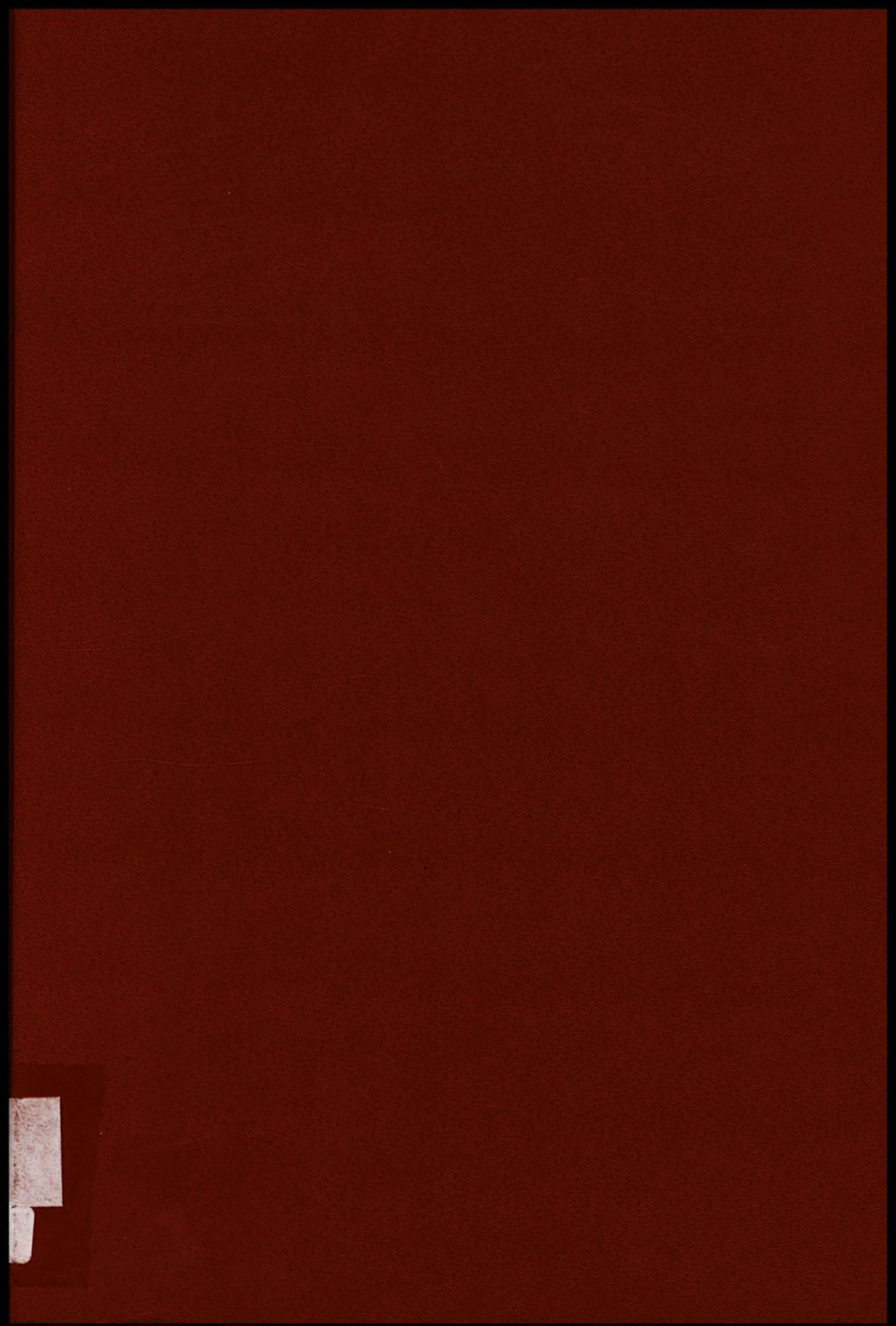




**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE DERIVAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE CONDUTOR
ISOLADO POR ACOPLAMENTO CAPACITIVO**

Autor: **JOSÉ FRANCISCO RODRIGUES**

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Bauru, como parte integrante dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Livre Docente.

ABRIL

1997

N.º 683

**BIBLIOTECA - UNESP
CAMPUS DE BAURU**



AGRADECIMENTOS

- Aos colegas professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia do Câmpus de Bauri pelo apoio e incentivo.

- A UNESP que acompanhou todos meus passos, desde o início da carreira acadêmica e de pesquisa.

- A todos os que direta ou indiretamente auxiliaram para a realização deste trabalho.

A MINHA ESPOSA E FILHAS,

- A minha esposa e filhas pelo tempo que ficaram desprovidas de meu convívio e pelas palavras de carinho e estímulo.

- A Deus infinito em bondade e misericórdia. Sonia,

Francilla e

Julliana

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS

RESUMO

- Aos colegas professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia e Tecnologia do Câmpus de Bauru pelo apoio e incentivo.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

- A UNESP que acompanhou todos meus passos, desde o início, da carreira acadêmica e de pesquisa. 02

1.2 - Revisão Histórica 03

- A todos os que direta ou indiretamente auxiliaram para a realização deste trabalho.

- A minha esposa e filhas pelo tempo que ficaram desprovidas de meu convívio e pelas palavras de carinho e estímulo.

- A Deus infinito em bondade e misericórdia 06

2.2 - Configurações dos Sistemas de Transmissão 06

2.3 - Cálculo das Matrizes de Admitâncias Transversais e de Impedâncias Longitudinais 16

2.4 - Modelagem Analítica da Tensão Induzida em um Condutor Isolado em Vazio 27

2.5 - Exemplo de Resultados 29

CAPÍTULO 3 - DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DO CONDUTOR ISOLADO NO CIRCUITO AUXILIAR

3.1 - Introdução 34

3.2 - Condutor Isolado com Colocação de Carga 34

3.3 - Circuito Ressonante 38

3.4 - Relações de Ressonância 41

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE FERRO-RESSONÂNCIA NO SISTEMA CONDUTOR ISOLADO

4.1 - Introdução 53

SUMÁRIO

4.2 - Caracterização da Ressonância	54
4.3 - Estudo da Ferro-ressonância	57
4.4 - Aplicação do Estudo da Ferro-ressonância no Sistema Composto pelo Condutor Isolado - Transformador Abajador	67

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais	02
1.2 - Revisão Histórica	03
1.3 - Estrutura do Trabalho	04

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR ISOLADO

2.1 - Introdução	06
2.2 - Configurações dos Sistemas de Transmissão	06
2.3 - Cálculo das Matrizes de Admitâncias Transversais e de Impedâncias Longitudinais	16
2.4 - Modelagem Analítica da Tensão Induzida em um Condutor Isolado em Vazio	27
2.5 - Exemplo de Resultados	29

CAPÍTULO 3 - DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DO CONDUTOR ISOLADO NO CIRCUITO AUXILIAR

3.1 - Introdução	34
3.2 - Condutor Isolado com Colocação de Carga	34
3.3 - Circuito Ressonante	38
3.4 - Relações de Ressonância	41

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DE FERRO-RESSONÂNCIA NO SISTEMA CONDUTOR ISOLADO

4.1 - Introdução	53
------------------	----



4.2 - Conceituação de Ressonância Série	54
4.3 - Estudo da Ferro-ressonância	57
4.4 - Aplicação do Estudo da Ferro-ressonância no Sistema Composto pelo Condutor Isolado - Transformador Abaixador	67

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES GERAIS	70
--------------------------------	----

BIBLIOGRAFIA	73
--------------	----

O presente trabalho tem por objetivo discutir problemas típicos e analisar a estratégia de derivação de pequenas potências de linhas de transmissão através do estudo destas com um condutor isolado.

Este estudo tem início na apresentação de três configurações de sistemas de transmissão de energia elétrica, descrevendo suas principais características e calculando as matrizes de admitâncias transversais e de impedâncias longitudinais. A seguir processa-se a modelagem analítica para o cálculo da tensão induzida no condutor isolado.

A colocação de uma carga no terminal final do condutor isolado permite analisar a obtenção de potência a partir deste, e verifica-se a existência de uma má regulação no circuito derivativo. Sugere-se a utilização de um circuito ressonante LC para a regulação de tensão com um estudo detalhado sobre a melhor relação de ressonância, prevalecendo como melhor opção a relação de ressonância X_L/X_C igual a 70%.

Como o circuito auxiliar de derivação de potência é composto de elementos típicos para o aparecimento do fenômeno de ferro-ressonância, é desenvolvida uma análise deste fenômeno terminando no cálculo da carga mínima a ser ligada no terminal do secundário do transformador para que o mesmo não ocorra.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo discutir problemas típicos e analisar a estratégia de derivação de pequenas potências de linhas de transmissão através do acoplamento capacitivo destas com um condutor isolado.

Este estudo tem início na apresentação de três configurações de sistemas de transmissão de energia elétrica, descrevendo suas principais características e calculando as matrizes de admitâncias transversais e de impedâncias longitudinais. A seguir processa-se a modelagem analítica para o cálculo da tensão induzida no condutor isolado.

A colocação de uma carga no terminal final do condutor isolado permite analisar a obtenção de potência a partir deste, e verifica-se a existência de uma má regulação no circuito derivativo. Sugere-se a utilização de um circuito ressonante LC para a regulação de tensão com um estudo detalhado sobre a melhor relação de ressonância, prevalecendo como melhor opção a relação de ressonância X_L/X_C igual a 70%.

Como o circuito auxiliar de derivação de potência é composto de elementos típicos para o aparecimento do fenômeno de ferro-ressonância, é desenvolvida uma análise deste fenômeno terminando no cálculo da carga mínima a ser ligada no terminal do secundário do transformador para que o mesmo não ocorra.

ABSTRACT

Figure 2.1 - Configuração do sistema de transmissão A 07

Figure 2.2 - Configuração do sistema de transmissão B 10

Figure 2.3 - Configuração do sistema de transmissão C 13

This work have the objective to analyse and to discuss tipics problems in the technique of to derive energy from the electric field of transmission lines. This energy source allow power off-taking by isolated conductor or isolated shield wire located im paralell and on the vicinity of high voltage transmission lines.

The study begins with the analyse in three transmission systems configurations. Its principal characteristics together with the admittances and impedances matrixes are calculated. 38

The load condition in the final isolated conductor were performed. The problem encountered were the voltage regulation in the auxiliary circuit. To solve this complication uses a LC resonant circuit. The resonant relations 70%, 80%, 90%, 100% e 110% are analised and the optimum relation were indicated. 40

The auxiliary circuit is compost with capacitive, resistive and no linear inductor elements, thus series ferroresonance might occur in the circuit. The phenomenon may build up when transformer operate at no-load or low load.

The simple counter-measure to ferroresonance has proposed, consisting in the calculation of a small load will be connected in the transformer. 44

cinco relações de ressonância 44

Figure 3.11 - Tensão nos terminais da carga pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância 70% 47

Figure 3.12 - Tensão na carga pela tensão nos terminais do transformador com diversos fatores de potência na relação de ressonância 70% 48

Figure 3.13 - Tensão nos terminais do transformador pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância 70% 49

Figure 3.14 - Tensão nos terminais do transformador pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância 100% 50

Figure 3.15 - Sobreposição das figuras 3.13 e 3.14 51

Figure 4.1 - Circuito RLC série 54

Figure 4.2 - Curvas características de tensões e corrente no circuito RLC 55

Figure 4.3 - Curvas de ressonância em função de ω 56

Figure 4.4 - Representação do circuito secundário para estudo da ferro-ressonância 57

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.5 - Características de tensão-corrente e ponto de funcionamento no circuito	58
Figura 4.6 - Pontos de funcionamento variando o valor da capacitância C	59
Figura 4.7 - Pontos de funcionamento variando o valor da fonte V	60
Figura 2.1 - Configuração do sistema de transmissão A	07
Figura 2.2 - Configuração do sistema de transmissão B	10
Figura 2.3 - Configuração do sistema de transmissão C	13
Figura 3.1 - Esquema de ligação do transformador e carga ao condutor isolado	34
Figura 3.2 - Circuito equivalente do condutor isolado-carga	35
Figura 3.3 - Tensão nos terminais da carga em função da potência absorvida, com diversos fatores de potência	37
Figura 3.4 - Circuito regulador à tiristores com um transformador de três enrolamentos	38
Figura 3.5 - Circuito ressonante e seus componentes	39
Figura 3.6 - Circuito equivalente com circuito ressonante	39
Figura 3.7 - Tensões instantâneas, v_c , no terminal da carga para impedância de carga constante	40
Figura 3.8 - Potência ativa da carga pelo fator de potência para cinco relações de ressonância	42
Figura 3.9 - Tensão na carga pelo fator de potência para cinco relações de ressonância	43
Figura 3.10 - Tensão no transformador pelo fator de potência para cinco relações de ressonância	44
Figura 3.11 - Tensão nos terminais da carga pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância 70%	47
Figura 3.12 - Tensão na carga pela tensão nos terminais do transformador com diversos fatores de potência na relação de ressonância 70%	48
Figura 3.13 - Tensão nos terminais do transformador pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância 70%	49
Figura 3.14 - Tensão nos terminais do transformador pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância 100%	50
Figura 3.15 - Sobreposição das figuras 3.13 e 3.14	51
Figura 4.1 - Circuito RLC série	54
Figura 4.2 - Curvas características de tensões e corrente no circuito RLC	55
Figura 4.3 - Curvas de ressonância em função de ω	56
Figura 4.4 - Representação do circuito secundário para estudo da ferro-ressonância	57

