22.51	95320
23.18	150300

A tabela 4.19 indica também, que a mudança do módulo da carga  $Z_c$  altera consideravelmente o valor da tensão  $V_c$ , condição esta inaceitável para uma boa regulação de tensão e qualidade do suprimento de energia.

Prosseguindo, mantendo-se constante o fator de potência da carga, altera-se seu módulo e observa-se a tensão e a potência absorvida em seus terminais. As curvas estão apresentadas na figura 4.14. Novamente, constata-se a falta de qualidade da energia obtida.

Na maioria das situações reais no campo, a carga a ser alimentada pelo condutor isolado, não se encontra nas proximidades do final deste. Esta condição impõe, para muitos casos, a

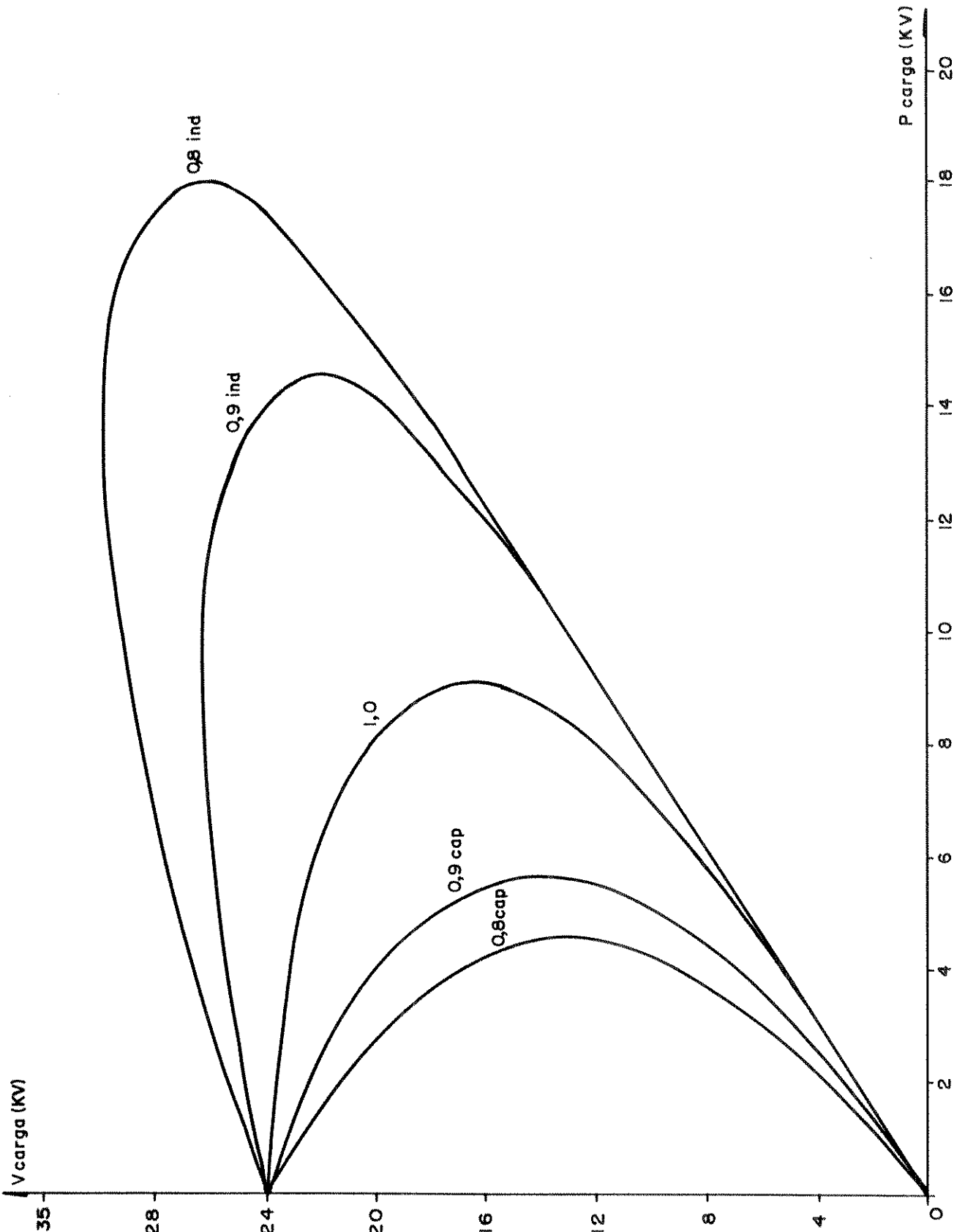


Figura 4.14 - Tensão nos terminais da carga em função da potência absorvida, com diversos fatores de potência

necessidade de se utilizar um pequeno ramal de distribuição para se levar energia elétrica até a carga, conforme ilustra a figura 4.15.

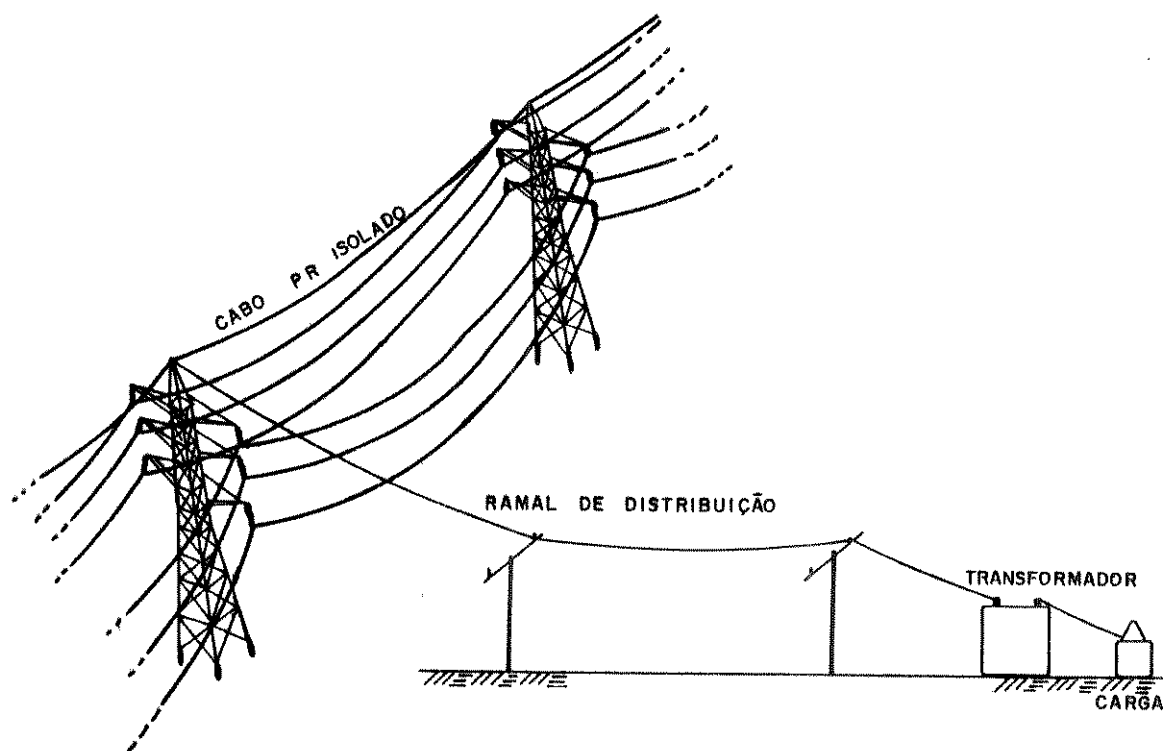


Figura 4.15 - Esquema ilustrativo do circuito alimentador condutor isolado - carga

O esquema da figura 4.15 pode ser representado pelo circuito equivalente indicado na figura 4.16.

O ramal de distribuição foi considerado semelhante a uma linha primária rural típica, cujos cabos são suspensos sobre cruzetas padronizadas e seu circuito equivalente foi baseado no modelo de uma linha curta, portanto, desprezadas as capacitâncias.

Na figura 4.16,  $R_L$  e  $L_L$  representam a resistência e a indutância dos condutores do ramal de distribuição.

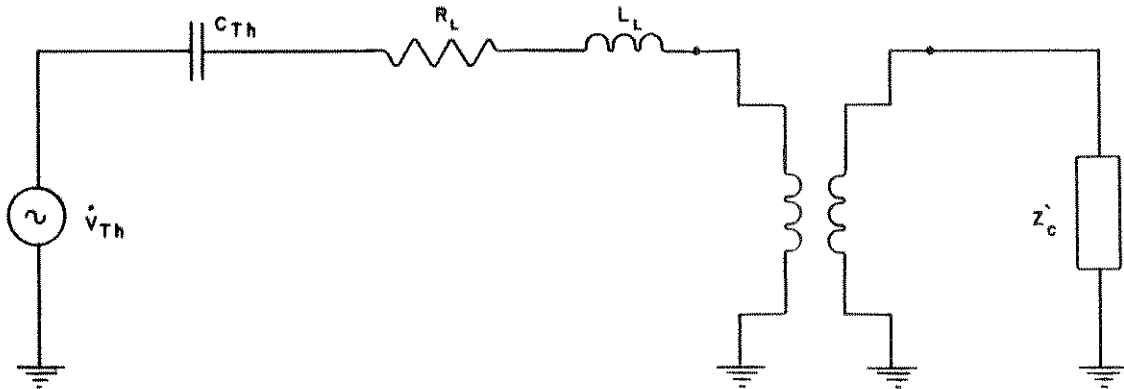


Figura 4.16 - Circuito equivalente da figura 4.15

Levando-se em consideração o sistema de transmissão 4 ilustrado na figura 3.4 e o circuito da figura 4.16, os valores de  $V_{th}$  e  $C_{th}$  nesta última, serão aqueles relativos ao sistema anteriormente mencionado. Para o ramal de distribuição adotar-se-á condutores CAA - 4 AWG, típicos nas linhas de distribuição, com uma extensão de 5 (cinco) quilômetros, cuja resistência e indutância são iguais a  $1,60 \Omega/\text{km}$  e  $1,407 \cdot 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ , respectivamente. Quanto a carga, esta é inserida do lado primário do transformador e variada linearmente com o tempo, como ilustrado na figura 4.17. Isto conduz aos gráficos descritos nas figuras 4.18 e 4.19.

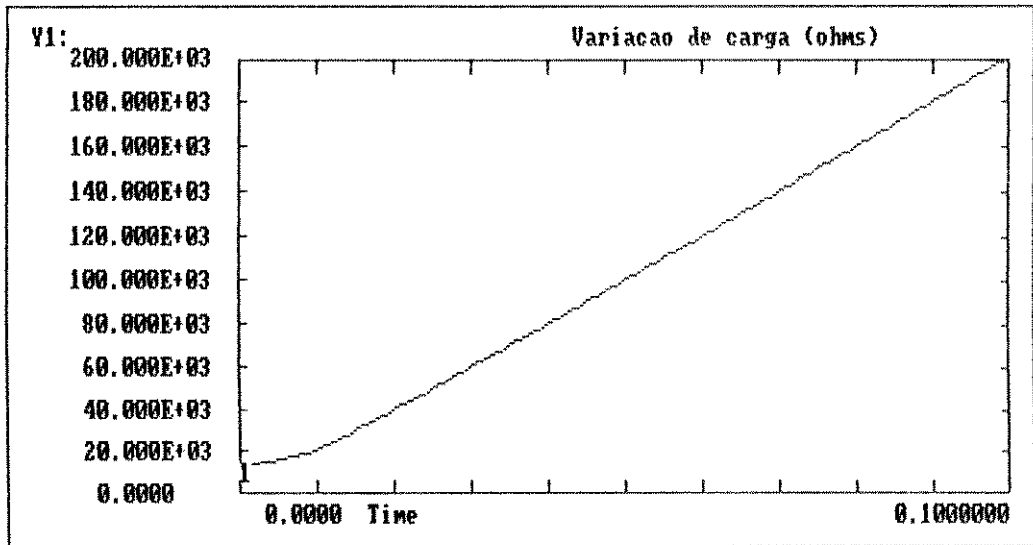


Figura 4.17 - Característica da impedância variável de carga

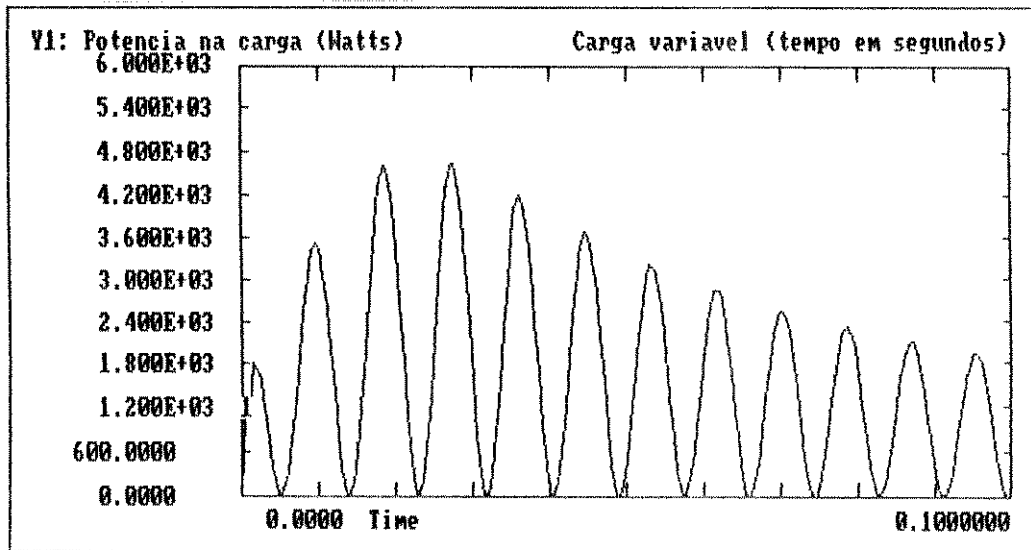


Figura 4.18 - Potência instantânea nos terminais da carga variável

A figura 4.18 representa o comportamento da potência instantânea fornecida à carga variável com fator de potência

unitário, para um período igual a 0,10 s. Observa-se nesta que, traçando uma envoltória que passe pelos pontos máximos de potência, tem-se uma característica semelhante a variação da potência ativa eficaz na carga, apresentando máximo valor de potência, no instante em que a carga passa a ter valor igual a impedância interna,  $Z_{th}$  da fonte. Estes resultados confirmam e reproduzem as informações anteriormente obtidas na figura 4.14.

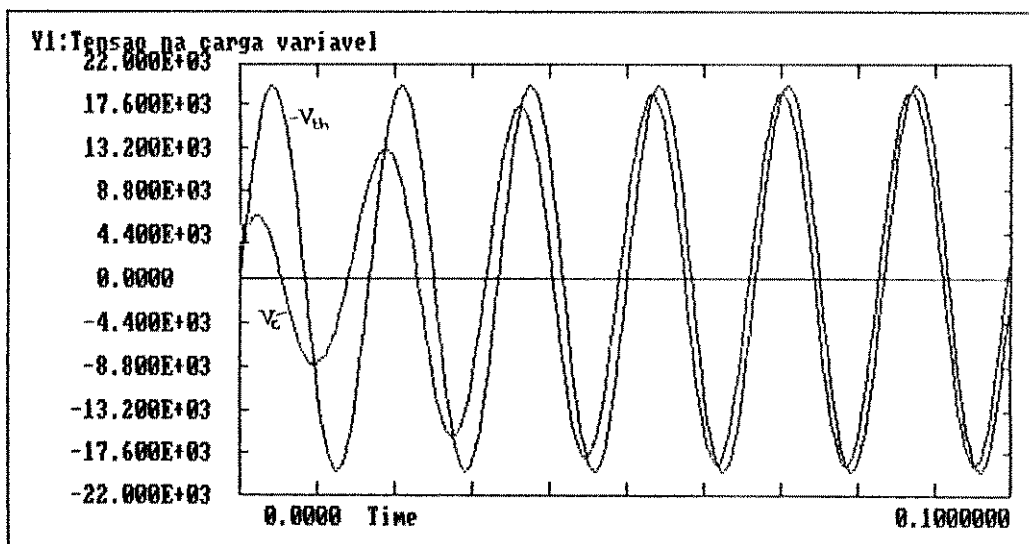


Figura 4.19 - Tensões instantâneas no terminal da carga e fonte

A figura 4.19 indica a variação das tensões instantâneas no terminal da carga,  $v_c$ , e da fonte  $v_{th}$  ao longo do tempo, para as condições de carga da figura 4.17. Pode-se verificar que, a tensão eficaz no terminal da carga,  $V_c$ , varia, a medida que é alterada a impedância de carga ( $\dot{Z}_c$ ). Esta condição demonstra a

impossibilidade de utilizar a energia resultante do sistema de derivação condutor-isolado, uma vez que, a tensão fornecida à carga não se mantém constante para variações na impedância de carga. Assim, observando-se as figuras 4.14 e 4.18, verifica-se que, embora seja possível extrair potência do condutor isolado (ou cabo pára-raios isolado), isto é conseguido às custas de uma regulação de tensão muito elevada. Esse fato se justifica, levando em consideração a alta impedância equivalente da fonte Thevenin, de caráter predominantemente capacitiva. Isto também esclarece o motivo pelo qual as curvas de regulação da figura 4.14 tenham uma característica diferente das usuais, ou seja, quanto mais indutiva a carga, maior o limite de potência ativa transmissível.

Para a solução deste problema pode-se recorrer a algumas estratégias: colocação de cargas fictícias, circuito alimentador ressonante, circuito regulador controlado à tiristores ou circuito regulador com equipamento de núcleo saturado. Muito embora, as sugestões acima apresentadas, mereçam relevante e destacada importância, não é pretensão neste trabalho, analisar e detalhar cada uma das propostas. Algumas destas sugestões podem ser observadas e estudadas com detalhes em [6,7,19,21]. Porém, convém ressaltar, que deve-se sempre ter como um dos objetivos na extração de potência, a melhor qualidade possível da energia elétrica entregue ao consumidor.

A colocação de cargas fictícias, significa manter a impedância  $\dot{Z}'_c$ , vista dos terminais do transformador constante, isto é, na diminuição da carga real ligada no sistema do condutor isolado, algumas cargas fictícias seriam adicionadas através de um

sistema de monitoramento.

O circuito alimentador ressonante [6], seria composto de um capacitor de ajuste  $C'_A$  e um indutor  $L'_A$ , escolhidos de tal modo que torne o circuito, visto dos terminais da carga, ressonante. A finalidade do capacitor  $C'_A$  é associar-se com a capacitância  $C_{th}$  da fonte e resultar em menor valor para a capacitância total, que deverá ser praticamente igual a reatância indutiva na ressonância, fornecendo para esta última, valores que poderiam ser facilmente encontrados no comércio. A configuração é apresentada na figura 4.20.

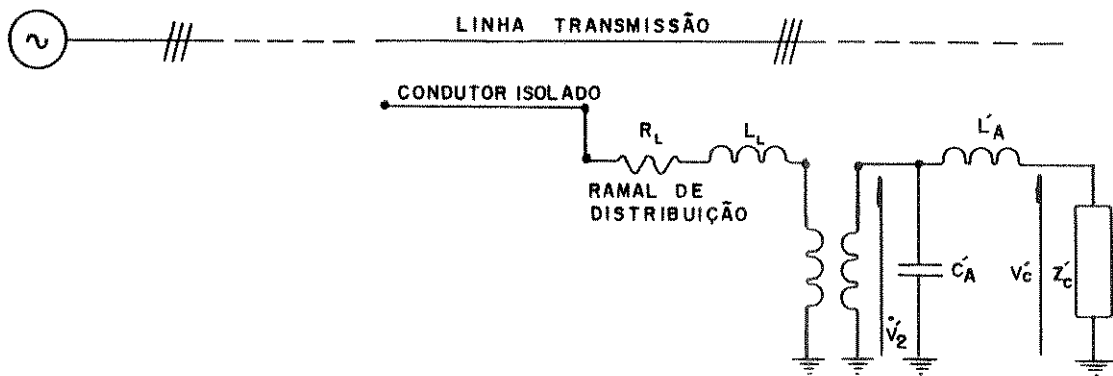


Figura 4.20 - Circuito ressonante e seus componentes

Levando em consideração o sistema de transmissão 4 e o circuito da figura 4.20, a figura 4.21, mostra o comportamento da tensão instantânea no terminal da carga,  $v_c$ , para três situações de impedância de carga, em pu. Para tal tomou-se como valor base de impedância, a impedância da fonte Thèvenin, ou seja,  $Z_{base} = 39589 \Omega$  (referida ao lado de alta do transformador).