Figura 4.5 - Características tensão-corrente	58
Figura 4.6 - Características tensão-corrente e ponto de funcionamento no circuito	59
Figura 4.7 - Pontos de funcionamento variando o valor da capacitância C	60
Figura 4.8 - Pontos de funcionamento variando a tensão da fonte V	61
Figura 4.9 - Pontos de funcionamento no circuito	62
Figura 4.10 - Características tensão-corrente com a inclusão da resistência	63
Figura 4.11 - Circuito para estudo da carga mínima para não ocorrer ferro-ressonância	64
Figura 4.12 - Circuito equivalente Thevenin	64
Figura 4.13 - Características para que não ocorra ferro-ressonância	65
Figura 4.14 - Característica do sistema condutor isolado-transformador abaixador	67
Figura 4.15 - Ponto de funcionamento do transformador	68

Q → matriz retorno pelo solo, parte imaginária

V → vetor tensão eficaz dos condutores no sistema de transmissão

I → vetor corrente eficaz dos condutores no sistema de transmissão

V_s → vetor tensão eficaz no início do sistema de transmissão

I_s → vetor corrente eficaz no início do sistema de transmissão

Z_c → impedância de carga nos terminais do condutor isolado

V_{th} → tensão eficaz equivalente Thevenin

C_{th} → capacitância equivalente Thevenin

L_A → indutância de ajuste no circuito ressonante

C_A → capacitância de ajuste no circuito ressonante

v_c → tensão de valor instantâneo nos terminais da carga

ω → frequência em radianos por segundo

LISTA DE SÍMBOLOS E NOTAÇÃO

Tabela 2.1 - Características do sistema de transmissão A e condutor isolado	08
$\dot{Y}$ → matriz admitâncias transversais do sistema de transmissão	09
$\dot{Z}$ → matriz impedâncias longitudinais do sistema de transmissão	11
C → matriz capacitâncias do sistema de transmissão	12
R_c → matriz resistência interna dos condutores do sistema de transmissão	15
X_c → matriz reatância interna dos condutores do sistema de transmissão	16
X_g → matriz coeficientes de potencial de Maxwell	17
P → matriz retorno pelo solo, parte real	18
Q → matriz retorno pelo solo, parte imaginária	19
$\dot{V}$ → vetor tensão eficaz dos condutores no sistema de transmissão	20
$\dot{I}$ → vetor corrente eficaz dos condutores no sistema de transmissão	20
V_o → vetor tensão eficaz no início do sistema de transmissão	22
I_o → vetor corrente eficaz no início do sistema de transmissão	23
Z_c → impedância de carga nos terminais do condutor isolado	23
V_{th} → tensão eficaz equivalente Thevenin	24
C_{th} → capacitância equivalente Thevenin	24
L_A → indutância de ajuste no circuito ressonante	25
C_A → capacitância de ajuste no circuito ressonante	25
V_c → tensão de valor instantâneo nos terminais da carga	26
ω → frequência em radianos por segundo	26
Tabela 2.17 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\dot{Z}$ do sistema de transmissão B	26
Tabela 2.18 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\dot{Z}$ do sistema de transmissão C	27
Tabela 2.19 - Tensões no início dos condutores da linha e no condutor isolado	30
Tabela 2.20 - Tensões no final dos condutores da linha e no condutor isolado	31
Tabela 2.21 - Tensões componentes induzida no condutor isolado	32
Tabela 3.1 - Tensão nos terminais da carga, V_o , com variação do módulo da carga Z_c	35
Tabela 3.2 - Potência derivada na carga com variação do comprimento do condutor isolado	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características do sistema de transmissão A e condutor isolado	08
Tabela 2.2 - Características do sistema de transmissão A e condutor isolado	09
Tabela 2.3 - Características do sistema de transmissão B e condutor isolado	11
Tabela 2.4 - Características do sistema de transmissão B e condutor isolado	12
Tabela 2.5 - Características do sistema de transmissão C e condutor isolado	15
Tabela 2.6 - Características do sistema de transmissão C e condutor isolado	16
Tabela 2.7 - Matriz de admitâncias $\dot{Y}$ do sistema de transmissão A	17
Tabela 2.8 - Matriz de admitâncias $\dot{Y}$ do sistema de transmissão B	18
Tabela 2.9 - Matriz de admitâncias $\dot{Y}$ do sistema de transmissão C	19
Tabela 2.10- Matriz de admitâncias reduzida $\dot{Y}$ do sistema de transmissão A	20
Tabela 2.11- Matriz de admitâncias reduzida $\dot{Y}$ do sistema de transmissão B	20
Tabela 2.12- Matriz contribuição própria $\dot{Z}_c$ de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C	22
Tabela 2.13- Matriz contribuição da geometria $\dot{Z}_g$ de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C	23
Tabela 2.14- Matriz contribuição da influência do solo $\dot{Z}_t$ de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C	24
Tabela 2.15- Matriz total $\dot{Z}$ de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C	25
Tabela 2.16- Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\dot{Z}$ do sistema de transmissão A	26
Tabela 2.17- Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\dot{Z}$ do sistema de transmissão B	26
Tabela 2.18- Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\dot{Z}$ do sistema de transmissão C	27
Tabela 2.19- Tensões no início dos condutores da linha e no condutor isolado	30
Tabela 2.20- Tensões no final dos condutores da linha e no condutor isolado	31
Tabela 2.21- Tensões componentes induzida no condutor isolado	32
Tabela 3.1 - Tensão nos terminais da carga, V_c , com variação do módulo da carga Z_c	35
Tabela 3.2 - Potência derivada na carga com variação do comprimento do condutor isolado	36



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

CAPÍTULO 1**INTRODUÇÃO**

O esforço que o país vem realizando para a sua industrialização, tornando-se competitivo no mercado externo e auto-produtivo em alguns setores, faz com que a geração e disponibilidade de energia elétrica apresente, constantemente, aumento anual. Porém, para que a energia elétrica possa ser utilizada nas mais diversas atividades industriais, comerciais, residenciais e rurais, é preciso que algumas dificuldades, atualmente detectadas e plenamente discutidas, sejam superadas e soluções adotadas. Dentre estas dificuldades, pode-se mencionar a visível escassez de obras de geração de energia elétrica (usinas hidroelétricas), devido aos altos custos de investimentos requeridos nas mesmas e da falta de recursos financeiros disponíveis no poder público, cuja incumbência de controle e gerenciamento são realizadas somente pelos órgãos governamentais até o momento. Entre outros, este fato provoca atrasos consideráveis nos cronogramas inicialmente elaborados, resultando em um desconhecimento entre produção e consumo de energia elétrica. Proposta de solução a esta situação é a participação de empresas privadas com aplicação de recursos financeiros na conclusão das obras e exploração destas. Iniciativa já adotada pelo governo federal, com expectativa de resultados a curto e médio prazo, em vista do grande atraso em que as obras se encontram, enfatizando-se ainda que algumas usinas hidroelétricas já receberam esse tratamento, podendo ser destacada como última operação de venda a um grupo particular, a usina hidroelétrica de Serra da Mesa, no Tocantins.

Outra característica, não menos importante que a acima citada, é o esgotamento progressivo da capacidade hídrica para a geração de energia elétrica na região Sul/Sudeste do país, condição que incentivou o estudo com vistas a exploração de fontes de energia hidráulica situadas na região Norte/Nordeste. Esta alternativa, proposta e estudada pelos órgãos competentes, conduzirá a médio prazo, a novas interligações entre os sistemas de geração de energia Norte/Nordeste e Sul/Sudeste, e as futuras linhas de transmissão deverão percorrer grandes distâncias, situadas na faixa de 2000 a 2800 Km, tanto em corrente alternada como contínua.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O esforço que o país realiza para o crescimento de sua industrialização, tornando-se competitivo no mercado externo e auto-produtivo em alguns setores, faz com que a geração e disponibilidade de energia elétrica apresente, constantemente, aumento anual. Porém, para que a energia elétrica possa ser utilizada nas mais diversas atividades industriais, comerciais, residenciais e rurais, é preciso que algumas dificuldades, atualmente detectadas e plenamente discutidas, sejam superadas e soluções adotadas. Dentre estas dificuldades, pode-se mencionar a visível estagnação da construção das grandes obras de geração de energia elétrica (usinas hidrelétricas), devido aos altos custos de investimentos requeridos nas mesmas e da falta de recursos financeiros disponíveis no poder público, cuja incumbência de controle e gerenciamento são realizados somente pelos órgãos governamentais, até o momento. Entre outros, este fato provoca atrasos consideráveis nos cronogramas inicialmente elaborados, resultando em um descompasso entre produção e consumo de energia elétrica. Proposta de solução a esta situação é a participação de empresas privadas com aplicação de recursos financeiros na conclusão das obras e exploração destas, iniciativa já adotada pelo governo federal, com expectativa de resultados a curto e médio prazo, em vista do grande atraso em que as obras se encontram, enfatizando-se ainda que algumas usinas hidrelétricas já receberam esse tratamento, podendo ser destacada como última operação de venda a um grupo particular, a usina hidrelétrica de Serra da Mesa, no Tocantins.

Outra característica, não menos importante que a acima citada, é o esgotamento progressivo da capacidade hídrica para a geração de energia elétrica na região Sul/Sudeste do país, condição que incentivou o estudo com vistas a exploração de fontes de energia hidráulica situadas na região Norte/Nordeste. Esta alternativa, proposta e estudada pelos órgãos competentes, conduzirá a médio prazo, a novas interligações entre os sistemas de geração de energia Norte/Nordeste e Sul/Sudeste, e as futuras linhas de transmissão deverão percorrer grandes distâncias, situadas na faixa de 2000 a 2800 Km, tanto em corrente alternada como contínua.

O caminho das linhas de transmissão, algumas vezes, atravessam pequenas comunidades que requerem apenas alguns quilowatt-horas de energia elétrica para seu abastecimento, colaborando desta forma com o mínimo de bem estar familiar e social. Este abastecimento não se faria pela adoção de soluções convencionais tais como as subestações abaixadoras ou programas de eletrificação rural, em função dos altos custos envolvidos e proibitivos. A viabilização de fornecimento de energia a estas comunidades poderia ser realizada com micro-centrais ou geração diesel, a qual, como se sabe, necessita de frequentes trabalhos de manutenção e, na maioria dos casos, o fornecimento de energia elétrica fica restrito a algumas horas por dia.

Entretanto, existe uma solução alternativa de viabilidade técnica e econômica, que consiste em captar a energia de abastecimento através do campo elétrico gerado pela linha de transmissão. Isto seria possível, alojando-se um condutor paralelo e próximo a linha de transmissão e isolando-o. Ele ficaria, desta forma, sujeito a um determinado nível de tensão induzida e em um de seus extremos seria ligado um transformador para alimentar a carga.

1.2 REVISÃO HISTÓRICA

A estratégia de se derivar potência de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica através do acoplamento capacitivo, tem sido analisada e aplicada principalmente por russos e canadenses.

O primeiro protótipo posto em operação foi em 1962 e grande contribuição para o desenvolvimento desta área de pesquisa foi dada por V. D. Yurenkov [1], em 1965, devido principalmente, a necessidade do suprimento de energia em vilas próximas as linhas de transmissão em regiões remotas. Por outro lado, em 1977, R. Blais e R. Berthiaume [2], em conjunto com o Instituto de Pesquisas da Hydro-Quebec, desenvolveram um projeto piloto para a 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 [3,4]

Em 1981, a Eletroperu SA [5] em consórcio com a B.G. Checo International (Canadá), colocou em operação seus equipamentos na cidade de Nãhuimpuquio (Peru), nos Andes. Outro equipamento instalado pela mesma empresa canadense foi na cidade de Isla Inferno, na Venezuela, para iluminação da travessia do Rio Orinoco.

No Brasil, alguns centros de pesquisas e universidades possuem trabalhos relacionados com o assunto, muito embora, em quantidade pequena. Entre os relevantes, pode-se destacar duas dissertações de mestrado produzidas na Escola Federal de Engenharia de Itajubá [6,7], outro trabalho elaborado na Universidade

Federal de Uberlândia [9] e duas teses de doutorado elaboradas na Universidade Estadual de Campinas [8,10].

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

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

O capítulo 2 descreve os cálculos realizados sobre a tensão induzida no condutor isolado, recorrendo para isto a três configurações de sistemas de transmissão, apresentando o cálculo dos parâmetros elétricos e as matrizes que representam estes sistemas.

O capítulo 3 descreve a técnica de derivação de potência na sistema auxiliar constituído pelo condutor isolado e carga. Faz um estudo sobre a proposta de se controlar a tensão nos terminais da carga através de um circuito ressonante LC, com relação de ressonância diferente de 100%.

O capítulo 4 aborda o estudo sobre a ferro-ressonância série, possível de acontecer no sistema, se o transformador ligado ao condutor isolado operar em vazio ou em baixa carga. É estabelecida na análise o cálculo da impedância mínima ligada permanentemente ao secundário do transformador para que este opere sem a possibilidade de ocorrência deste fenômeno.

O capítulo 5, finalmente, apresenta as conclusões decorrentes do trabalho desenvolvido.



CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA TENSÃO INDUZIDA NO
CONDUTOR ISOLADO

2.1 INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA TENSÃO INDUZIDA
NO CONDUTOR ISOLADO

2.2 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro possui diferentes configurações de sistemas de transmissão de energia elétrica, relacionado com o nível de tensão de transmissão utilizado. As configurações básicas dos sistemas de transmissão e condutor isolado que serão utilizadas para análise e comparação de resultados estão indicadas nas figuras 2.1 a 2.3.

A disposição dos condutores é definida em relação a um sistema de coordenadas, sendo o plano da terra como referência do eixo horizontal "X" e o eixo de simetria da torre como referência do eixo vertical "Y", como indicado na figura 2.1. Este procedimento, se justifica para a utilização do programa elaborado e obtenção dos vários parâmetros desejados.