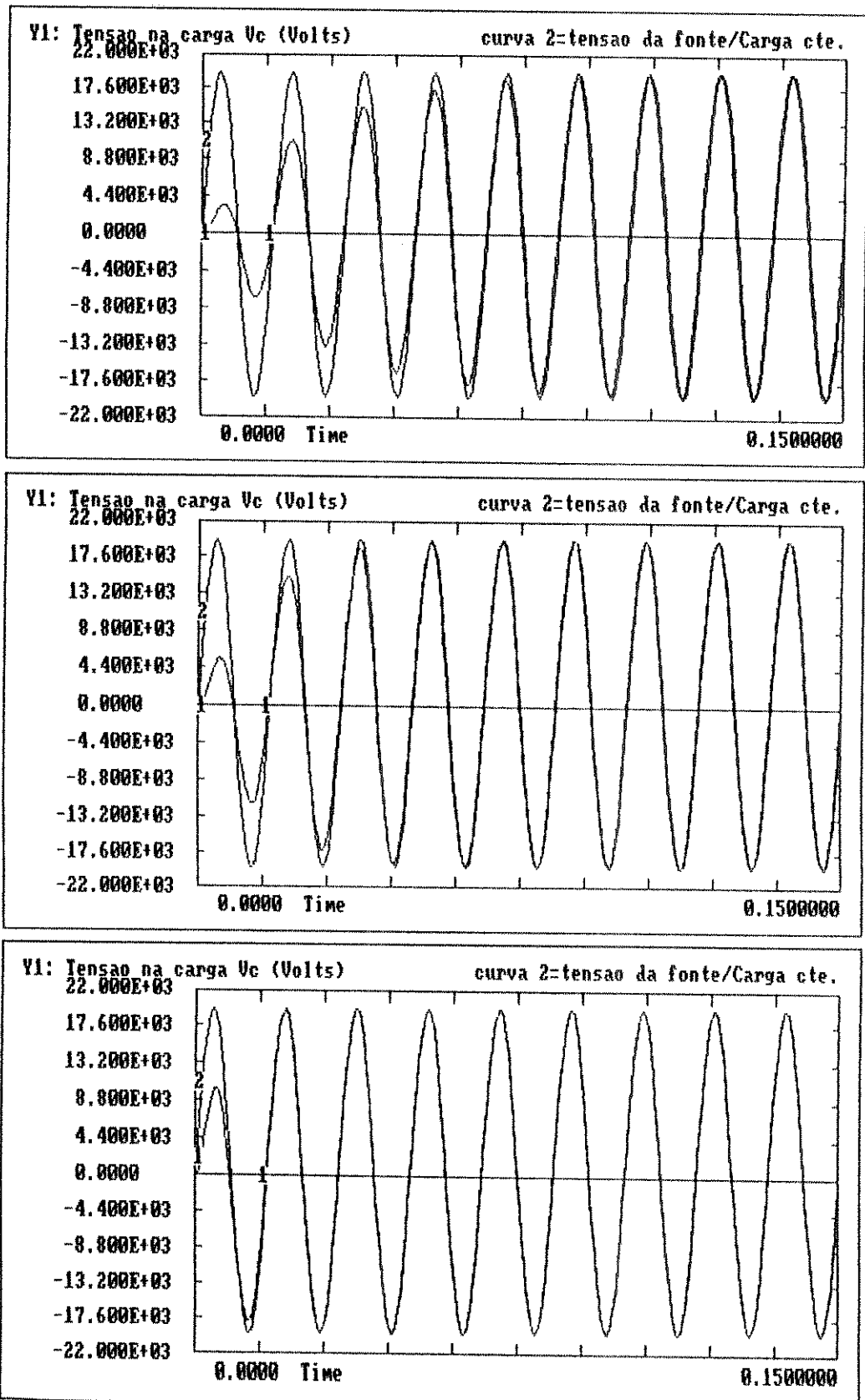


Figura 4.21 - Tensões instantâneas no terminal da carga para impedância de carga constante.

Observa-se das curvas da figura 4.21 que, a condição de ressonância garante que a tensão  $V_{th}$  seja aplicada nos terminais da carga, para qualquer valor de corrente. Muito embora, a questão da regulação de tensão fique solucionada, deve-se registrar que a tensão  $V'_2$  indicada na figura 4.20, pode atingir valores insuportáveis a medida que as potências a serem derivadas aumentem. Todavia, este fato pode ser resolvido através do estabelecimento do limite máximo de potência a ser extraída. Este limite é imposto pela própria fonte, uma vez que, não seria possível e praticável extrair potência por unidade de comprimento de condutor isolado de forma ilimitada. Isto significa que a fonte deve ter um limite de derivação de potência o qual depende dos níveis admissíveis da tensão  $V'_2$ .

A figura 4.22, obtida a partir das mesmas condições anteriores, registra os resultados oriundos de repentinas alterações da carga. As alterações foram geradas aplicando e retirando degraus de amplitudes iguais a 0,1 pu, 0,3 pu e 0,5 pu com duração de 0,045 s. O estudo é realizado em regime permanente em uma sequência evolutiva de análise e observações dos resultados. A entrada e saída instantânea de carga pode provocar maiores picos de tensão, na condição em que a carga aumenta 50% da impedância base, porém, em menos de um ciclo a condição de ressonância é retomada, mantendo a tensão no terminal da carga, novamente em seu valor anterior, fato este ilustrado na figura 4.22.

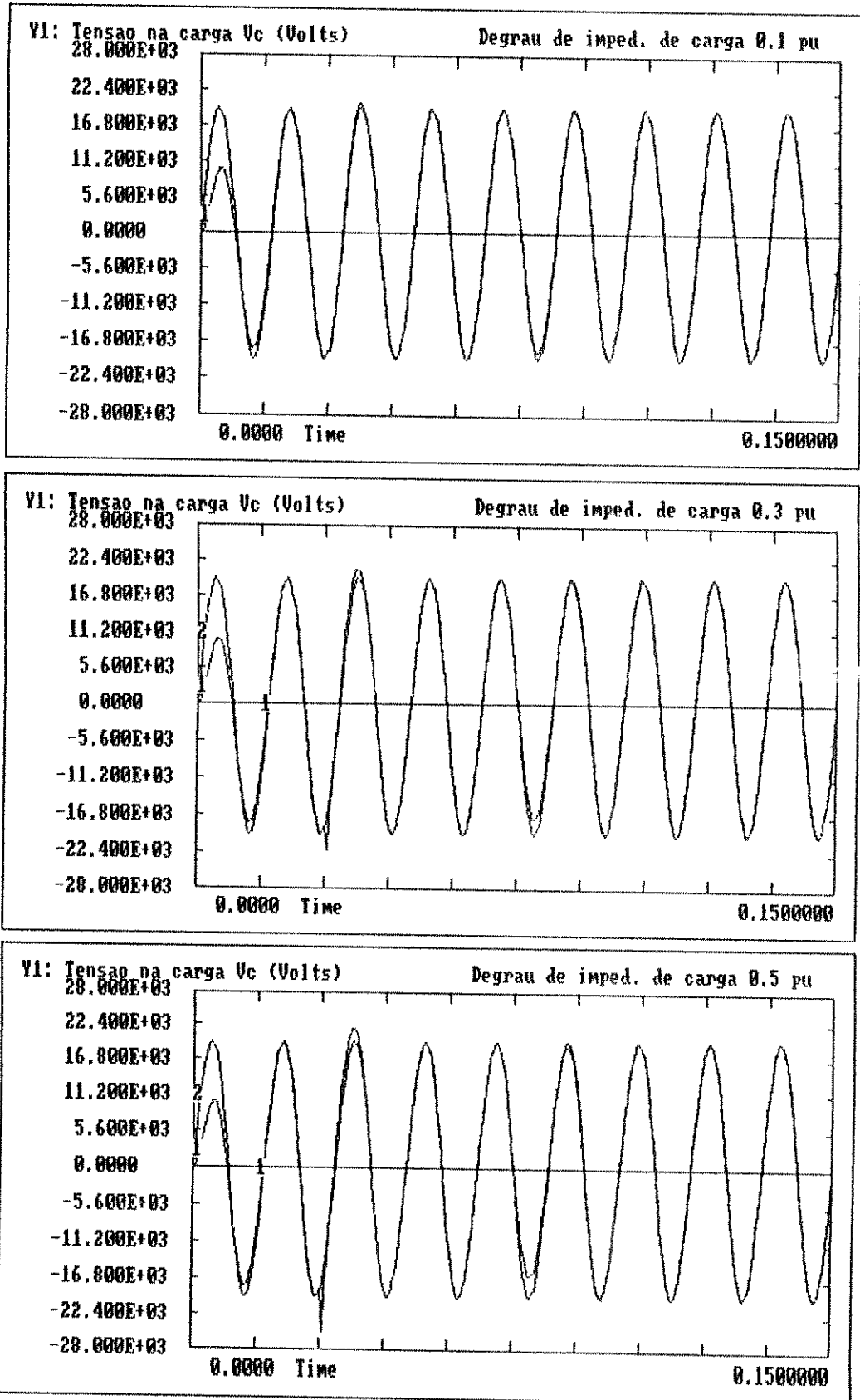


Figura 4.22 - Tensões instantâneas na carga para alterações repentinas da impedância de carga

A próxima estratégia de regular a tensão na carga é o uso do regulador controlado à tiristores.

A finalidade deste é atuar sobre o sistema e manter o valor eficaz da tensão nos terminais da carga  $V_c$ , constante, para uma determinada faixa de variação da carga [7]. Este é composto de um circuito de tiristores em anti-paralelo e sua introdução na configuração condutor isolado-carga pode se dar, por exemplo, da forma como indicada nas figuras 4.23 e 4.24.

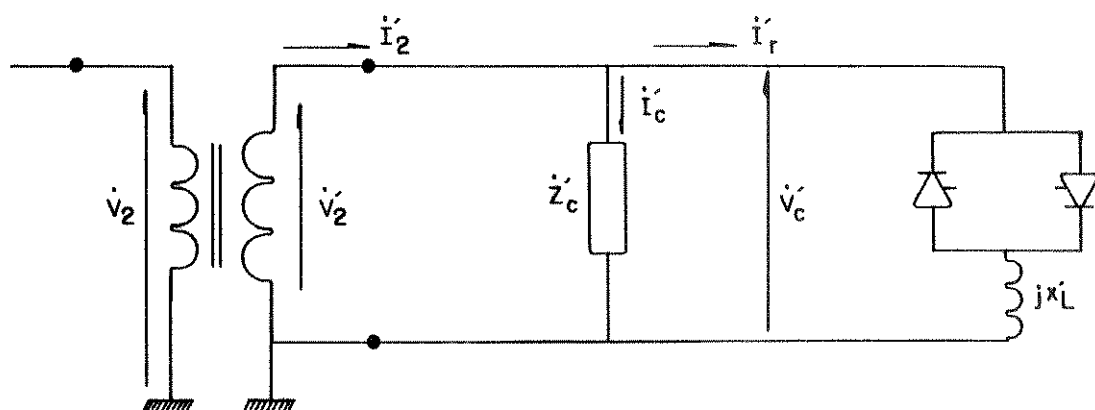


Figura 4.23 - Circuito regulador à tiristores com carga fictícia

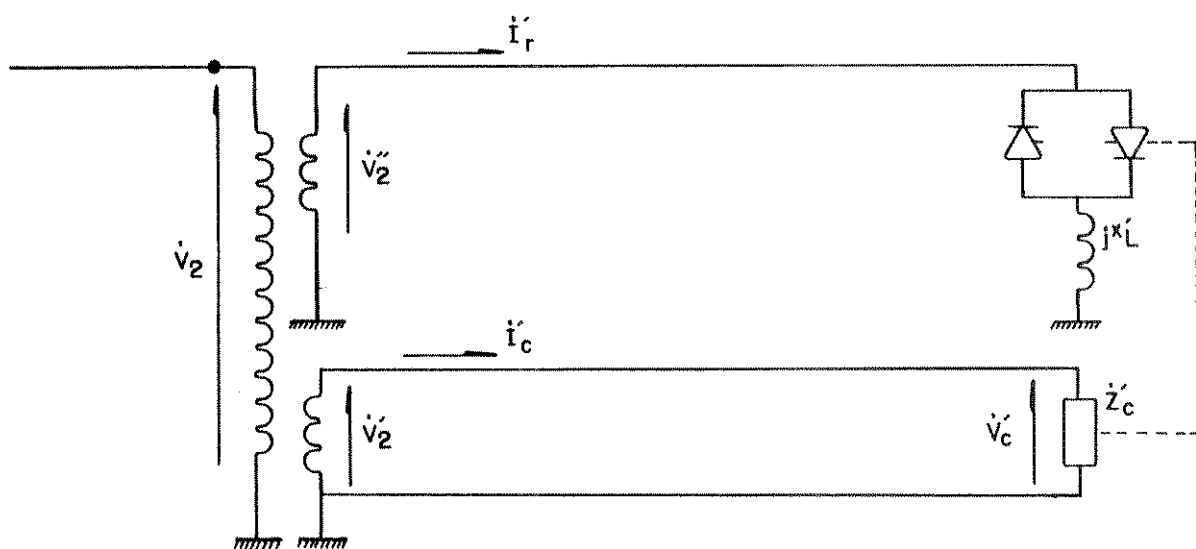


Figura 4.24 - Circuito regulador à tiristores com um transformador de três enrolamentos

A figura 4.23 mostra o controle da tensão  $V_c$  utilizando uma carga fictícia ajustada pela corrente no secundário do transformador, enquanto que a figura 4.24 ilustra a proposta com um transformador de três enrolamentos, onde o ajuste da tensão é feito por um enrolamento auxiliar.

A utilização de um equipamento à núcleo saturado, controla a tensão nos terminais da carga, através da característica não linear fluxo  $\times$  corrente (ou tensão  $\times$  corrente) do mesmo, para uma determinada faixa de valores de carga a ser alimentada [19,21]. Para uma melhor compreensão desta estratégia seja o circuito indicado na figura 4.25, onde  $V_{th}$ ,  $C_{th}$ ,  $R_L$  e  $L_L$  tem o mesmo significado dos parâmetros indicados na figura 4.16. Adotando-se um transformador ideal de relação  $N:1$  e referindo-se os elementos do secundário para o primário, tem-se a figura 4.26.

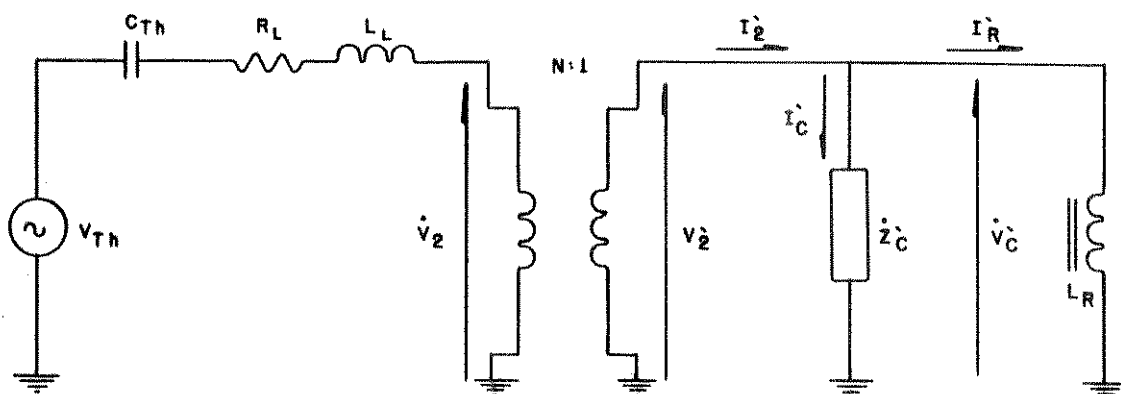


Figura 4.25 - Circuito com carga, transformador e equipamento de núcleo saturado.

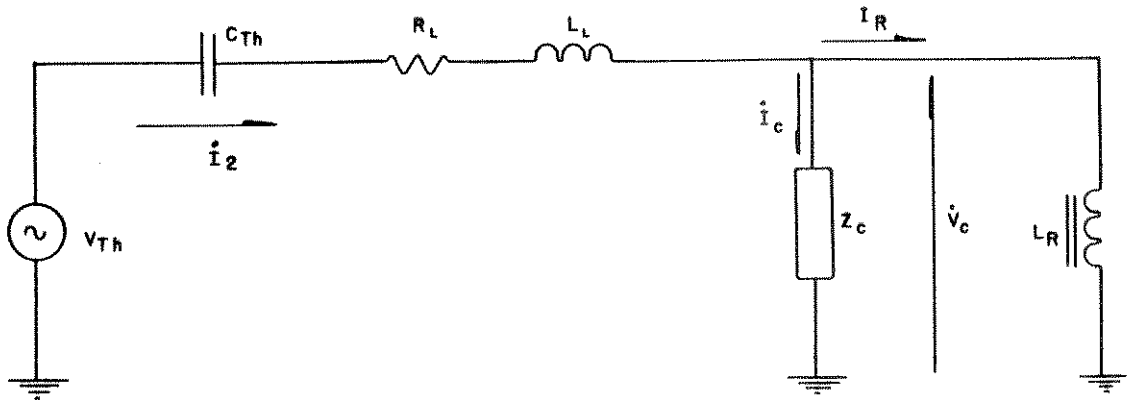


Figura 4.26 - Circuito equivalente com carga e Reator de núcleo saturado

Da figura 4.26, pode-se escrever:

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{th} - j.X_{cth} \cdot (\dot{I}_c + \dot{I}_R) - R_L \cdot (\dot{I}_c + \dot{I}_R) - j.X_L \cdot (\dot{I}_c + \dot{I}_R) \quad (4.31)$$

Na equação anterior, as grandezas  $V_{th}$ ,  $X_{cth}$ ,  $R_L$  e  $X_L$  não dependem da carga e são consideradas constantes e a tensão  $V_{th}$  é imposta pela linha principal, podendo ser adotada como senoidal com período e amplitude constantes. A impedância  $X_{cth}$  é calculada de acordo com a configuração do sistema adotado.

Face a estas observações, pode-se concluir que, o valor eficaz da tensão nos terminais da carga,  $V_c$ , só depende da soma das correntes  $I_R$  e  $I_c$ , e se o valor eficaz de sua soma,  $I_2$ , permanecer invariável, a tensão  $V_c$ , também, permanecerá.

Reportando-se ao circuito da figura 4.26 e estando o sistema funcionando em condições nominais, diminui-se o valor da impedância de carga  $Z_c$ . Com a tensão  $V_c$ , ainda constante, o valor

da corrente  $I_c$  é aumentado e o mesmo ocorre com as quedas de tensão em  $X_{cth}$ ,  $R_l$  e  $X_l$ . Isto produz uma diminuição do valor da tensão  $V_c$ , conforme se observa na equação (4.31). O reator de núcleo saturado, detecta este fato e através de seu controle intrínseco diminui o valor da corrente  $I_R$ , de tal forma que o valor da corrente  $I_z$  volte ao inicial. Este fato resulta em que a queda de tensão em  $X_{cth}$ ,  $R_l$  e  $X_l$  e o valor da tensão  $V_c$  voltem aos seus valores originais.

Ainda observando a figura 4.9 e como demonstrado em [6], sabe-se que as condições de transferência máxima de potência para uma carga  $\dot{Z}_c$ , ligada nos terminais do transformador, pode ser traduzida pela seguinte equação:

$$P_{lmax} = V_{th}^2 \cdot \frac{\omega C_{th}}{2} \cdot \frac{\cos\varphi_z}{(1 - \text{sen}\varphi_z)} \quad (4.32)$$

$$\dot{V}_{cmax} = \dot{V}_{th} \cdot \frac{(1 - \text{sen}\varphi_z) - j \cos\varphi_z}{2(1 - \text{sen}\varphi_z)} \quad (4.33)$$

$$\dot{Z}_c = Z_c \cdot e^{j\varphi_z} \quad (4.34)$$

Considerando que a carga possua fator de potência próximo da unidade,  $\cos\varphi_z = 1.0$ , as equações (4.32) e (4.33) se transformam em:

$$P_{lmax} = V_{th}^2 \cdot \frac{\omega \cdot C_{th}}{2} \quad (4.35)$$

$$V_{cmax} = V_{th} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (4.36)$$

#### 4.5.1 Potência Máxima Extraída nos Cabos Pára-Raios dos Sistemas de Transmissão Adotados

Na expectativa de avaliar os valores máximos de derivação de potência, através dos cabos pára-raios isolados dos sistemas de transmissão associados às figuras 3.1 a 3.6, utilizou-se como condutor isolado, um dos cabos pára-raios da linha de transmissão e admitiu-se que as linhas apresentam carregamento igual a potência natural.

Nestas condições, a tabela 4.20 indica os níveis de potência extraída, por quilômetro de cabo pára-raios isolado.