O sistema de transmissão A é tipicamente empregado na classe de tensão 138 kV, constituído por uma estrutura de concreto armado, circuito simples e em forma de loop horizontal. Trata-se de uma configuração simples, econômica e de grande flexibilidade construtiva, conforme indica a figura 2.1.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DA TENSÃO INDUZIDA NO CONDUTOR ISOLADO

2.1 INTRODUÇÃO

A derivação de energia elétrica através de condutor isolado por efeito do acoplamento capacitivo é uma técnica viável utilizada para a alimentação de pequenas cargas existentes ao longo e nas proximidades das linhas de transmissão. Algumas avaliações na análise de sensibilidade e estudo do comportamento do condutor isolado ou cabo pára-raios isolado face a variações na linha principal, foram tratadas em outros trabalhos e portanto seus efeitos já conhecidos [6,7,11].

Inicialmente, adotar-se-á, três configurações de sistemas de transmissão de energia elétrica, típicos do país, indicando suas principais características físicas, condições operativas de carregamento, principais parâmetros elétricos envolvidos na linha e os níveis de tensão induzida no condutor isolado.

2.2 CONFIGURAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

O Sistema Elétrico Brasileiro possui diferentes configurações de sistemas de transmissão de energia elétrica, relacionado com o nível de tensão de transmissão utilizado. As configurações básicas dos sistemas de transmissão e condutor isolado que serão utilizados para análise e comparação de resultados estão indicados nas figuras 2.1 a 2.3.

A disposição dos condutores é definida em relação a um sistema de coordenadas, tendo o plano da terra como referência do eixo horizontal "x" e o eixo de simetria da torre como referência do eixo vertical "y", como indicado na figura 2.1. Este procedimento, se justifica para a utilização do programa elaborado e obtenção dos vários parâmetros desejados.

O sistema de transmissão A é tipicamente empregado na classe de tensão 138 kV, constituído por uma estrutura de concreto armado, circuito simples e em forma de lençol horizontal. Trata-se de uma configuração simples, econômica e de grande flexibilidade construtiva, conforme indica a figura 2.1.



Para o condutor isolado, adotar-se-á duas estratégias diferentes na análise. Uma, consiste em considerar como condutor isolado um dos cabos pára-raios da linha, isolando-o das estruturas quando estiver multiterrado na mesma e na outra um novo condutor será adicionado à configuração do sistema de transmissão, sendo este último o adotado para o sistema de transmissão A.

Os dados referentes as principais características e disposição dos condutores no plano x-y do sistema de transmissão A, encontram-se descritos nas tabelas 2.1 e 2.2.

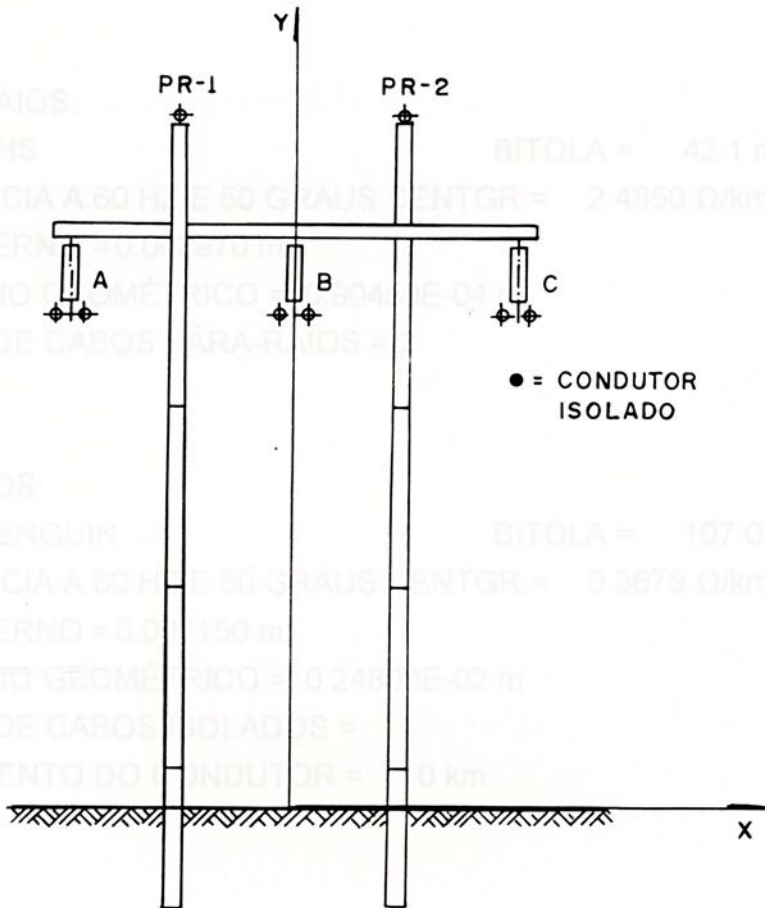


Figura 2.1 - Configuração do sistema de transmissão A

Tabela 2.1 - Características do sistema de transmissão A e condutor isolado

CABOS CONDUTORES:

- NOME = PENGUIN BITOLA = 107.0 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 0.3679 Ω /km/subc.
- RAIO EXTERNO = 0.007150 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.002480 m
- CONDUTORES MÚLTIPLOS = 2 ESPAÇAMENTO = 0.400 m

CABOS PÁRA-RAIOS:

- NOME = EHS BITOLA = 42.1 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 2.4850 Ω /km/subc.
- RAIO EXTERNO = 0.003970 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.90459E-04 m
- NÚMERO DE CABOS PÁRA-RAIOS = 2

CABOS ISOLADOS:

- NOME = PENGUIN BITOLA = 107.0 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 0.3679 Ω /km/subc.
- RAIO EXTERNO = 0.007150 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.24800E-02 m
- NÚMERO DE CABOS ISOLADOS = 1
- COMPRIMENTO DO CONDUTOR = 10 km



Tabela 2.2 - Características do sistema de transmissão A e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO = 100.00 Ohm.m

NÚMERO DE CIRCUITOS = 1

FLECHA DOS CONDUTORES = 6.500 m

FLECHA DOS CABOS PÁRA-RAIOS = 6.000 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS = 6.500 m

FREQUÊNCIA DO SISTEMA = 60.00 Hz

COORDENADAS DO CIRCUITO 1		
	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-4.50	12.00
FASE B	0.00	12.00
FASE C	4.50	12.00

COORDENADAS DOS PÁRA-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

Figura 2.2 - Configuração do sistema de transmissão B



O sistema de transmissão B é constituído de estruturas de aço tipo auto-portante e está associado a classe de tensão 345 kV. Da figura 2.2, verifica-se que o mesmo possui circuito simples em forma de lençol horizontal e dois cabos pára-raios. Os dados referentes às principais características e disposição dos condutores no plano x-y deste sistema, encontram-se descritos nas tabelas 2.3 e 2.4. Neste sistema de transmissão um dos cabos pára-raios será utilizado como condutor isolado.

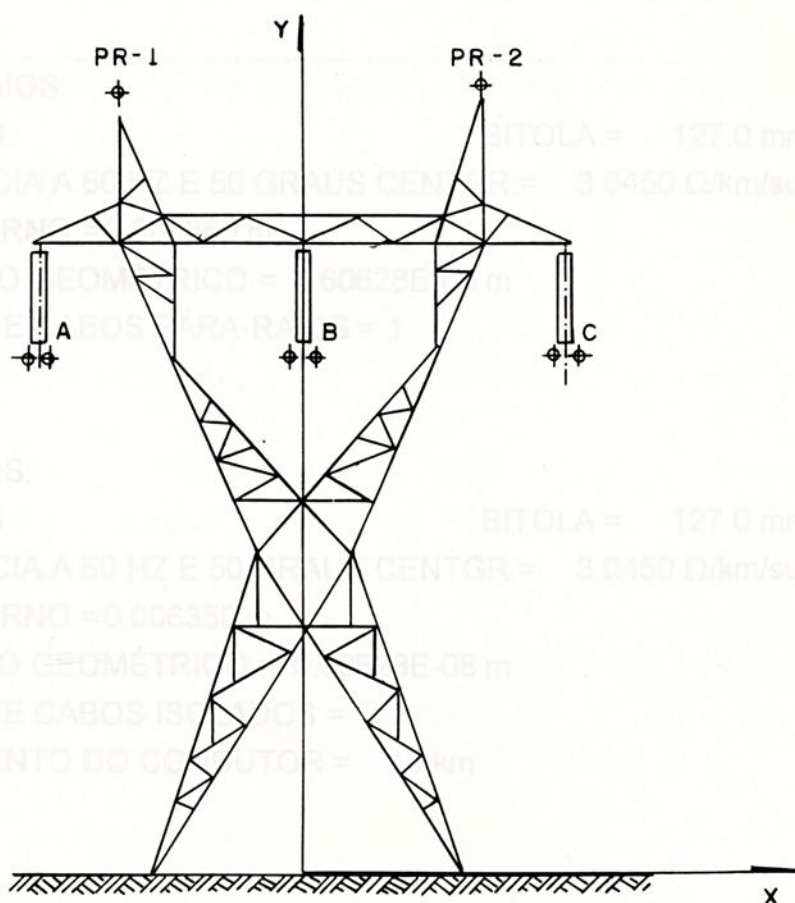


Figura 2.2 - Configuração do sistema de transmissão B

Tabela 2.3 - Características do sistema de transmissão B e condutor isolado

CABOS CONDUTORES:

- NOME = GROSBEAK BITOLA = 322.0 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 0.1005 Ω /km/subc.
- RAIO EXTERNO = 0.012573 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.010210 m
- CONDUTORES MÚLTIPLOS = 2 ESPAÇAMENTO = 0.400 m

CABOS PÁRA-RAIOS:

- NOME = HS BITOLA = 127.0 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ω /km/subc.
- RAIO EXTERNO = 0.006350 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.60628E-08 m
- NÚMERO DE CABOS PÁRA-RAIOS = 1

CABOS ISOLADOS:

- NOME = HS BITOLA = 127.0 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 3.0450 Ω /km/subc.
- RAIO EXTERNO = 0.006350 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.60628E-08 m
- NÚMERO DE CABOS ISOLADOS = 1
- COMPRIMENTO DO CONDUTOR = 10 km



Tabela 2.4 - Características do sistema de transmissão B e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO = 100.00 Ohm.m

NÚMERO DE CIRCUITOS = 1

FLECHA DOS CONDUTORES = 9.700 m

FLECHA DOS CABOS PÁRA-RAIOS = 9.000 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS = 9.000 m

FREQUÊNCIA DO SISTEMA = 60.00 Hz

COORDENADAS DO CIRCUITO 1

	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-10.00	19.40
FASE B	0.00	19.40
FASE C	10.00	19.40

COORDENADAS DOS PÁRA-RAIOS

	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-4.80	29.40

COORDENADAS DOS CONDUTORES ISOLADOS

	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 5	4.80	29.40

Figura 2.3 - Configuração do sistema de transmissão C

O sistema de transmissão C é constituído de estruturas de aço com torres do tipo rígida e estaiada. Este arranjo é empregado para a classe de tensão 750 kV e também formado por circuito simples em forma de lençol horizontal com dois cabos pára-raios, conforme indica a figura 2.3. Os dados referentes as principais características e disposição dos condutores no plano x-y do sistema de transmissão C, encontram-se descritos nas tabelas 2.5 e 2.6. Neste sistema de transmissão um dos cabos pára-raios será utilizado como condutor isolado.

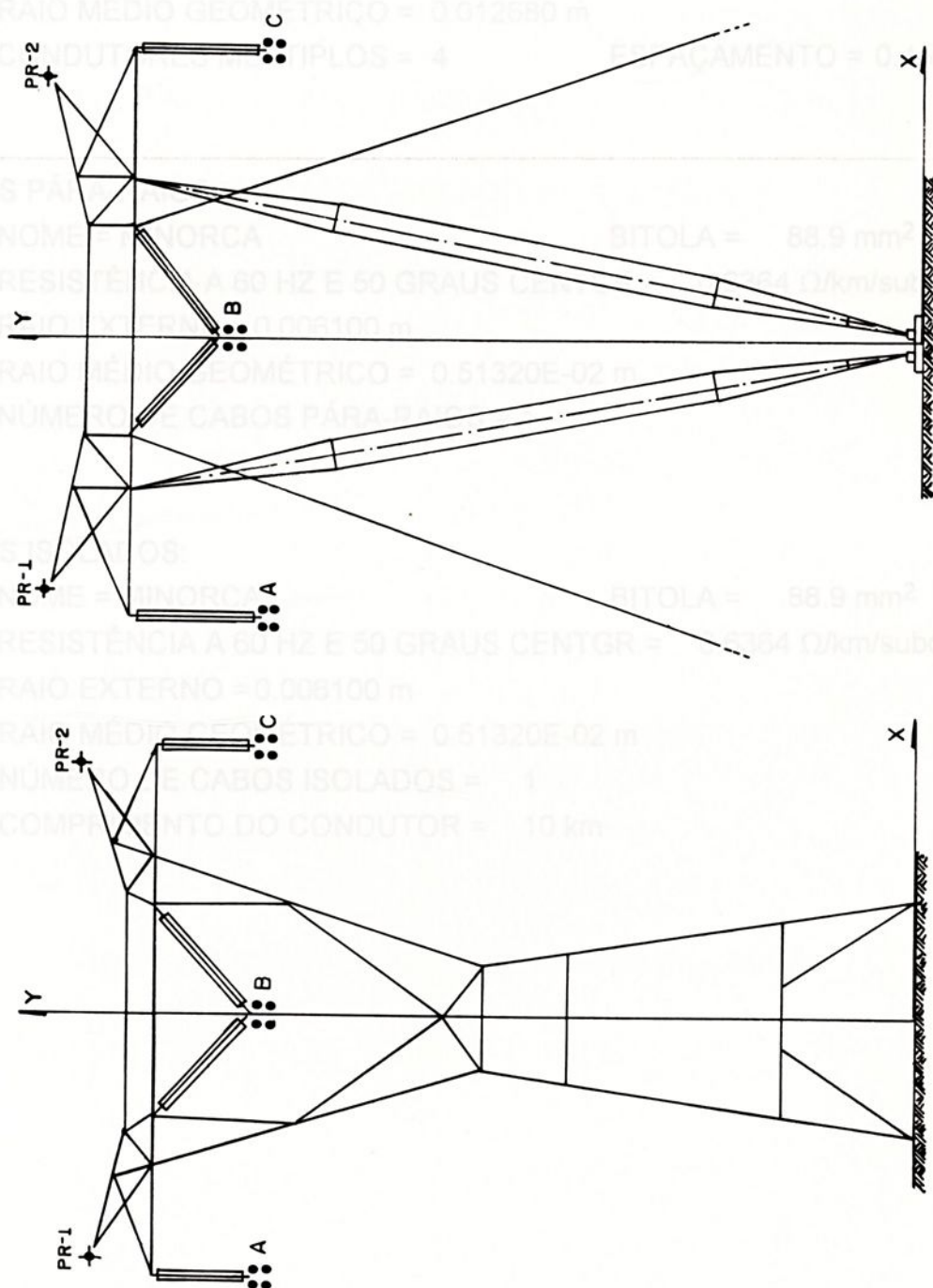


Figura 2.3 - Configuração do sistema de transmissão C

Tabela 2.5 - Características do sistema de transmissão C e condutor isolado

CABOS CONDUTORES:

- NOME = BLUEJAY BITOLA = 602.9 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 0.0588 Ω/km/subc.
- RAIO EXTERNO =0.015990 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.012680 m
- CONDUTORES MÚLTIPLOS = 4 ESPAÇAMENTO = 0.457 m

CABOS PÁRA-RAIOS:

- NOME = MINORCA BITOLA = 88.9 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 0.6364 Ω/km/subc.
- RAIO EXTERNO =0.006100 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.51320E-02 m
- NÚMERO DE CABOS PÁRA-RAIOS = 1

CABOS ISOLADOS:

- NOME = MINORCA BITOLA = 88.9 mm²
- RESISTÊNCIA A 60 HZ E 50 GRAUS CENTGR.= 0.6364 Ω/km/subc.
- RAIO EXTERNO =0.006100 m
- RAIO MÉDIO GEOMÉTRICO = 0.51320E-02 m
- NÚMERO DE CABOS ISOLADOS = 1
- COMPRIMENTO DO CONDUTOR = 10 km



Tabela 2.6 - Características do sistema de transmissão C e condutor isolado

RESISTIVIDADE DO SOLO = 300.00 Ohm.m

NÚMERO DE CIRCUITOS = 1

FLECHA DOS CONDUTORES = 19.000 m

FLECHA DOS CABOS PÁRA-RAIOS = 12.500 m

FLECHA DOS CABOS ISOLADOS = 12.500 m

FREQUÊNCIA DO SISTEMA = 60.00 Hz

COORDENADAS DO CIRCUITO 1

	HORIZONTAL	VERTICAL
FASE A	-15.40	37.00
FASE B	0.00	37.00
FASE C	15.40	37.00

COORDENADAS DOS PÁRA-RAIOS

	HORIZONTAL	VERTICAL
PR- 1	-13.95	46.50

COORDENADAS DOS CONDUTORES ISOLADOS

	HORIZONTAL	VERTICAL
IS- 5	13.95	46.50

2.3 CÁLCULO DAS MATRIZES DE ADMITÂNCIAS TRANSVERSAIS E DE IMPEDÂNCIAS LONGITUDINAIS

O cálculo de parâmetros elétricos de linhas de transmissão terá muita importância e uso destacado nos próximos itens. Assim, proceder-se-á, de forma simples, tecer alguns comentários e reforçar as informações mais relevantes e amplamente descritas em [10,12].

A matriz de admitâncias $\underline{\dot{Y}}$ depende da geometria dos condutores na linha de transmissão. Esta matriz, possui somente elementos de parte imaginária, pois a parte real é desprezível devido aos valores da condutância no ar. Em última análise, representa o efeito capacitivo da linha de transmissão, podendo ser definida pela equação (2.1).

$$\underline{\dot{Y}} = j \omega \underline{C} \quad (2.1)$$

O sistema de transmissão A apresentará uma matriz de admitâncias transversais do tipo 6x6, expressa na tabela 2.7, em Siemens/km, enquanto os sistemas de transmissão B e C matrizes do tipo 5x5, expressas nas tabelas 2.8 e 2.9, em Siemens/km.

Se os sistemas de transmissão possuírem os cabos pára-raios multiterrados, esta condição permite a eliminação das linhas e colunas referentes aos mesmos, na matriz original, resultando em uma matriz de admitâncias reduzida. Nestas circunstâncias a matriz de admitâncias reduzida para os sistemas de transmissão A e B são mostradas nas tabelas 2.10 e 2.11, em Siemens/km.

A matriz de impedâncias $\underline{\dot{Z}}$ pode ser dividida em três partes independentes, cada uma possuindo características particulares. Uma, devido aos efeitos dos próprios condutores, $\underline{\dot{Z}}_c$, outra devido à geometria da disposição espacial dos condutores, $\underline{\dot{Z}}_g$, e a última, a correção de Carson [12], que representa a influência do retorno pelo solo, $\underline{\dot{Z}}_t$. Portanto, pode-se expressar a matriz de impedâncias longitudinais $\underline{\dot{Z}}$, em Ohm/km, através da equação (2.2).

$$\underline{\dot{Z}} = \underline{\dot{Z}}_c + \underline{\dot{Z}}_g + \underline{\dot{Z}}_t \quad (2.2)$$



Tabela 2.7 - Matriz de admitâncias $\bar{Y}$ do sistema de transmissão A

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

Tabela 2.8 - Matriz de admitâncias $\bar{Y}$ do sistema de transmissão B

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

Tabela 2.9 - Matriz de admitâncias $\bar{Y}$ do sistema de transmissão C

$Y(1,1) = .404491E-05$
 $Y(1,2) = -.574752E-06$
 $Y(1,3) = -.164891E-06$
 $Y(1,4) = -.871108E-07$

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

$Y(1,2) = -.510391E-06$
 $Y(1,3) = -.137428E-06$
 $Y(1,4) = -.170923E-06$
 $Y(2,1) = -.510391E-06$
 $Y(2,2) = .386639E-05$
 $Y(2,3) = -.510391E-06$
 $Y(2,4) = -.328368E-06$
 $Y(3,1) = -.137428E-06$
 $Y(3,2) = -.510391E-06$
 $Y(3,3) = .375896E-05$
 $Y(3,4) = -.367782E-06$
 $Y(4,1) = -.170923E-06$
 $Y(4,2) = -.328368E-06$
 $Y(4,3) = -.367782E-06$
 $Y(4,4) = .262232E-05$

Tabela 2.10 - Matriz de admitâncias reduzida $\underline{Y}$ do sistema de transmissão A

$$\begin{aligned}
 Y(1,1) &= .404491\text{E-}05 \\
 Y(1,2) &= -.674752\text{E-}06 \\
 Y(1,3) &= -.164691\text{E-}06 \\
 Y(1,4) &= -.871108\text{E-}07 \\
 Y(2,1) &= -.674752\text{E-}06 \\
 Y(2,2) &= .424984\text{E-}05 \\
 Y(2,3) &= -.575235\text{E-}06 \\
 Y(2,4) &= -.307263\text{E-}06 \\
 Y(3,1) &= -.164691\text{E-}06 \\
 Y(3,2) &= -.575235\text{E-}06 \\
 Y(3,3) &= .444098\text{E-}05 \\
 Y(3,4) &= -.113578\text{E-}05 \\
 Y(4,1) &= -.871108\text{E-}07 \\
 Y(4,2) &= -.307263\text{E-}06 \\
 Y(4,3) &= -.113578\text{E-}05 \\
 Y(4,4) &= .323780\text{E-}05
 \end{aligned}$$

Tabela 2.11 - Matriz de admitâncias reduzida $\underline{Y}$ do sistema de transmissão B

$$\begin{aligned}
 Y(1,1) &= .375596\text{E-}05 \\
 Y(1,2) &= -.510391\text{E-}06 \\
 Y(1,3) &= -.137428\text{E-}06 \\
 Y(1,4) &= -.170923\text{E-}06 \\
 Y(2,1) &= -.510391\text{E-}06 \\
 Y(2,2) &= .386639\text{E-}05 \\
 Y(2,3) &= -.510391\text{E-}06 \\
 Y(2,4) &= -.328368\text{E-}06 \\
 Y(3,1) &= -.137428\text{E-}06 \\
 Y(3,2) &= -.510391\text{E-}06 \\
 Y(3,3) &= .375596\text{E-}05 \\
 Y(3,4) &= -.367782\text{E-}06 \\
 Y(4,1) &= -.170923\text{E-}06 \\
 Y(4,2) &= -.328368\text{E-}06 \\
 Y(4,3) &= -.367782\text{E-}06 \\
 Y(4,4) &= .252232\text{E-}05
 \end{aligned}$$

A matriz de impedâncias que contém os efeitos dos próprios condutores, $\underline{\dot{Z}}_c$, tem seu cálculo representado na equação (2.3), sendo obtida através da resistência ôhmica a 60 Hz, parte real, e da indutância interna, fazendo uso o conceito de raio médio geométrico, parte imaginária.

$$\underline{Z}_c = \underline{R}_c + j \underline{X}_c \quad (2.3)$$

A matriz de impedâncias devido a geometria da disposição espacial, $\underline{\dot{Z}}_g$, é calculada através da matriz dos coeficientes de potencial, a qual está expressa na equação (2.4), constituída apenas de parte imaginária

$$\underline{Z}_g = j \underline{X}_g \quad (2.4)$$

A matriz de impedâncias que contém a influência do retorno pelo solo, $\underline{\dot{Z}}_t$, é calculada com o uso da série infinita desenvolvida por Carson [12,13], truncando-a, para problemas em sistemas de energia elétrica, em geral, o parâmetro r da série em $r < 0,25$. A equação (2.5) indica a parte real $\underline{P}$, e a parte imaginária $\underline{Q}$, que compõem a matriz.

$$\underline{Z}_t = \underline{P} + j \underline{Q} \quad (2.5)$$

Para o sistema de transmissão C, as matrizes $\underline{\dot{Z}}_c$, $\underline{\dot{Z}}_g$, $\underline{\dot{Z}}_t$ e $\underline{\dot{Z}}$ estão representadas nas tabelas 2.12 a 2.15, em Ohm/km.

Nos sistemas de transmissão A, B e C os cabos pára-raios são multiterrados, com isto pode-se aplicar a redução de "Kron" nas linhas e colunas relativas aos mesmos. Assim, chega-se as matrizes de impedâncias longitudinais reduzidas, em Ohm/km, dos sistemas de transmissão A, B e C, indicadas nas tabelas 2.16 a 2.18.

Tabela 2.12 - Matriz contribuição própria Z_c de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C

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 2.13 - Matriz contribuição da geometria Z_g de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C

$R(1) = .05$	$I(1,1) = .4066400$	$= 261.449$
$R(1) = .05$	$I(1,2) = .0885499$	$= 257.606$
$R(1) = .05$	$I(1,3) = .0457832$	$= 247.647$
$R(1) = .05$	$I(1,4) = .1108793$	$= 242.760$
$R(1) = .05$	$I(1,5) = .0556824$	$= 234.499$
$R(2) = .05$	$I(2,1) = .0885499$	$= 257.606$
$R(2) = .05$	$I(2,2) = .4066400$	$= 261.449$
$R(2) = .05$	$I(2,3) = .0885499$	$= 257.606$
$R(2) = .05$	$I(2,4) = .0872894$	$= 240.024$
$R(2) = .05$	$I(2,5) = .0872894$	$= 240.024$
$R(3) = .05$	$I(3,1) = .0457832$	$= 247.647$
$R(3) = .05$	$I(3,2) = .0885499$	$= 257.606$
$R(3) = .05$	$I(3,3) = .4066400$	$= 261.449$
$R(3) = .05$	$I(3,4) = .0556824$	$= 234.499$
$R(3) = .05$	$I(3,5) = .1108793$	$= 242.760$
$R(4) = .05$	$I(4,1) = .1108793$	$= 242.760$
$R(4) = .05$	$I(4,2) = .0872894$	$= 240.024$
$R(4) = .05$	$I(4,3) = .0556824$	$= 234.499$
$R(4) = .05$	$I(4,4) = .7105227$	$= 227.997$
$R(4) = .05$	$I(4,5) = .0798850$	$= 222.728$
$R(5) = .05$	$I(5,1) = .0556824$	$= 234.499$
$R(5) = .05$	$I(5,2) = .0872894$	$= 240.024$
$R(5) = .05$	$I(5,3) = .1108793$	$= 242.760$
$R(5) = .05$	$I(5,4) = .0798850$	$= 222.728$
$R(5) = .05$	$I(5,5) = .7105227$	$= 227.997$

Tabela 2.13 - Matriz contribuição da influência do solo Z_t de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C

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 2.15 - Matriz total $\dot{Z}$ de impedâncias longitudinais do sistema de transmissão C

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) = .2748803
R(2,1) = .1217782	I(2,1) = .3230962
R(2,2) = .3094066	I(2,2) = .6941162
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) = .0561639	I(5,5) = .9509506

Tabela 2.16 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\bar{Z}$ do sistema de transmissão A

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

2.4.1 MODELAGEM ANALÍTICA DA TENSÃO INDUZIDA EM UM CONDUTOR ISOLADO

Tabela 2.17 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\bar{Z}$ do sistema de transmissão B

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

Tabela 2.18 - Matriz de impedâncias longitudinais reduzida $\underline{\bar{Z}}$ do sistema de transmissão C

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

2.4 MODELAGEM ANALÍTICA DA TENSÃO INDUZIDA EM UM CONDUTOR ISOLADO

O comportamento das tensões e correntes, em regime permanente, em um sistema de transmissão em presença da terra, é representado pelas equações (2.6) e (2.7).

$$\frac{dV}{dx} = -\underline{\bar{Z}} \cdot \underline{I} \quad (2.6)$$

$$\frac{dI}{dx} = -\underline{Y} \cdot V \quad (2.7)$$

Nestas, a referência do eixo das abcissas "x", $x = 0$, encontra-se no terminal transmissor, isto é, na geração.