Tabela 4.20 - Potência Extraída nas configurações utilizando cabo pára-raios isolado

TIPO DE CONFIGURAÇÃO	TIPO DE CIRCUITO	CLASSE DE TENSÃO [kV]	POTÊNCIA EXTRAÍDA [kW/km]
figura 3.1	simples	138.0	0.071
figura 3.2	duplo	138.0	0.290
figura 3.3	simples	230.0	0.280
figura 3.4	simples	345.0	0.230
figura 3.5	simples	500.0	2.200
figura 3.6	simples	750.0	4.380



Utilizando um trecho de cabo pára-raios isolado de comprimento igual 10 km, observa-se da tabela 4.20, que somente as configurações de classe de tensões maiores, conduzem a resultados razoáveis para as potências derivadas, ou seja 22 kW e 43.8 kW.

Entretanto, uma maneira de elevar os níveis de potência a ser extraída, é a utilização de um condutor isolado auxiliar colocado junto do sistema de transmissão.

Assim, empregando-se os sistemas de transmissão ilustrados nas figuras 3.1 a 3.6 e com as mesmas condições de carregamento anterior, aloja-se um condutor nesses sistemas de mesmo tipo dos condutores fases. As tabelas 4.21 a 4.26 apresentam os resultados obtidos para a máxima potência extraída por quilômetro de condutor.

Tabela 4.21 - Potência derivada do sistema de transmissão 1 com condutor isolado auxiliar

COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA [kV]	POTÊNCIA EXTRAÍDA [kW/km]
x [m]	y [m]		
4.5	10.5	28.06	1.31
4.5	10.0	22.23	0.75
4.5	9.5	18.09	0.50

Tabela 4.22 - Potência derivada do sistema de transmissão 2 com condutor isolado auxiliar

COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA [kV]	POTÊNCIA EXTRAÍDA [kW/km]
x [m]	y [m]		
3.0	15.5	20.99	0.68
3.0	15.0	18.63	0.50

Tabela 4.23 - Potência derivada do sistema de transmissão 3 com condutor isolado auxiliar

COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA [kV]	POTÊNCIA EXTRAÍDA [kW/km]
x [m]	y [m]		
7.8	21.5	38.57	2.42
7.8	20.5	29.07	1.31
7.8	19.5	23.09	0.81

Tabela 4.24 - Potência derivada do sistema de transmissão 4 com condutor isolado auxiliar

COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA [kV]	POTÊNCIA EXTRAÍDA [kW/km]
x [m]	y [m]		
10.0	16.4	61.29	6.06
10.0	14.4	39.29	2.40
10.0	13.4	31.91	1.59

Tabela 4.25 - Potência derivada do sistema de transmissão 5 com condutor isolado auxiliar

COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA [kV]	POTÊNCIA EXTRAÍDA [kW/km]
x [m]	y [m]		
9.15	26.4	130.35	29.08
9.15	23.4	73.82	8.27
9.15	20.4	48.31	3.44

Tabela 4.26 - Potência derivada do sistema de transmissão 6 com condutor isolado auxiliar

COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA (kV)	POTÊNCIA EXTRAÍDA (kW/km)
x (m)	y (m)		
13.95	27.0	76.82	8.83
13.95	29.0	87.72	11.63
13.95	32.0	97.28	14.43

Nota-se das tabelas anteriores que existindo a possibilidade de se colocar um condutor isolado em local diferente da posição dos cabos pára-raios, sem prejudicar as condições operativas da linha de transmissão, pode-se derivar potência com maiores valores por quilômetro de condutor e, em níveis adequados para o abastecimento de pequenas cargas.

Ainda, na tentativa de reunir mais informações sobre o parâmetro potência extraída, procurou-se através dos sistemas de transmissão 1 a 6 utilizar um condutor isolado diferente dos condutores de fases, empregando-se o condutor ASCR - "Raven", com as seguintes características:

resistência -  $0,696 \Omega/\text{km}$  a  $50^\circ\text{C}$  e 60 Hz

raio externo - 0,005050 m

raio médio geométrico - 0,00135 m

área total -  $53 \text{ mm}^2$

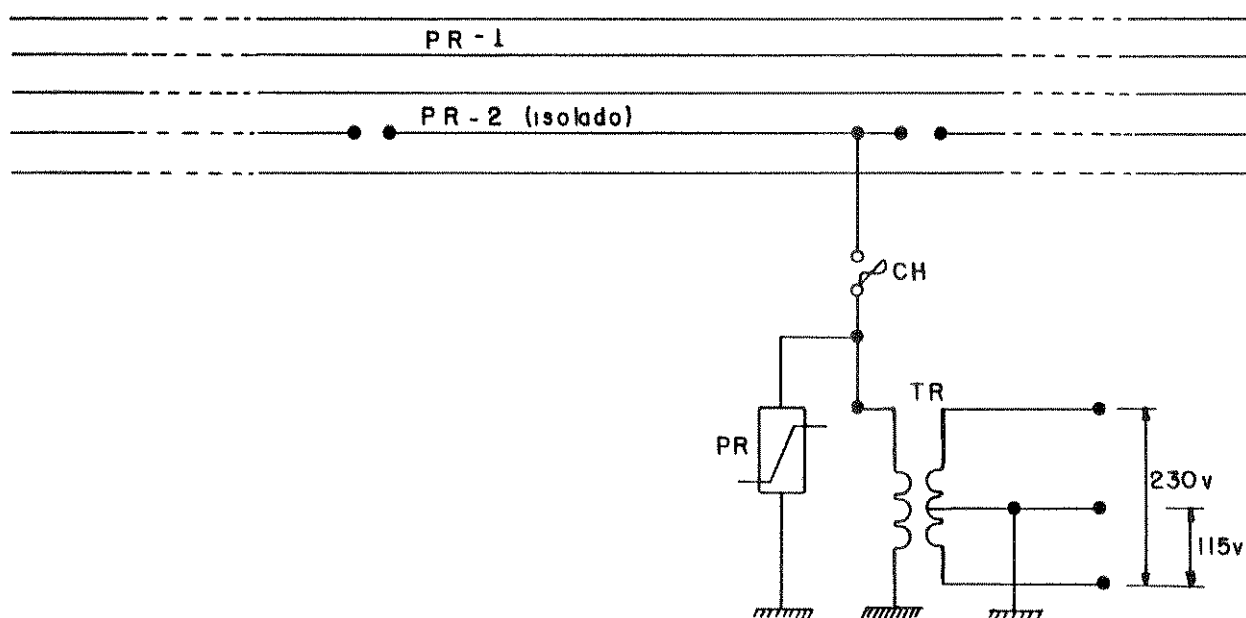
A tabela 4.27 resume os resultados obtidos. Comparando-se esta com as tabelas anteriores para uma mesma coordenada de condutor isolado, observa-se que a simples troca do tipo de condutor isolado, não introduz grandes mudanças nas quantidades de potência derivada, procedimento este que pode simplificar a fixação do condutor no sistema de transmissão, face ao uso de bitolas menores e conseqüentemente diminuir os custos de projeto.

Tabela 4.27 - Potência derivada dos sistemas de transmissão 1 a 6 com condutor isolado auxiliar "Raven"

TIPO DE CONFIGURAÇÃO	COORDENADAS COND. ISOLADO		TENSÃO INDUZIDA (kV)	POTÊNCIA EXTRAÍDA (kW/km)
	x (m)	y (m)		
figura 3.1	4.5	10.5	28.06	1.24
figura 3.2	3.0	15.5	20.99	0.63
figura 3.3	7.8	21.5	38.57	2.09
figura 3.4	10.0	14.4	39.29	2.12
figura 3.5	9.15	20.4	48.31	2.95
figura 3.6	13.95	32.0	97.28	12.36

## 4.6 ARRANJO TÍPICO E FATORES ECONÔMICOS

Uma das maneiras mais simples, porém eficiente, de se arranjar os equipamentos para extração de potência através de condutor isolado ou cabo pára-raios isolado, é a utilização do esquema monofásico com retorno por terra (MRT). A figura 4.27 apresenta um arranjo típico constituído de uma linha de transmissão com disposição dos condutores fases em lençol horizontal e um dos cabos pára-raios isolado em um trecho.



TR - Transformador Monofásico de distribuição de 5 ou 10  
kVA 19,92 kV / 230/115 V

CH - Chave Corta-Circuito fusível-tensão nominal 25.8 kV

PR - Pára-raios de distribuição - tensão nominal 27 kV

Figura 4.27 - Arranjo típico a pára-raios isolado e retorno por terra

Informações sobre as condições de utilização do sistema MRT e critérios para elaboração de projetos, podem ser encontradas em algumas concessionárias de energia elétrica, orientando os usuários através de seus manuais e enfocando ainda os possíveis limites e restrições no uso. Há de se ressaltar que, os sistemas MRT utilizados pelas concessionárias são aqueles tradicionais, com origem nas subestações e, portanto, não fazem uso do circuito de derivação de potência por acoplamento eletrostático. O valor final da potência a ser extraída através de condutores isolados apresentar uma faixa de valores muito extensa, visto que, uma série de fatores devem ser considerados quando da análise. Destes destacam-se: tipo de configuração do sistema de transmissão, utilização de cabo pára-raios ou condutor auxiliar isolado para derivar potência, etc. Assim, a definição do valor da potência da instalação fica sujeita a essas observações, porém, em um recente levantamento realizado pela Eletrobrás, concluiu-se que das cargas instaladas na zona rural poderiam ser supridas com transformadores de 5 kVA. Essa potência ligada a alimentadores monofásicos com retorno pela terra operando com tensão fase-neutro de 7,97 kV consomem apenas 0,63 A. Portanto, a alimentação destas cargas requer pequenas quantidades de potência derivada.

Considerando o arranjo ilustrado na figura 4.27, para uma instalação monofásica de potência nominal 10 kVA, constituída de materiais e equipamentos padronizados de distribuição de energia e desconsiderando-se o custo da mão de obra e materiais utilizados no isolamento do cabo pára-raios, obteve-se uma estimativa total de custo da ordem de US\$ 1500,00. Isto não inclui o valor dos

condutores, porém se for utilizado no circuito auxiliar derivativo de potência condutores CAA - 4 AWG -  $21.15 \text{ mm}^2$ , o custo deste, na execução do circuito é aproximadamente US\$ 163,00 por quilômetro. Quanto ao valor da mão de obra de lançamento de condutor em rede rural, estima-se em US\$ 360,00 por quilômetro. Estas duas últimas informações, definem os custos complementares da instalação, em função do comprimento do condutor a ser lançado no circuito auxiliar.