A dificuldade na solução destas equações encontra-se no fato de que existem várias variáveis em cada delas. Uma das possíveis soluções é o desenvolvimento em série de Mac-Laurin, como indica as equações (2.8) e 2.9).

$$\frac{dV}{dx} = \left. \frac{dV}{dx} \right|_{x=0} + x \left. \frac{d^2 V}{dx^2} \right|_{x=0} + \frac{x^2}{2!} \left. \frac{d^3 V}{dx^3} \right|_{x=0} + \dots \quad (2.8)$$

$$\frac{dI}{dx} = \left. \frac{dI}{dx} \right|_{x=0} + x \left. \frac{d^2 I}{dx^2} \right|_{x=0} + \frac{x^2}{2!} \left. \frac{d^3 I}{dx^3} \right|_{x=0} + \dots \quad (2.9)$$

Truncando-se a série no terceiro termo, o que não impõe erros expressivos, resolve-se o problema, derivando-se as equações (2.6) e (2.7)

$$\frac{d^2 \dot{V}}{dx^2} = \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{V}} \quad \frac{d^3 \dot{V}}{dx^3} = -\underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}} \quad (2.10)$$

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dx^2} = \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{I}} \quad \frac{d^3 \dot{I}}{dx^3} = -\underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \underline{\dot{V}} \quad (2.11)$$

Substituindo-se as equações (2.10) e (2.11) em (2.8) e (2.9), resulta as equações (2.12) e (2.13), já simplificadas

$$\dot{V} = \dot{V}_0 - x \underline{\dot{Z}} \underline{\dot{I}}_0 + \frac{x^2}{2!} \underline{\dot{Z}} \underline{\dot{Y}} \dot{V}_0 \quad (2.12)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_0 - x \underline{\dot{Y}} \underline{\dot{V}}_0 + \frac{x^2}{2!} \underline{\dot{Y}} \underline{\dot{Z}} \dot{I}_0 \quad (2.13)$$

onde os vetores $\dot{V}_0$ e $\dot{I}_0$ são os componentes do sistema em $x = 0$.

As equações (2.12) e (2.13) podem ser expressas em forma de matrizes particionadas, como nas equações (2.14) e (2.15), lembrando que os cabos pára-raios são multiterrados.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_c \\ \dot{V}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{co} \\ \dot{V}_{io} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} \dot{Z}_{cc} & \dot{Z}_{ci} \\ \dot{Z}_{ic} & \dot{Z}_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{co} \\ \dot{I}_{io} \end{bmatrix} + \frac{x^2}{2!} \cdot \begin{bmatrix} \dot{Z}_{cc} & \dot{Z}_{ci} \\ \dot{Z}_{ic} & \dot{Z}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Y}_{cc} & \dot{Y}_{ci} \\ \dot{Y}_{ic} & \dot{Y}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{co} \\ \dot{V}_{io} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_c \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{co} \\ \dot{I}_{io} \end{bmatrix} - x \cdot \begin{bmatrix} \dot{Y}_{cc} & \dot{Y}_{ci} \\ \dot{Y}_{ic} & \dot{Y}_{ii} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{co} \\ \dot{V}_{io} \end{bmatrix} + \frac{x^2}{2!} \cdot \begin{bmatrix} \dot{Y}_{cc} & \dot{Y}_{ci} \\ \dot{Y}_{ic} & \dot{Y}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_{cc} & \dot{Z}_{ci} \\ \dot{Z}_{ic} & \dot{Z}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{co} \\ \dot{I}_{io} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Fazendo $x = \ell$ na equação (2.15), obtém-se a equação (2.16)

$$\begin{aligned} \underline{I}_{i\ell} = \underline{I}_{i0} - \ell \left[\underline{Y}_{ic} \underline{V}_{co} + \underline{Y}_{ii} \underline{V}_{io} \right] + \frac{\ell^2}{2} \left[\underline{Y}_{ic} \underline{Z}_{cc} + \underline{Y}_{ii} \underline{Z}_{ic} \right] \underline{I}_{co} + \\ + \frac{\ell^2}{2} \left[\underline{Y}_{ic} \underline{Z}_{ci} + \underline{Y}_{ii} \underline{Z}_{ii} \right] \underline{I}_{io} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Porém, como o condutor isolado não possui injeção de corrente em seus terminais, logo $\underline{I}_{i\ell} = \underline{I}_{i0} = 0$. Isto aplicado na equação (2.16), resulta na equação (2.17), que fornece a tensão na origem do condutor isolado.

$$\underline{V}_{io} = \left(-\underline{Y}_{ii} \right)^{-1} \underline{Y}_{ic} \underline{V}_{co} + \frac{\ell}{2} \left(\underline{Y}_{ii} \right)^{-1} \left[\underline{Y}_{ic} \underline{Z}_{cc} + \underline{Y}_{ii} \underline{Z}_{ic} \right] \underline{I}_{co} \quad (2.17)$$

Fazendo $x = \ell$, na equação (2.14), é possível obter a equação (2.18), que fornece a tensão induzida no final do condutor isolado.

$$\begin{aligned} \underline{V}_{i\ell} = \underline{V}_{io} - \ell \left[\underline{Z}_{ic} \underline{I}_{co} + \underline{Z}_{ii} \underline{I}_{io} \right] + \frac{\ell^2}{2} \left[\underline{Z}_{ic} \underline{Y}_{cc} + \underline{Z}_{ii} \underline{Y}_{ic} \right] \underline{V}_{co} + \\ + \frac{\ell^2}{2} \left[\underline{Z}_{ic} \underline{Y}_{ci} + \underline{Z}_{ii} \underline{Y}_{ii} \right] \underline{V}_{io} \end{aligned} \quad (2.18)$$

2.5 EXEMPLO DE RESULTADOS

A implementação computacional deste método de solução permite calcular tensões e correntes em todos os condutores do sistema.

Utilizando-se o sistema de transmissão A, as tabelas 2.19 a 2.21 indicam os níveis de tensões no início e final de todos os condutores que compõem o sistema, como também as componentes eletrostática e eletromagnética da tensão induzida total no condutor isolado, a vazio, conforme indica a equação (2.17)



Tabela 2.19 - Tensões no início dos condutores da linha e no condutor isolado

VTOTI(1) = .7967500E+02 kV (componente real)
 .0000000E+00 kV (componente imaginária)

.7967500E+02 kV (módulo)
 0.00 Graus (argumento)

VTOTI(2) = -.3983750E+02 kV (componente real)
 -.6900057E+02 kV (componente imaginária)

.7967500E+02 kV (módulo)
 -120.00 Graus (argumento)

VTOTI(3) = -.3983750E+02 kV (componente real)
 .6900057E+02 kV (componente imaginária)

.7967500E+02 kV (módulo)
 120.00 Graus (argumento)

VTOTI(4) = -.1559418E+02 kV (componente real)
 .1771287E+02 kV (componente imaginária)

.2359924E+02 kV (módulo)
 131.36 Graus (argumento)



Tabela 2.20 - Tensões no final dos condutores da linha e no condutor isolado

VTOTF(1) =	.7967566E+02 kV	(componente real)
	-.9120663E+00 kV	(componente imaginária)
	.7968088E+02 kV	(módulo)
	-0.66 Graus	(argumento)
VTOTF(2) =	-.4057307E+02 kV	(componente real)
	-.6862115E+02 kV	(componente imaginária)
	.7971848E+02 kV	(módulo)
	-120.59 Graus	(argumento)
VTOTF(3) =	-.3918974E+02 kV	(componente real)
	.6955408E+02 kV	(componente imaginária)
	.7983486E+02 kV	(módulo)
	119.40 Graus	(argumento)
VTOTF(4) =	-.1555902E+02 kV	(componente real)
	.1795344E+02 kV	(componente imaginária)
	.2375075E+02 kV	(módulo)
	130.90 Graus	(argumento)

Podem-se verificar na tabela 2.21, que a tensão induzida eletrostaticamente é muito maior que a tensão induzida eletromagneticamente. Isso mostra que a tensão induzida total é praticamente capacitiva. Isso é válido afirmar quando o comprimento do condutor isolado é pequeno. Para grandes extensões, na ordem de centenas de quilômetros, não se poderia desprezar esta influência.

Tabela 2.21 - Tensões componentes induzida no condutor isolado

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

$$\begin{aligned} \text{VETM} = & \quad -.3707068\text{E-}01 \text{ kV} && \text{(componente real)} \\ & \quad .6328648\text{E-}01 \text{ kV} && \text{(componente imaginária)} \\ & \quad .7334448\text{E-}01 \text{ kV} && \text{(módulo)} \\ & \quad 120.36 \text{ Graus} && \text{(argumento)} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \text{VETS} = & \quad -.1338128\text{E+}02 \text{ kV} && \text{(componente real)} \\ & \quad .2578334\text{E+}01 \text{ kV} && \text{(componente imaginária)} \\ & \quad .1362742\text{E+}02 \text{ kV} && \text{(módulo)} \\ & \quad 169.09 \text{ Graus} && \text{(argumento)} \end{aligned}$$

Pode-se verificar na tabela 2.21, que a tensão induzida eletrostaticamente é muito maior que a tensão induzida magneticamente, de tal forma que a tensão induzida total é praticamente capacitiva.

Isto é válido afirmar quando o comprimento do condutor isolado é pequeno. Para grandes extensões, na ordem de centenas de quilômetros, não se poderia desprezar esta influência.



CAPÍTULO 3

DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DO CONDUTOR
ISOLADO NO CIRCUITO AUXILIAR

3.1 INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 3

O capítulo anterior descreveu os sistemas de transmissão, calculou os parâmetros elétricos dos mesmos e analisou o comportamento da tensão induzida sobre o condutor isolado em vazio.

Neste capítulo serão feitas análises com a colocação de diversa impedâncias de carga nos terminais do condutor isolado, propor soluções para a melhoria da qualidade da energia entregue e avaliar as potências extraídas. Apresenta-se também o ressonância.

DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DO CONDUTOR ISOLADO NO CIRCUITO AUXILIAR

3.2 CONDUÇÃO DE POTÊNCIA PARA CARGA

Como o objetivo do condutor isolado é suprir pequenas cargas, analisar-se-á a influência desta sobre alguns parâmetros de interesse.

Seja o sistema de transmissão A, cujos dados foram fornecidos pelas tabelas 2.1 e 2.2, com o condutor isolado conectado, ao seu final, um transformador abaixador que alimenta uma carga Z_c , como indica a figura 3.1.



Figura 3.1 - Esquema de ligação do transformador e carga ao condutor isolado

CAPÍTULO 3

DERIVAÇÃO DE POTÊNCIA DO CONDUTOR ISOLADO NO CIRCUITO AUXILIAR

3.1 INTRODUÇÃO

O capítulo anterior descreveu os sistemas de transmissão, calculou os parâmetros elétricos dos mesmos e analisou o comportamento da tensão induzida sobre o condutor isolado em vazio.

Neste capítulo serão feitas análises com a colocação de diversa impedâncias de carga nos terminais do condutor isolado, propor soluções para a melhoria da qualidade de energia derivada e avaliar as potências extraídas. Apresenta-se também, algumas propostas de regulação da tensão através de um circuito ressonante LC.

3.2 CONDUTOR ISOLADO COM COLOCAÇÃO DE CARGA

Como o objetivo do condutor isolado é suprir pequenas cargas, analisar-se-á a influência desta sobre alguns parâmetros de interesse.

Seja o sistema de transmissão A, cujos dados foram fornecidos pelas tabelas 2.1 e 2.2, com o condutor isolado conectado, ao seu final, um transformador abaixador que alimenta uma carga Z'_c , como indica a figura 3.1.

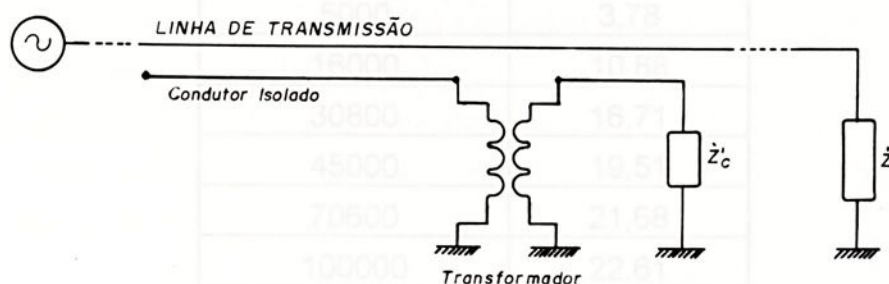


Figura 3.1 - Esquema de ligação do transformador e carga ao condutor isolado

Para maior facilidade, pode-se referir a carga Z_c ao primário do transformador, passando a ser denotada por Z_c . Desta forma, o circuito auxiliar pode ser representado por uma tensão e por uma impedância de Thevênin, V_{th} e C_{th} , respectivamente, conforme mostra a figura 3.2.