Por outro lado, o custo total de uma subestação tradicional depende de uma série de fatores, dos quais pode-se destacar: nível de tensão, tipo de instalação (ar livre ou interiores), local de construção e diagrama básico de ligação. Vários são os métodos utilizados para se estimar o custo de uma subestação [17]. Nos casos em que o estudo envolve transmissão de energia pode ser grande o número de subestações e nesta circunstância é recomendável o uso dos "building blocks" (blocos construtivos). Assim, excluindo-se os equipamentos pesados, como transformadores, compensadores síncronos, reatores e bancos de capacitores, pode-se dividir uma subestação em três blocos construtivos característicos:

a) entrada de linha

parte da subestação representada pelo local e equipamentos responsáveis pela conexão de uma linha de transmissão ao barramento.

b) conexão do transformador

parte da subestação representada pelo local e equipamentos responsáveis pela conexão do transformador ao barramento.



## c) disjuntor de transferência

parte da subestação representada pelo local e equipamentos responsáveis pela interligação de barras.

A tabela 4.28 apresenta a estimativa de custo de cada bloco construtivo, em dólares, para o esquema de ligação barra dupla. Para 69 kV foi utilizado o arranjo barra simples. O arranjo de barra dupla é utilizado nas tensões de 69 kV a 500 kV. Até 230 kV foram calculados custos de conexão de transformador com e sem disjuntor.

Tabela 4.28 - Custo estimativo dos blocos construtivos arranjo de barra dupla.

CLASSE DE TENSÃO (kV)	BLOCO 1	BLOCO 2	BLOCO 3	BLOCO 4
	[US\$]	[US\$]	[US\$]	[US\$]
69.0	150000	149000	85000	-
138.0	300000	214000	126000	107000
230.0	450000	356000	216000	209000
345.0	608000	493000	-	326000
440.0	826000	772000	-	559000
500.0	1090000	934000	-	658000

Bloco 1 - Entrada de Linha

Bloco 2 - Conexão de Transformador com disjuntor

Bloco 3.- Conexão de Transformador sem disjuntor

Bloco 4 - Disjuntor de Transferência

A tabela 4.28 indica os altos custos que envolvem a construção de uma subestação tradicional. Não é pretensão utilizá-la para comparação de custos com o arranjo ilustrado na figura 4.27, uma vez que, tratam-se de diferentes níveis de tensão. Por outro lado, não seria tecnicamente viável a construção de uma subestação classe de tensão 69 kV para suprimento de apenas algumas dezenas de kVA. Este aspecto pode ser observado na tabela 4.28 que, na classe de tensão 69 kV, o custo estimado total do arranjo é da ordem de US\$ 384000,00.

Em face das observações acima mencionadas, nota-se que os custos envolvidos nos projetos das estratégias de derivação de potência analisadas no trabalho para suprimento de pequenas cargas apresentam-se bastante atrativos.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O circuito auxiliar de derivação de potência por acoplamento eletrostático, também recebeu uma análise pormenorizada. Foi possível, pelo conteúdo descrito, verificar a necessidade da utilização da teoria modal de propagação e de quadripolos, o que levou a uma solução precisa dos valores de tensões e correntes ao longo das linhas de transmissão, principalmente tratando-se de linhas sem compensação e com grandes carregamentos. Esse aspecto gera um perfil de tensão irregular, calculado e observado com a aplicação da teoria supra citada.

Outro fato a ser destacado, refere-se a estratégia adotada para o condutor isolado. Utiliza-se os cabos pára-raios da linha ou um novo condutor auxiliar, com o objetivo de extair potência. Na primeira proposta, para sistemas de transmissão em operação, há necessidade apenas do isolamento do cabo pára-raios, resguardando sua função primária de proteção, ou seja, proteção contra às descargas atmosféricas. No caso do uso de um condutor isolado adicionado ao sistema de transmissão e localizado em posição estratégica, pode obter-se maiores níveis de potência extraída.

Com relação a regulação de tensão, de fundamental importância para uma boa qualidade da energia suprida, a mesma pode ser realizada por uma das técnicas propostas anteriormente.

Com o arranjo típico ilustrado na figura 4.27, procurou-se elaborar uma estimativa total de custo para essa proposta. Para tal, foram consideradas as seguintes atividades e componentes no estudo: mão de obra no isolamento do cabo pára-raios, supondo comprimento igual a 10 km; utilização de 34 isoladores com "arcing horns" para isolar o cabo pára-raios nesse trecho (adotado vão médio de 300 m); potência nominal da instalação monofásica igual a 10 kVA e os materiais e equipamentos descritos na figura 4.27. Desta forma, a estimativa total do custo é da ordem de US\$ 5850,00, sem incluir os custos multiplicadores de taxas incidentes.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES GERAIS

O estudo descrito no corpo do trabalho pode analisar, sob o ponto de vista técnico e econômico, a ratificação de se adotar qualquer proposta de derivação de potência das linhas de transmissão para suprimento de pequenas cargas localizadas ao longo e nas proximidades das linhas. Estes tipos, alimentam cargas a um custo mínimo e com qualidade razoável, cujo procedimento por sistemas de distribuição tradicionais seria inviável, face aos elevados custos envolvidos na construção dos mesmos.

O divisor de tensão capacitivo, tem destacada aplicação na elaboração e construção de projetos de instalações de extração de potência para a alimentação de cargas até 100 kVA. Experiências operativas internacionais, demonstram que esta técnica deve ser aplicada em linhas de transmissão de 72 a 138 kV e as pequenas cargas a serem alimentadas variam de 12 a 80 kVA. No capítulo 2, realizou-se um exemplo de instalação a divisor de tensão capacitivo cuja capacidade foi igual a 20 kVA, empregando-se uma linha de transmissão de 138 kV, onde componentes e parâmetros envolvidos no projeto foram determinados para funcionamento em regime permanente, destacando-se que na avaliação dos custos, o

banco de capacitores dimensionado resulta no equipamento mais oneroso financeiramente.

A estratégia de derivar potência elétrica de linhas de transmissão utilizando-se os cabos pára-raios isolados e energizados, é uma sugestão não recente. O prosseguimento da investigação técnica realizada no trabalho mostrou que esta proposta é adequada e os resultados observados geraram informações satisfatórias. Seu funcionamento, discutido anteriormente, é baseado no isolamento dos cabos pára-raios seguido da alimentação destes com um nível de tensão de valor próximo ou pouco superior ao utilizado pelos sistemas de distribuição. Esta característica, resulta em um sistema auxiliar de extração de potência, constituído de um circuito muito radial, e portanto, impõe aspectos restritivos ao comprimento do mesmo (na ordem de dezenas de quilômetros). Entretanto, esta proposta pode alimentar simultaneamente várias instalações de extração de potência no campo, com cerca de 100 kVA cada uma delas, resultando em um suprimento total de centenas de quilovolts-ampère.

Na aplicação efetiva dessa proposta, deve-se utilizar somente equipamentos convencionais, como aqueles usados nos sistemas de distribuição de energia elétrica, uma vez que, podem ser facilmente encontrados comercialmente. Não sendo possível, com raras exceções, utiliza-se equipamentos não padronizados. Há ainda, a possibilidade de se alimentar cargas monofásicas ou trifásicas, fazendo uso de arranjo adequado para esse fim. Dos quatro arranjos propostos, o referente a figura 2.10 pode ser aplicado em linhas de transmissão que possuem apenas um cabo pára-

raios, enquanto que, os demais necessitam de dois cabos pára-raios.

Os cabos pára-raios, embora isolados e energizados, devem demonstrar a qualquer instante eficiência na sua função primária, isto é, proteção contra às descargas atmosféricas.

Uma vez que, a energização dos cabos pára-raios isolados se efetua através de terciários de transformadores de potência localizados nas próprias subestações, é recomendável no emprego desta forma de abastecimento, linhas de transmissão com classes de tensão inferiores a 230 kV, pois facilmente se percebe que, se tal procedimento não for levado em conta, podem surgir elevadas relações de tensões entre o nível da linha e do sistema auxiliar, constituído pelos cabos pára-raios isolados, tornando o custo dos transformadores nesta situação proibitivo, impossibilitando qualquer interesse de aplicação nesse sentido.

Comparando os custos envolvidos, por quilômetro de instalação, entre os arranjos deste método de derivação de potência e qualquer sistema tradicional de distribuição, ambos com mesma classe de tensão, os primeiros são menos dispendiosos.

Tratando-se de linhas de transmissão em funcionamento e realizando a operação de isolamento dos cabos pára-raios nas estruturas, o custo adicional de investimento desta tarefa é cerca de US\$ 360,00, por quilômetro, e um custo extra para os equipamentos de compensação, isoladores com "arcing horns" e sistema de aterramento.

A alimentação de pequenas cargas via derivação de potência das linhas por indução eletrostática, mostrou-se mais

atraente para linhas com maiores classes de tensão, que fornecem maiores quantidades de potência extraída por quilômetro de condutor ou cabo pára-raios isolado, conforme indica a tabela 4.20. A potência extraída do cabo pára-raios isolado, nessa técnica, é diretamente proporcional ao quadrado da tensão induzida e a capacitância equivalente vista a partir do cabo, merecendo este aspecto, ampla investigação sobre os dois parâmetros e cujos resultados foram descritos na tabela 3.34.

Pode-se ainda concluir, que a tensão induzida no cabo pára-raios isolado é resultado preponderante do efeito eletrostático da linha de transmissão, porém, se a linha possuir razoável carregamento e o comprimento do cabo pára-raios isolado atingir valores apreciáveis, a influência proveniente do efeito eletromagnético pode ser levada à tensão induzida, resultando em grandes variações na mesma e conseqüentemente na tensão nos terminais da carga. Quanto mais altas forem as variações de fluxo de potência e quanto maior for o comprimento da linha principal, tanto mais acentuada é esta característica.

A teoria modal de propagação permitiu uma análise precisa e eficiente sobre o circuito auxiliar de derivação de potência para as condições de operação das linhas acima mencionadas.

A medida que a impedância da carga alimentada varia, a tensão nos seus terminais, também sofre apreciáveis alterações. Este problema é resolvido com a aplicação das técnicas de regulação de tensão na carga sugeridas no capítulo 4.

O circuito LC ressonante, transfere a tensão induzida no

cabo pára-raios ao terminal da carga e a mantém constante, embora apareça nos terminais do transformador uma sobretensão, que tende a aumentar quanto mais potência extraída se requer. O controle da sobretensão é realizado estabelecendo-se um limite máximo de derivação de potência do cabo pára-raios isolado.

O circuito regulador controlado à tiristores, também mantém a tensão nos terminais da carga constante, elimina o problema da sobretensão, porém, gera um grande conteúdo de harmônicas, distorcendo as ondas de tensão e de corrente, ou seja, altera a boa qualidade da potência derivada.

As estratégias derivativas de potência abordadas no trabalho demonstram ser soluções para o suprimento daquelas pequenas cargas. Sua aplicação é ideal para países com características energéticas como o Brasil que, possui uma grande quantidade de cargas localizadas no meio rural e que não usufruem da energia elétrica. Estas cargas, normalmente, estão fora dos planos de eletrificação das concessionárias e poderiam ser alimentadas por uma destas estratégias de forma tal que poderia fornecer bem estar familiar e benefício social à comunidade local.

Os resultados obtidos e discutidos no abastecimento de pequenas cargas pelas estratégias propostas no trabalho, servem de estímulo e justificam futuras observações no sentido de abranger outros aspectos não detalhados e analisados. Desta forma, pode-se investigar e explorar uma série de abordagens de interesse e relacionados com o tema em questão, dos quais, pode-se mencionar: estudo do funcionamento do regulador de tensão a dispositivo de núcleo saturado, aplicado especificamente a estas estratégias de



derivação de potência; uma rígida investigação no desempenho transitório e de sobretensões do sistema auxiliar a cabo pára-raios isolado e sua conseqüente interação com a linha principal e vice-versa; uma análise de coordenação e a devida proteção nos arranjos de estratégias de derivação de potência; construção de protótipos nos laboratórios, considerando todas as formas derivativas e por fim montagem de uma instalação experimental no país.

## ANEXO 1

## PROGRAMAS DIGITAIS ELABORADOS

## 1.1 PROGRAMA TENSÃO

## 1.1.1 Introdução

Na elaboração do programa foi utilizada a linguagem FORTRAN 77 e desenvolvido para operar nos microcomputadores tipo PC's ou similares. Durante a execução, haverá interação entre programa e usuário, através de informações solicitada pelo mesmo e enviadas via terminal de vídeo.

O programa calcula as tensões induzidas em condutores isolados localizados próximos das linhas de transmissão ou nos cabos pára-raios da linha e, também, as tensões, correntes e potências extraídas na carga do circuito derivativo de potência. Utiliza-se um método de solução, para o problema, através do desenvolvimento em série das equações diferenciais.

## 1.1.2 Considerações Gerais Sobre o Programa

- Todos cálculos são feitos em regime permanente,

frequência à 60 [Hz] e utiliza-se representação trifásica equilibrada para tensões e correntes nas linhas de transmissão. O programa usa sequência de fase A,B e C, porém, há possibilidade de mudança na referência.

- O algoritmo elaborado permite utilizar cabos raios isolados, multiterrados ou sem a presença destes na linha de transmissão.

- A configuração da linha de transmissão pode apresentar qualquer tipo, com a utilização de, no máximo dois cabos pára-raios.

- O programa não limita o número de condutores total que constituem o sistema linha de transmissão, cabos pára-raios e condutores isolados. Seu valor máximo fica definido na dimensão das matrizes.

- Admite-se até oito subcondutores por fase para os condutores múltiplos.

- A elaboração e fornecimento de dados de entrada devem ser feitos com muita atenção, pois não é emitida mensagens de erros na entrada destes.

### 1.1.3 Estrutura do Programa

O programa é composto de várias subrotinas. Ele lê e imprime dados referentes a configuração da linha, condutores isolados e suas principais características. Calcula as matrizes de impedâncias devido a disposição geométrica, de efeitos próprios, de Carson e a total, bem como a matriz de admitâncias transversais. Calcula as tensões induzidas no início e fim do condutor isolado

sem carga. Com os dados relativos da carga, ligada no condutor isolado, calcula novamente a tensão induzida inicial e final, como também os principais parâmetros envolvidos no circuito ressonante, a saber: tensões, correntes, potências, capacitor de ajuste, relação de transformação e potência do transformador.

#### 1.1.4 Dados de Entrada

Os dados de entrada devem ser fornecidos através de arquivo gravado em disco e também via terminal. Quando utilizado arquivo gravado, a leitura é realizada em formato livre e via terminal, através da forma solicitada no monitor de vídeo.

##### 1.1.4.1 Arquivo de dados gravado em disco

A estrutura dos dados de entrada, via arquivo de dados, deve apresentar a seguinte forma:

Linha 1: Dados referentes aos condutores de fase da linha de transmissão.

Nome (a), Bitola (r), Resistência à 60 [Hz] (r), Raio externo (r), Raio médio geométrico (r), Número de subcondutores (i), Espaçamento entre subcondutores (r).

Linha 2: Dados referentes aos cabos pára-raios.

Nome (a), Bitola (r), Resistência à 60 [Hz] (r), Raio externo (r), Raio médio geométrico (r), Quantidade de cabos (i).

Linha 3: Dados referentes aos condutores isolados.

Nome (a), Bitola (r), Resistência à 60 [Hz] (r), Raio

externo (r), Raio médio geométrico (r), Quantidade de condutores (i).

Linha 4: Dados adicionais.

Resistividade do solo (r), Flecha fases (r), Flecha cabos pára-raios (r), Flecha condutores isolados (r), Frequência do sistema (r), Quantidade de circuitos (i).

Linha 5 a 7: Posicionamento do Circuito 1.

$Y(n), X(n)$  - Coordenadas vertical e horizontal dos condutores do circuito 1.

Linha 8 a 10: Posicionamento do Circuito 2 (quando existir).

$Y(n), X(n)$  - Coordenadas vertical e horizontal dos condutores do circuito 2.

Linha 11 e 12: Posicionamento dos Cabos Pára-raios.

$Y(pr-1), X(pr-1)$  - Coordenadas vertical e horizontal do cabo pára-raios 1.

$Y(pr-2), X(pr-2)$  - Coordenadas vertical e horizontal do cabo pára-raios 2.

Linha 13 e 14: Posicionamento dos Condutores Isolados.

$Y(n), X(n)$  - Coordenadas vertical e horizontal dos condutores isolados.

Linha 15: Controle (fim das coordenadas).

0.0,0.0

Linha 16: Dados complementares.

Tensão f-n da linha (r), Corrente na linha (r), Extensão dos condutores isolados (r), Fase da corrente (r).

Observações:

- 1) As letras entre parêntesis significam tipos de variáveis: (r)- real            (i)- inteira            (a)- alfanumérica
- 2) No uso de condutores múltiplos nas fases, as coordenadas são tomadas como se existisse um único condutor equivalente.
- 3) A leitura de dados não é formatada e os dados de uma mesma linha devem ser separados por vírgula.
- 4) O sistema de eixos adotado para posicionar os condutores é escolhido de tal forma que o eixo Y passa pelo centro da estrutura e o eixo X pela superfície do solo. A figura A.1 indica o posicionamento dos condutores em relação ao sistema de eixos e a tabela A.1 mostra o arquivo de dados do sistema de transmissão 1.

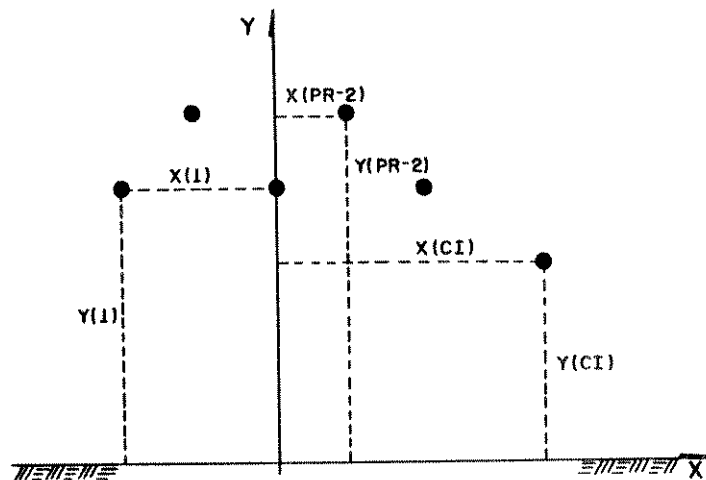


Figura A.1 - Posicionamento dos condutores

#### 1.1.4.2 Dados via terminal

O tipo de estrutura de dados de entrada, via terminal, é

fixado e solicitado pelo programa através do monitor de vídeo.

Tabela A.1 - Arquivo de dados do sistema de transmissão 1  
para uso do programa tensão

"PENGUIN",107.0,0.3679,0.00715,0.00248,2,0.40  
 "EHS",42.14,2.485,0.00397,90.459E-06,2  
 "PENGUIN",107.0,0.3679,0.00715,0.00248,1  
 100.0,6.5,6.0,6.5,60.0,1  
 12.0,-4.5  
 12,0,0.0  
 12.0,4.5  
 16.0,-2.25  
 16.0,2.25  
 10.5,4.5  
 0.0,0.0  
 79675.0,200.0,10.0,30.0

#### 1.1.5 Dados de Saída

O programa fornece um relatório de saída, que consta da seguinte relação de dados:

- a - Características da configuração da linha, pára-raios e condutores isolados;
- b - Matrizes componentes de impedâncias longitudinais:  
 $\dot{\underline{Z}}_c$ ,  $\dot{\underline{Z}}_g$  e  $\dot{\underline{Z}}_t$  em  $[\Omega/\text{Km}]$ ;
- c - Matriz total de impedâncias longitudinais,  $\dot{\underline{Z}}$  em  $[\Omega/\text{Km}]$ ;
- d - Matriz de admitâncias transversais,  $\dot{\underline{Y}}$  em  $[\text{S}/\text{Km}]$ ;
- e - Tensões induzidas no condutor isolado sem carga;
- f - Tensões induzidas no condutor isolado com carga;

- g - Tensões e correntes no início e final do sistema de transmissão;
- h - Grandezas relativas à carga associada ao condutor isolado, com circuito ressonante, tais como:
  - corrente na carga;
  - tensão nos terminais da carga;
  - potência ativa e reativa na carga;
  - potência reativa no indutor de ajuste;
  - valor do capacitor de ajuste referido ao lado de alta e baixa tensão;
  - relação de transformação e potência do transformador;
  - valor da capacitância thèvenin do circuito equivalente.

## 12 PROGRAMA MODAL

### 1.2.1 Introdução

Na elaboração do programa foi utilizada a linguagem FORTRAN 77 e desenvolvido para operar nos microcomputadores tipo PC's ou similares. Durante a execução, haverá interação entre programa e usuário, através de informações solicitada pelo mesmo e enviadas via terminal.

O programa calcula as tensões, inclusive induzidas, e correntes em qualquer ponto ao longo das linhas de transmissão com



qualquer tipo de configuração. No caso da tensão induzida, pode-se utilizar condutor auxiliar ou cabo pára-raios isolado. Calcula também a potência a ser extraída do mesmo. Utiliza-se um método de solução, para o problema, através do desenvolvimento da teoria modal de propagação.