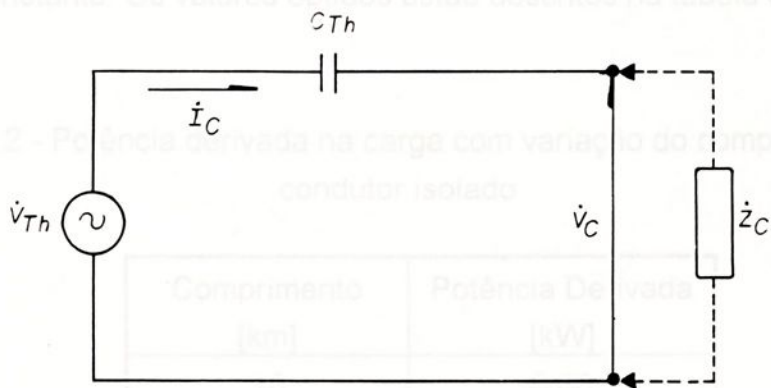


Figura 3.2 - Circuito equivalente do condutor isolado-carga

A partir deste ponto, proceder-se-á a variação de dois parâmetros, com os demais constantes, para adquirir-se sensibilidade sobre o estudo.

Inicialmente, com o comprimento do condutor isolado mantido constante, em 10km, varia-se o módulo da impedância Z_c e avalia-se a tensão V_c em seus terminais. Os resultados obtidos estão na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Tensão nos terminais da carga, V_c , com variação do módulo da carga Z_c

Impedância Z_c [Ω]	Tensão V_c [kV]
200	0,15
5000	3,78
16000	10,88
30800	16,71
45000	19,51
70600	21,68
100000	22.61
150000	23,18
250000	23,49
350000	23,57

683
BIBLIOTECA - UNESI
CAMPUS DE BAURÓ

Como a variação do módulo da carga Z_c varia muito a tensão nos seus terminais, esta condição é inaceitável para uma boa regulação de tensão e qualidade do suprimento de energia.

A seguir, mantendo-se constante a tensão do sistema circuito auxiliar, varia-se o comprimento do condutor isolado e observa-se a potência absorvida pela carga Z_c , mantida constante. Os valores obtidos estão descritos na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Potência derivada na carga com variação do comprimento do condutor isolado

Comprimento [km]	Potência Derivada [kW]
10	6,66
30	7,89
50	8,13
70	8,28
100	8,47
150	8,75

Observa-se, prontamente, que um aumento do comprimento do condutor isolado, aumenta também, a potência que se deseja derivar, porém, em uma proporção não linear.

Dando continuidade, mantém-se constante o fator de potência da carga, varia-se seu módulo e observa-se a tensão em seus terminais e a potência absorvida. As curvas estão apresentadas na figura 3.3. Novamente, constata-se a falta de qualidade da energia obtida.

Estas curvas de regulação tem uma característica diferente das usuais, ou seja, quanto mais indutiva a carga, maior a limite de potência ativa transmissível. Isto se justifica, levando em conta a alta impedância equivalente da fonte Thevènin, de caráter predominantemente capacitiva.

Observando-se ainda as curvas da figura 3.3, verifica-se que, embora seja possível derivar potência do condutor isolado, isto é obtido as custas de uma regulação de tensão muito elevada.



Figura 3.3 - Tensão nos terminais da carga em função da potência absorvida, com diversos fatores de potência

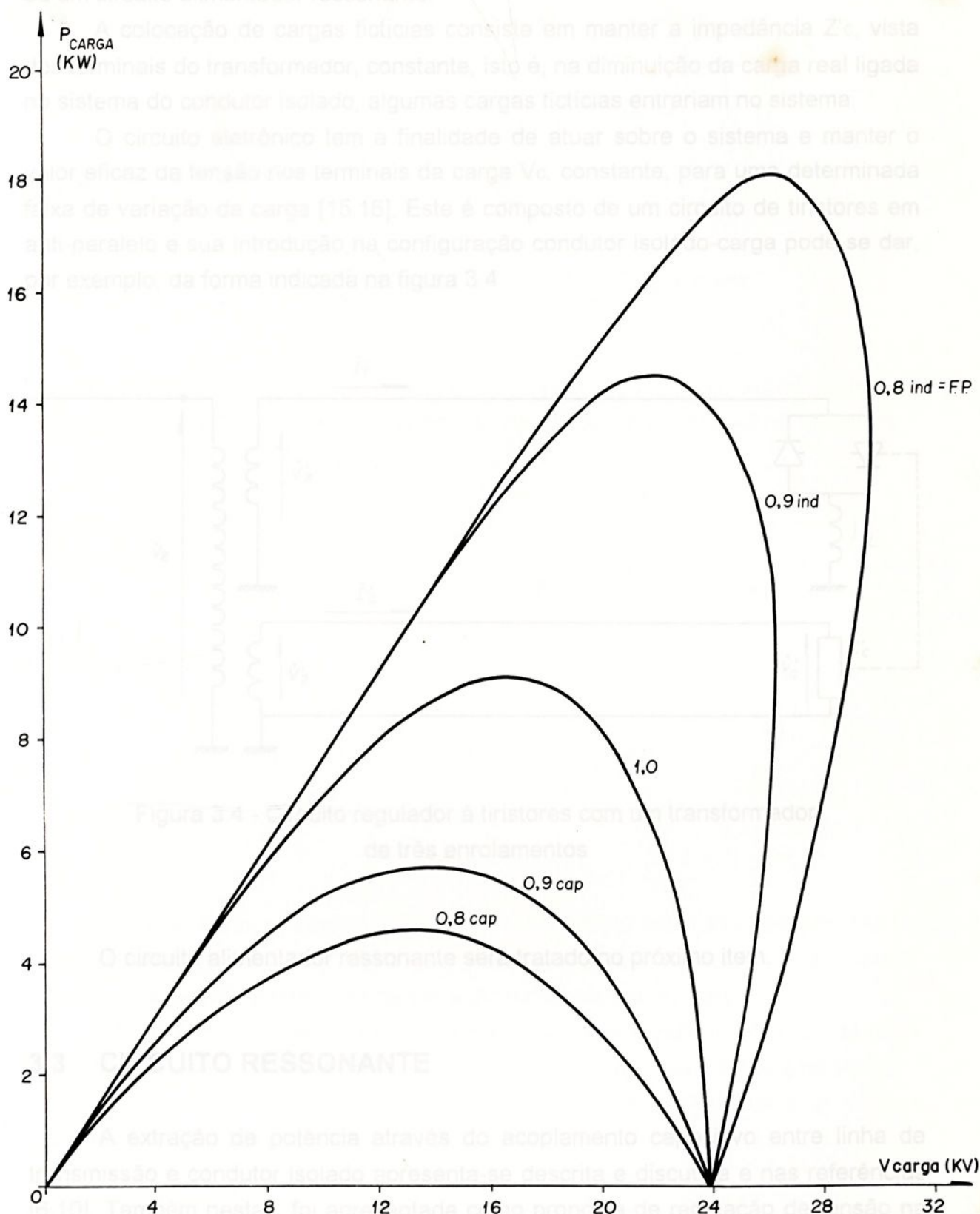


Figura 3.3 - Tensão nos terminais da carga em função da potência absorvida, com diversos fatores de potência

Como solução para corrigir este problema, pode-se recorrer a algumas estratégias: colocação de cargas fictícias, circuito regulador controlado à tiristores ou um circuito alimentador ressonante.

A colocação de cargas fictícias consiste em manter a impedância Z'_c , vista dos terminais do transformador, constante, isto é, na diminuição da carga real ligada no sistema do condutor isolado, algumas cargas fictícias entrariam no sistema.

O circuito eletrônico tem a finalidade de 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 [15,16]. 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 indicada na figura 3.4

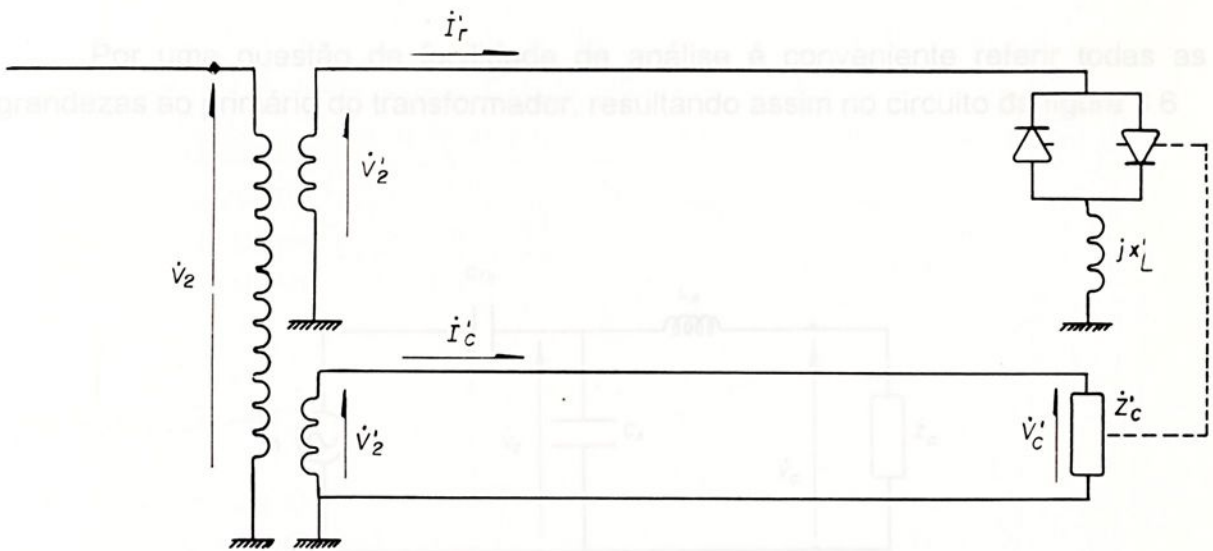


Figura 3.4 - Circuito regulador à tiristores com um transformador de três enrolamentos

Observando-se a figura 3.6, devido a ressonância entre as capacitâncias C_A e C_m , O circuito alimentador ressonante será tratado no próximo item.

3.3 CIRCUITO RESSONANTE

A extração de potência através do acoplamento capacitivo entre linha de transmissão e condutor isolado apresenta-se descrita e discutida e nas referências [6,10]. Também nestas, foi apresentada como proposta de regulação de tensão na carga, um circuito ressonante. A figura 3.5 indica a configuração básica do circuito ressonante, sendo este composto por um capacitor de ajuste $C'A$ e por um indutor $L'A$, os quais tornam o circuito, visto do terminal da carga, ressonante.

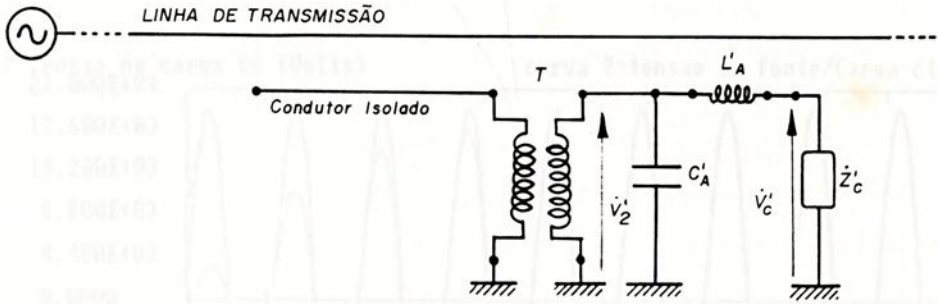


Figura 3.5 - Circuito ressonante e seus componentes

Por uma questão de facilidade de análise é conveniente referir todas as grandezas ao primário do transformador, resultando assim no circuito da figura 3.6

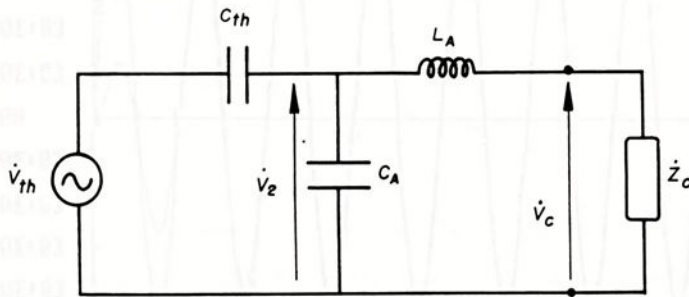


Figura 3.6 - Circuito equivalente com circuito ressonante

Observando-se a figura 3.6, devido a ressonância entre as capacitâncias C_A e C_{th} e a indutância L_A , a tensão V_{th} surgirá nos terminais da carga, para qualquer corrente, resolvendo o problema da variação da tensão V_c , na carga.

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 de L_A na ressonância, levando esta última a ter valores que poderiam ser facilmente encontrados no mercado.

Levando em consideração o sistema de transmissão B e o circuito da figura 3.6, a figura 3.7 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 Thevenin, ou seja, $Z_{base}=39589 \, \Omega$ (referida ao lado de alta do transformador).

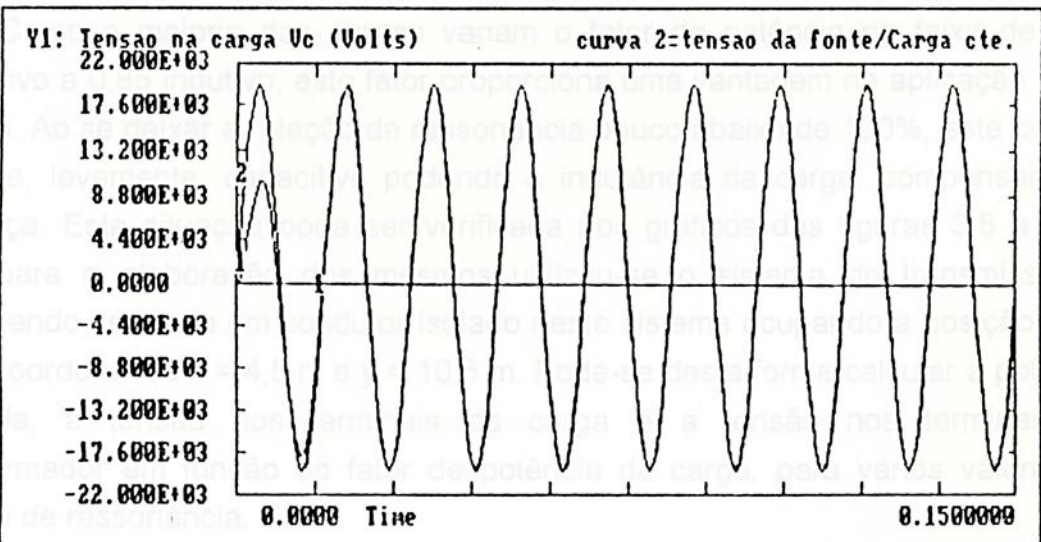
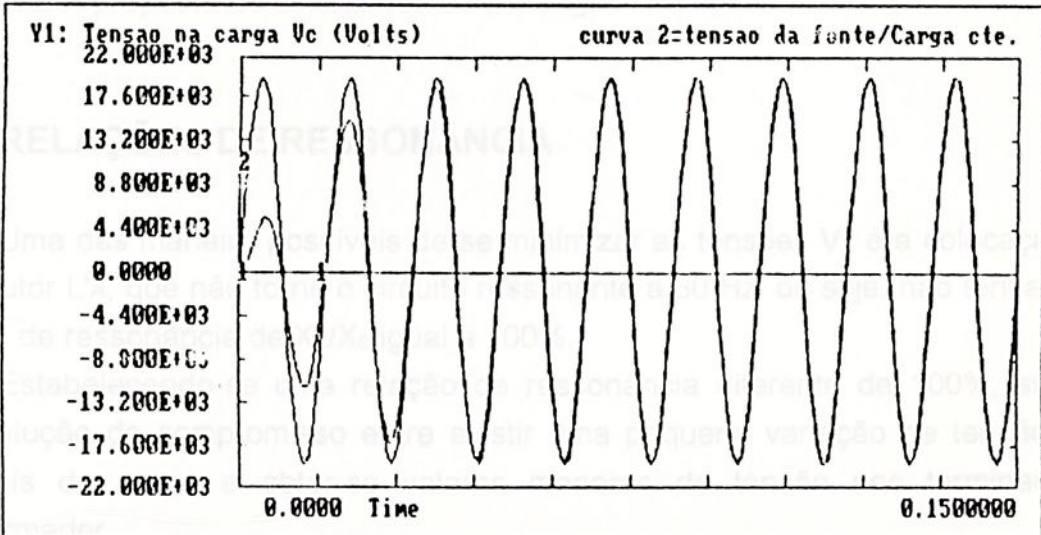
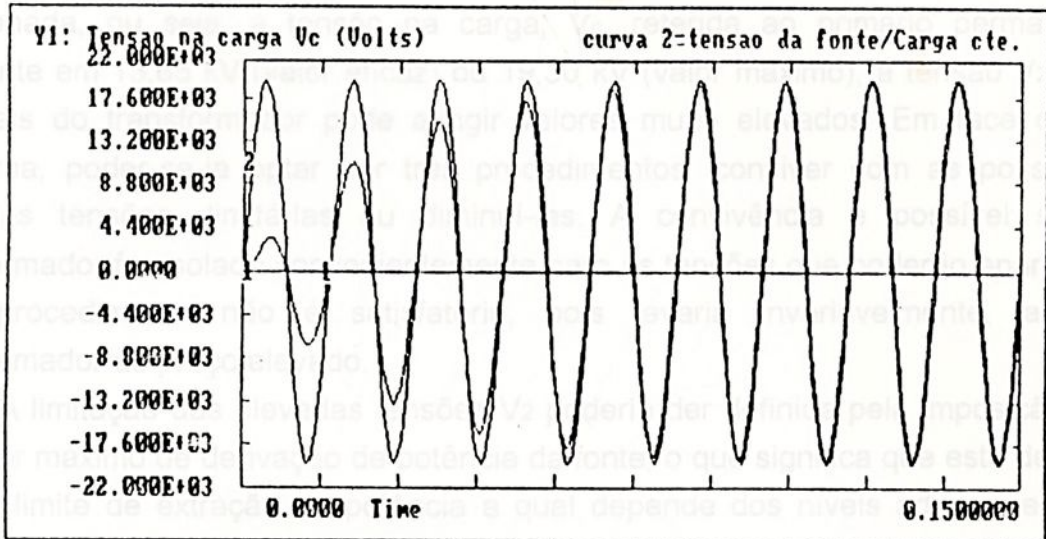


Figura 3.7 - Tensões instantâneas, v_c , no terminal da carga para impedância de carga constante

Da figura anterior verifica-se que, a condição de ressonância garante que a tensão V_{th} (curva 1) seja aplicada nos terminais da carga (curva 2) para qualquer valor de corrente. Muito embora, a questão da regulação de tensão fique solucionada, ou seja, a tensão na carga, V_c , referida ao primário permanece constante em 13,65 kV (valor eficaz) ou 19,30 kV (valor máximo), a tensão V_2 nos terminais do transformador pode atingir valores muito elevados. Em face deste problema, poder-se-ia optar por três procedimentos: conviver com as possíveis elevadas tensões, limitá-las ou diminuí-las. A convivência é possível se o transformador for isolado convenientemente para as tensões que poderão aparecer. Este procedimento não é satisfatório, pois levaria invariavelmente, a um transformador de preço elevado.

A limitação das elevadas tensões V_2 poderia ser definida pela imposição de um valor máximo de derivação de potência da fonte, o que significa que esta deverá ter um limite de extração de potência a qual depende dos níveis admissíveis da tensão V_2 . A proposta de diminuí-las será a seguir discutida.

3.4 RELAÇÕES DE RESSONÂNCIA

Uma das maneiras possíveis de se minimizar as tensões V_2 é a colocação de um indutor $L'A$, que não torne o circuito ressonante a 60 Hz, ou seja, não tenha uma relação de ressonância de X_L/X_c igual a 100%.

Estabelecendo-se uma relação de ressonância diferente de 100%, surgirá uma solução de compromisso entre existir uma pequena variação de tensão nos terminais da carga e obter-se valores menores de tensão nos terminais do transformador.

Como a maioria das cargas variam o fator de potência na faixa de 0,98 capacitivo a 0,85 indutivo, este fator proporciona uma vantagem na aplicação deste método. Ao se deixar a relação de ressonância pouco abaixo de 100%, este circuito torna-se, levemente, capacitivo podendo a indutância da carga, compensar esta diferença. Esta situação pode ser verificada nos gráficos das figuras 3.8 a 3.10, onde para a elaboração dos mesmos utilizou-se o sistema de transmissão A adicionando-se ainda um condutor isolado neste sistema ocupando a posição dada pelas coordenadas $x = 4,5$ m e $y = 10,5$ m. Pode-se desta forma calcular a potência derivada, a tensão nos terminais da carga e a tensão nos terminais do transformador em função do fator de potência da carga, para vários valores da relação de ressonância.

A variação do fator de potência é obtida, nestes gráficos, adotando-se uma impedância de carga, com módulo constante, com parte resistiva e reativa variável.

curva relações de ressonância

Figura 3.8 - Potência ativa da carga pelo fator de potência para
cinco relações de ressonância

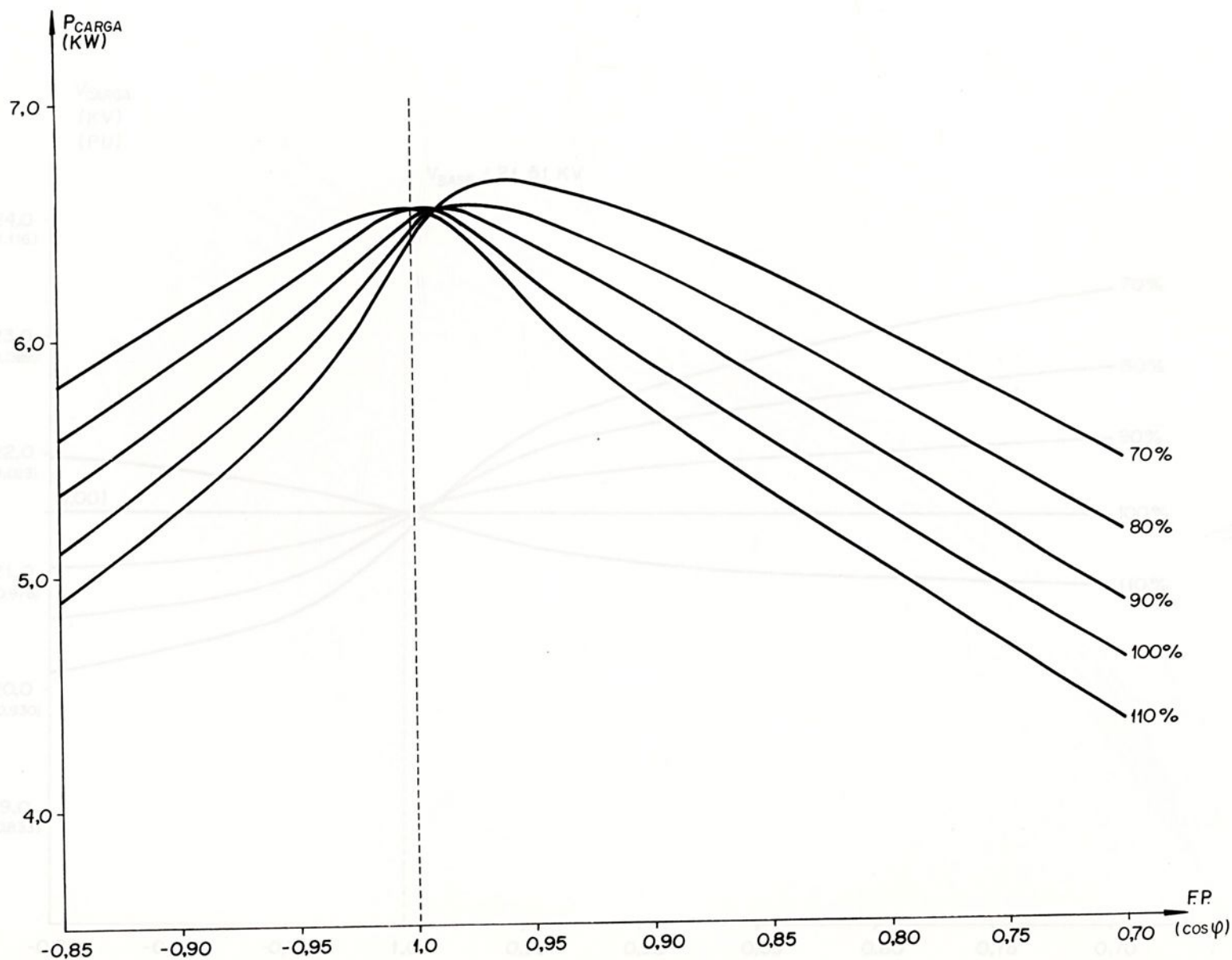
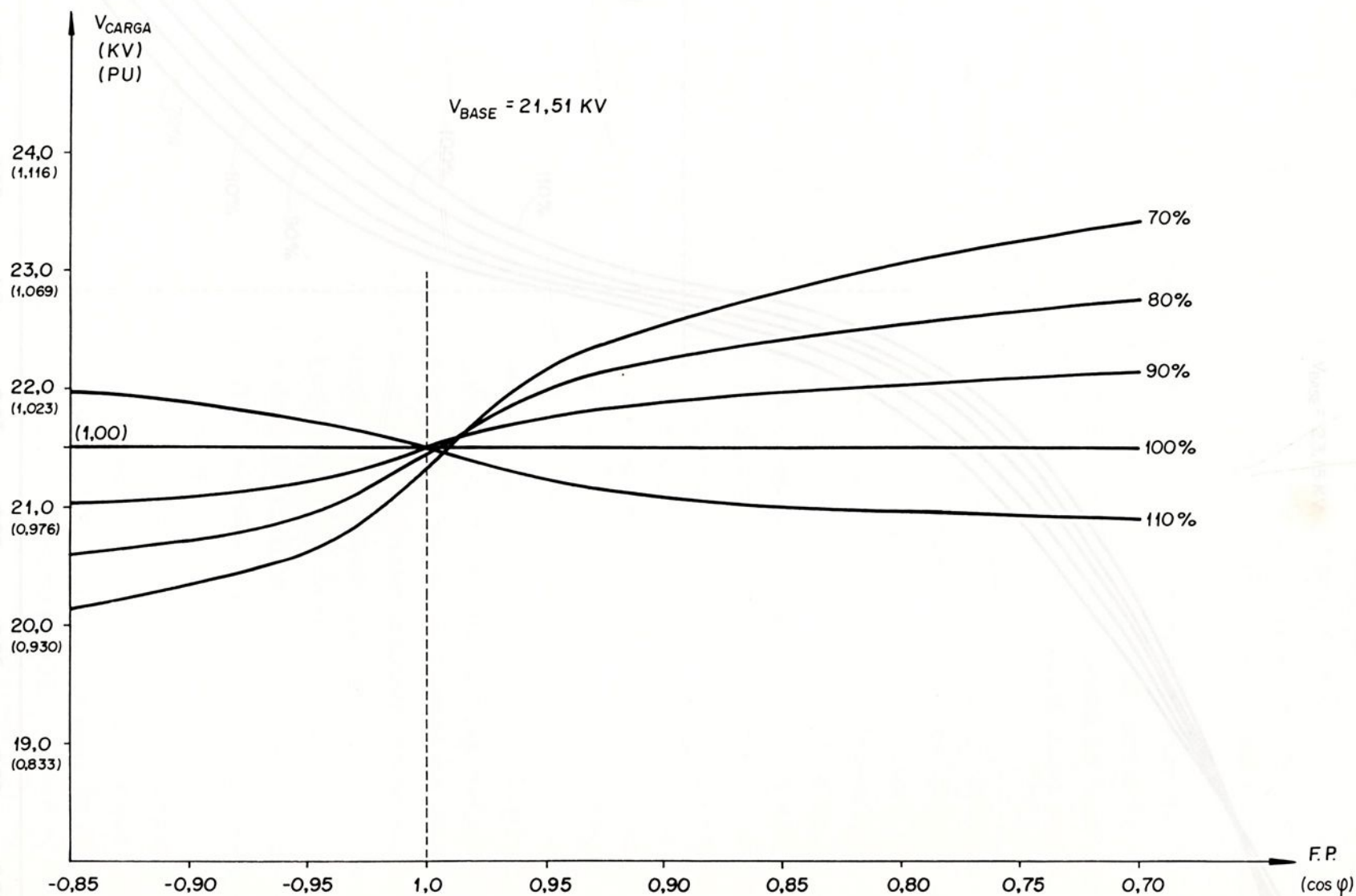