### 1.2.2 Considerações Gerais Sobre o Programa

São aqui, também válidas todas as considerações observadas no item 1.1.2 anterior.

### 1.2.3 Estrutura do Programa

O programa é composto de várias subrotinas. Este particiona o sistema de transmissão em três partes distintas, utilizando em cada parte a teoria dos quadripolos e teoria modal de propagação. Ele lê e imprime dados referentes a configuração do sistema de transmissão em cada parte e também calcula e imprime as constantes generalizadas de cada trecho tratado como quadripolo. O trecho da linha que possui o condutor isolado, calcula a tensão induzida e a potência extraída.

### 1.2.4 Dados de Entrada

Os dados de entrada devem ser fornecidos através de arquivo gravado em disco e também via terminal. Quando utilizado arquivo gravado a leitura é realizada em Formato Livre e via

terminal, através da forma solicitada no monitor de vídeo.

#### 1.2.4.1 Arquivo de dados gravado em disco

A estrutura dos dados de entrada, via arquivo gravado em disco, deve conter um número de sub-divisões igual ao número de trechos da linha e apresentar a seguinte forma:

Linha 1: Dados referentes aos condutores de fase da linha.

iguais aos dados descritos na linha 1 do item 1.1.4.1

Linha 2: Dados referentes aos cabos pára-raios.

iguais aos dados descritos na linha 2 do item 1.1.4.1

Linha 3: Dados referentes aos condutores isolados.

iguais aos dados descritos na linha 3 do item 1.1.4.1

Linha 4: Dados adicionais.

iguais aos dados descritos na linha 4 do item 1.1.4.1

Linha 5 a 7: Posicionamento do circuito 1.

iguais aos dados descritos na linha 5 a 7 do item  
1.1.4.1

Linha 8 a 10: Posicionamento do circuito 2 (quando existir)

iguais aos dados descritos na linha 8 a 10 do item  
1.1.4.1

Linha 11 e 12: Posicionamento dos cabos pára-raios.

iguais aos dados descritos na linha 11 e 12 do item  
1.1.4.1

Linha 13 e 14: Posicionamento dos condutores isolados.

iguais aos dados descritos na linha 13 e 14 do item  
1.1.4.1

Linha 15: Controle (fim das coordenadas)

0.0,0.0

#### Observações:

1) No uso de condutores múltiplos nas fases, as coordenadas são tomadas como se existisse um único condutor equivalente.

2) A leitura dos dados não é formatada e os dados de uma mesma linha devem ser separados por vírgula.

3) Se não existir elemento qualquer no trecho, pode-se escrever no lugar do nome "NÃO EXISTE" e colocar zeros nas demais variáveis.

4) O posicionamento dos condutores no plano x-y deve ser feito conforme a figura A.1.

A tabela A.2, a seguir, mostra o arquivo de dados para o sistema de transmissão 4, para um exemplo específico.

#### **1.2.4.2 Dados via terminal**

O tipo de estrutura dos dados de entrada, via terminal, é fixado e solicitado pelo próprio programa através do monitor de vídeo.

#### **1.2.5 Dados de Saída**

O programa fornece um relatório de saída, que consta da

seguinte relação de dados:

a - Configuração do sistema de transmissão e suas características para cada trecho;

Tabela A.2 - Arquivo de dados do sistema de transmissão para uso do programa modal

```

"GROESBEAK",322.0,0.1005,0.012573,0.01021,2,0.40
"HS",127.0,3.0450,0.006350,0.60628e-08,2
"NAO EXISTE",0.0,0.0,0.0,0.0,0
100.0,9.7,9.0,0.0,60.0,1
19.40,-10.0
19.40,0.0
19.40,10.0
29.40,-4.80
29.40,4.80
0.0,0.0
"GROESBEAK",322.0,0.1005,0.012573,0.01021,2,0.40
"HS",127.0,3.0450,0.006350,0.60628e-08,2
"GROESBEAK",322.0,0.1005,0.012573,0.01021,1
100.0,9.7,9.0,0.0,60.0,1
19.40,-10.0
19.40,0.0
19.40,10.0
29.40,-4.80
29.40,4.80
15.00,11.00
0.0,0.0
"GROESBEAK",322.0,0.1005,0.012573,0.01021,2,0.40
"HS",127.0,3.0450,0.006350,0.60628e-08,2
"NAO EXISTE",0.0,0.0,0.0,0.0,0
100.0,9.7,9.0,0.0,60.0,1
19.40,-10.0
19.40,0.0
19.40,10.0
29.40,-4.80
29.40,4.80
0.0,0.0

```

- b - Matrizes componentes de impedâncias longitudinais,  $\underline{\dot{Z}}_c$ ,  $\underline{\dot{Z}}_g$  e  $\underline{\dot{Z}}_t$  em  $[\Omega/\text{Km}]$ ;
- c - Matriz total de impedâncias longitudinais,  $\underline{\dot{Z}}$  em  $[\Omega/\text{Km}]$ ;
- d - Matriz de admitâncias transversais,  $\underline{\dot{Y}}$  em  $[\text{S}/\text{Km}]$ ;
- e - Matriz de admitâncias características,  $\underline{\dot{Y}}^\circ$  em [mili-Siemens];
- f - Matriz de impedâncias características,  $\underline{\dot{Z}}^\circ$  em  $[\Omega]$ .
- g - Matrizes de auto-vetores,  $\underline{\dot{Q}}$  e auto-valores,  $\underline{\dot{\lambda}}$ .
- h - Matrizes das constantes generalizadas  $\underline{\dot{A}}$ ,  $\underline{\dot{B}}$ ,  $\underline{\dot{C}}$  e  $\underline{\dot{D}}$ .
- i - Constante de atenuação  $\alpha$   $[\text{NP}/\text{Km}]$  ou  $[\text{dB}/\text{Km}]$  e constante de fase  $\beta$   $[\text{Km}/\text{seg}]$ ;
- j - Tensão e corrente no final do condutor isolado, com carga;
- l - Grandezas relativas à carga do condutor isolado;
- m - Tensões e correntes na entrada do quadripolo;
- n - Extensão do quadripolo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WILDE, R.L.; CARR, J. "Customer Service Direct from Transmission Lines", IEEE, v. PAS-99, nº 1, jan/feb. 1980.
- [2] SARMIENTO, Hector G.; DE LA ROSA, Ramón; CARRILO, Victor M.; VILAR, J. "Solving Electric Energy Supply to Rural Areas: The Capacitive Voltage Divider", IEEE, Power Delivery, v. 5, nº 1, jan. 1990.
- [3] YURENKOV, V.D. "Step-Down Substations 110-220 KV with Capacitive Voltage Dividers", Elektrichestvo, nº 11, p. 26-31, 1962.
- [4] YURENKOV, V.D. "Substations with Indutive Voltage Dividers" Elektrichestvo, nº 10, p. 61-66, 1963.
- [5] ANDREWS, D.L.; OAKES, P.A. "Wire Shielding 230 KV Line Carrier Power to Isolated Area", Electric Light and Power, nº 15, p. 67-69, july 1960.
- [6] RODRIGUES, José Francisco. Extração de Pequenas Potências por Efeitos Eletromagnéticos nas Proximidades das Linhas Elétricas de Alta Tensão, Dissertação de mestrado, EFEI, 1985.

- [7] TORRES, Germano Lambert. Análise de Problemas Típicos na Extração de Pequenas Potências Por Efeitos Eletromagnéticos nas Proximidades das Linhas Elétricas de Alta Tensão, Dissertação de mestrado, EFEI, 1986.
- [8] YURENKOV, V.D. "Feeding Three - Phase Loads from Ground Wires on 220-750 KV Lines", *Elektrichestvo*, nº 7, p. 65-70, 1965.
- [9] BERTHIAUME, R.; BLAIS, R. "Reliable Supply Tapped From the Overhead Ground Wire on 735 KV Transmission Lines", *Electric Power Systems Research*, nº 1, p. 117-119, 1977/78.
- [10] BERTHIAUME, R.; BLAIS, R. "Microwave Repeater Power Supply Tapped From the Overhead Ground Wire on 735 KV Transmission Lines", *IEEE*, v. PAS-99, nº 1, p. 183-184, jan/fev. 1980.
- [11] BLAIS, R.; BERTHIAUME, R. "Supplying Fixed and Stroboscopic Light Beacons From the Overhead Ground Wire on 735 Kv Transmission Lines", *IEEE*, v. PAS-99, nº 1, p. 181-182, jan/fev. 1980.

- [12] SIFUENTES, Fernando Llanos; ROJAS, Ricardo Sánchez. "Uso del acoplamiento electrostático para lá alimentacion de pequenas cargas proximas a las líneas de transmisión de alta tensión", IX Conferência Latinoamericana de Electrificación Rural, Acapulco, v.IV-31, noviembre 1981.
- [13] FUCHS, Rubens Dario. Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas, 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1979, 588 p.
- [14] D'AJUZ, Ari e outros. Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, 1a. ed., Rio de Janeiro: Editora Universitária UFF, 1987, 437 p.
- [15] WEDEPOHL, L.M. "Application of Matriz Methods to Solution of Travelling - Wave Phenomena in Polyphase Systems", Proc. IEE, v. 110, nº 12, december 1983.
- [16] NUNES, Renato de Aquino Faria. "Transmissão de Energia Elétrica: Teoria Modal de Propagação", Notas de Aula, EFEI, 1982.
- [17] CURI, Márcio Antonio; NEGRISOLI, E.M.E. "Subestações", Notas de Aula, EFEI, 1982.



- [18] RODRIGUES, José Francisco; DE OLIVEIRA, José Carlos; PISSOLATO FILHO, José. "Avaliação e Controle dos Principais Parâmetros Envolvidos na Extração de Potência de Linhas de Transmissão Através de Indução Eletromagnética", 9º CBA, UFES, Setembro de 1992.
- [19] MILLER, T.J.E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York: John Wiley & Sons, cap.4.,1982.
- [20] RODRIGUES, José Francisco; PISSOLATO FILHO, José; DE OLIVEIRA, José Carlos. "Derivação de Potência de linhas de Transmissão Através de Indução Eletrostática: Análise dos Principais Parâmetros", XI - SNDEE, Blumenau-SC, setembro de 1992.
- [21] MATHUR, R.M. Static Compensators for Reactive Power Control, Canadá: Canadian Electrical Association, 207 p., 1984.
- [22] WESTINGHOUSE ELECTRICAL CORPORATION. Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 1950.