Figura 3.9 - Tensão na carga pelo fator de potência para cinco relações de ressonância



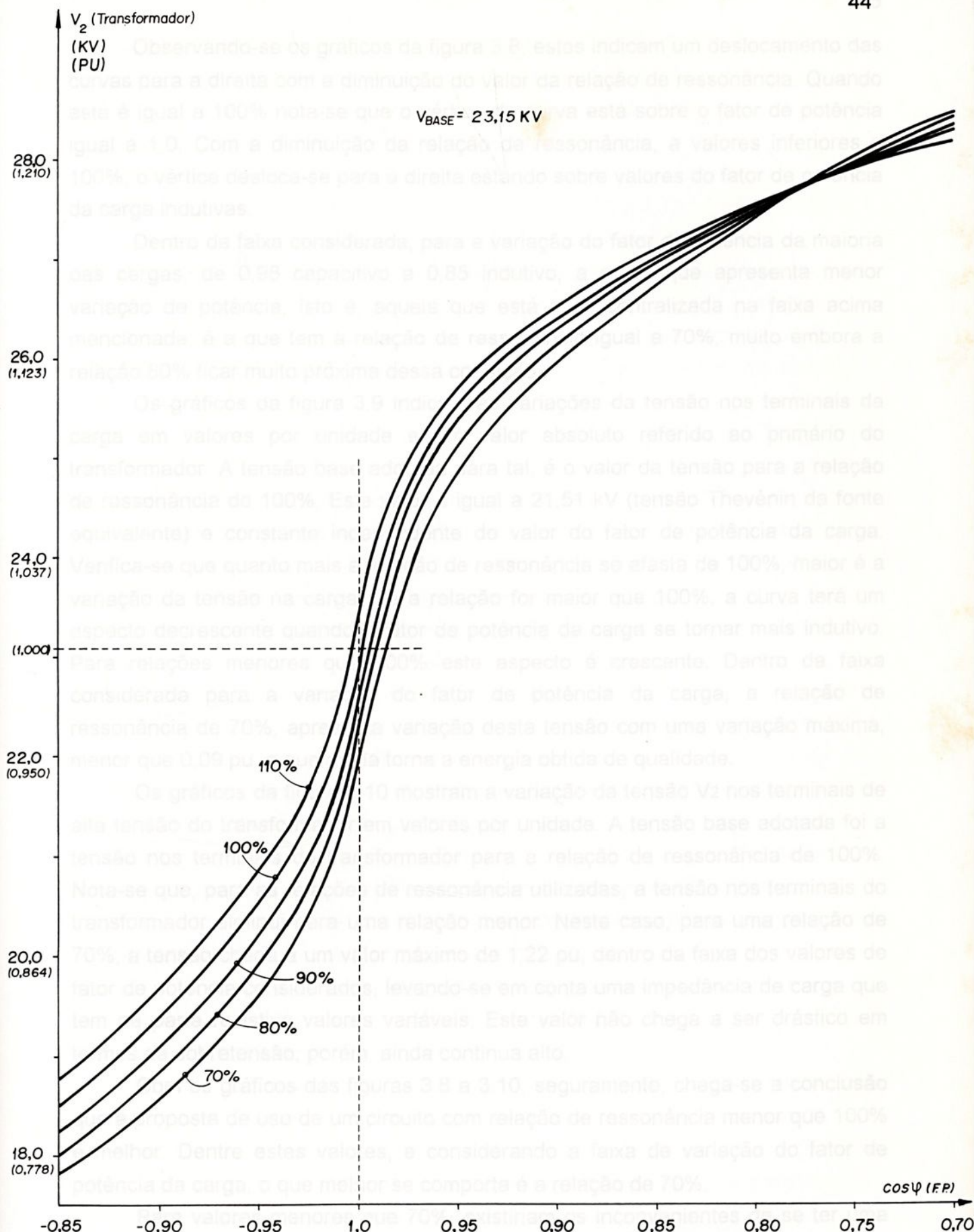


Figura 3.10 - Tensão no transformador pelo fator de potência para cinco relações de ressonância

Observando-se os gráficos da figura 3.8, estes indicam um deslocamento das curvas para a direita com a diminuição do valor da relação de ressonância. Quando esta é igual a 100% nota-se que o vértice da curva está sobre o fator de potência igual a 1,0. Com a diminuição da relação de ressonância, a valores inferiores a 100%, o vértice desloca-se para a direita estando sobre valores do fator de potência da carga indutivas.

Dentro da faixa considerada, para a variação do fator de potência da maioria das cargas, de 0,98 capacitivo a 0,85 indutivo, a curva que apresenta menor variação de potência, isto é, aquela que está mais centralizada na faixa acima mencionada, é a que tem a relação de ressonância igual a 70%, muito embora a relação 80% ficar muito próxima dessa condição.

Os gráficos da figura 3.9 indicam as variações da tensão nos terminais da carga em valores por unidade e em valor absoluto referido ao primário do transformador. A tensão base adotada para tal, é o valor da tensão para a relação de ressonância de 100%. Este valor é igual a 21,51 kV (tensão Thevenin da fonte equivalente) e constante independente do valor do fator de potência da carga. Verifica-se que quanto mais a relação de ressonância se afasta de 100%, maior é a variação da tensão na carga. Se a relação for maior que 100%, a curva terá um aspecto decrescente quando o fator de potência da carga se tornar mais indutivo. Para relações menores que 100% este aspecto é crescente. Dentro da faixa considerada para a variação do fator de potência da carga, a relação de ressonância de 70%, apresenta variação desta tensão com uma variação máxima, menor que 0,09 pu, o que ainda torna a energia obtida de qualidade.

Os gráficos da figura 3.10 mostram a variação da tensão V_2 nos terminais de alta tensão do transformador em valores por unidade. A tensão base adotada foi a tensão nos terminais do transformador para a relação de ressonância de 100%. Nota-se que, para as relações de ressonância utilizadas, a tensão nos terminais do transformador diminui para uma relação menor. Neste caso, para uma relação de 70%, a tensão chega a um valor máximo de 1,22 pu, dentro da faixa dos valores de fator de potência considerados, levando-se em conta uma impedância de carga que tem na parte resistiva valores variáveis. Este valor não chega a ser drástico em termos de sobretensão, porém, ainda continua alto.

Com os gráficos das figuras 3.8 a 3.10, seguramente, chega-se a conclusão que a proposta de uso de um circuito com relação de ressonância menor que 100% é melhor. Dentre estes valores, e considerando a faixa de variação do fator de potência da carga, o que melhor se comporta é a relação de 70%.

Para valores menores que 70%, existiriam os inconvenientes de se ter uma variação de tensão nos terminais da carga muito grande e uma curva de potência ativa que não estaria centralizada na faixa considerada, porém, o conveniente de diminuir a tensão nos terminais do transformador.

Para valores maiores que 70%, o inconveniente da não centralização da curva de potência ainda continuaria e a variação das tensões sobre o transformador e sobre a impedância de carga tornam-se inconveniente e conveniente, respectivamente, ao inverso do analisado acima.

Em função desta conclusão sobre a relação de ressonância de 70%, proceder-ser-á a execução dos gráficos das figuras 3.11 e 3.12, indicando algumas grandezas relevantes. Estes são feitos mantendo-se o fator de potência da carga constante, e para tal, varia-se a parte resistiva da mesma, calculando-se a parte reativa. A configuração do sistema de transmissão A continua sendo a utilizada.

Nos gráficos da figura 3.11, nota-se que para um aumento do módulo da impedância de carga, mantendo-se constante o fator de potência da mesma, a potência consumida tende a diminuir. Este fato pode causar um aumento ou diminuição da tensão nos terminais da carga dependendo do fator de potência adotado.

Os gráficos da figura 3.12, indicam a relação entre as tensões da impedância de carga e as tensões nos terminais do transformador. Aplicando-se a este caso a mesma análise adotada na figura 3.11, verifica-se que o aumento do módulo da impedância de carga, diminui a tensão nos terminais do transformador.

Chega-se a conclusão pela observação e análise dos gráficos das figuras 3.11 e 3.12 que para um aumento da potência derivada ocorre um aumento da tensão nos terminais do transformador, como já se havia concluído, anteriormente.

Com a finalidade de confrontar os valores de 70% e 100% da relação de ressonância, tracear-se-á os gráficos das figuras 3.13 e 3.14, respectivamente, com relação a variação dos parâmetros acima mencionados, e também, a figura 3.15, que sobrepõe estes dois últimos gráficos.

Os gráficos das figuras 3.13 e 3.14 reafirmam que um aumento da potência derivada conduz a um aumento da tensão nos terminais do transformador.

A figura 3.15 mostra que as tensões nos terminais do transformador são menos intensas para uma relação de ressonância de 70% do que par 100%, isto é, para uma determinada potência derivada, a tensão é maior no gráfico de relação 100% (linha pontilhada) do que na relação de 70% (linha contínua) para um mesmo fator de potência da carga.

Em face destas análises, pode-se concluir que a adoção de um circuito cuja relação de ressonância seja de 70% é perfeitamente viável tecnicamente, pois fornece uma energia elétrica de boa qualidade e ainda reduz os investimentos iniciais, já que o valor do indutor L'A e o nível de isolamento do transformador diminuem face a relação de ressonância de 100%.

Figura 3.11 - Tensão nos terminais da carga pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância de 70%

Figura 3.11 - Tensão nos terminais da carga pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância de 70%

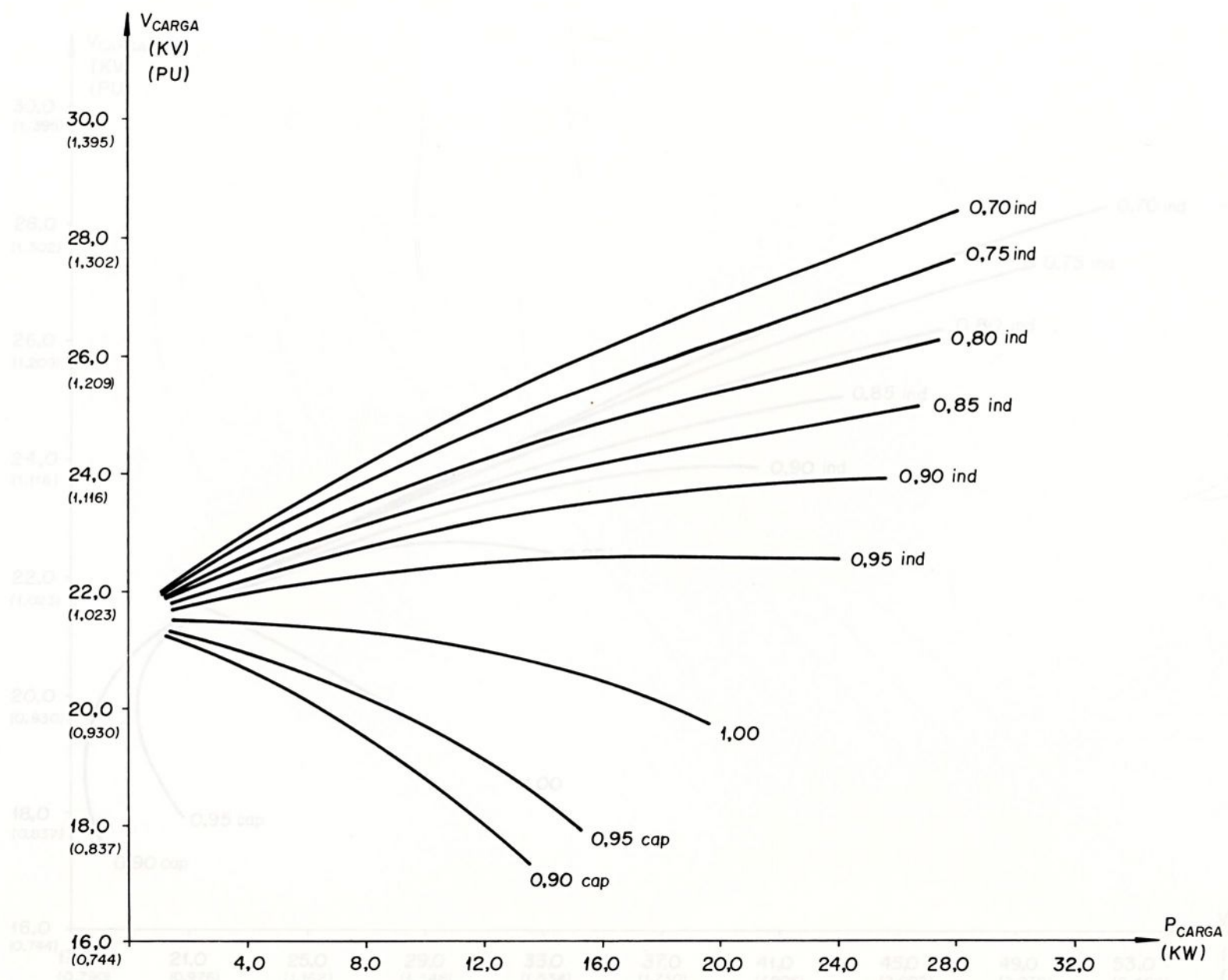
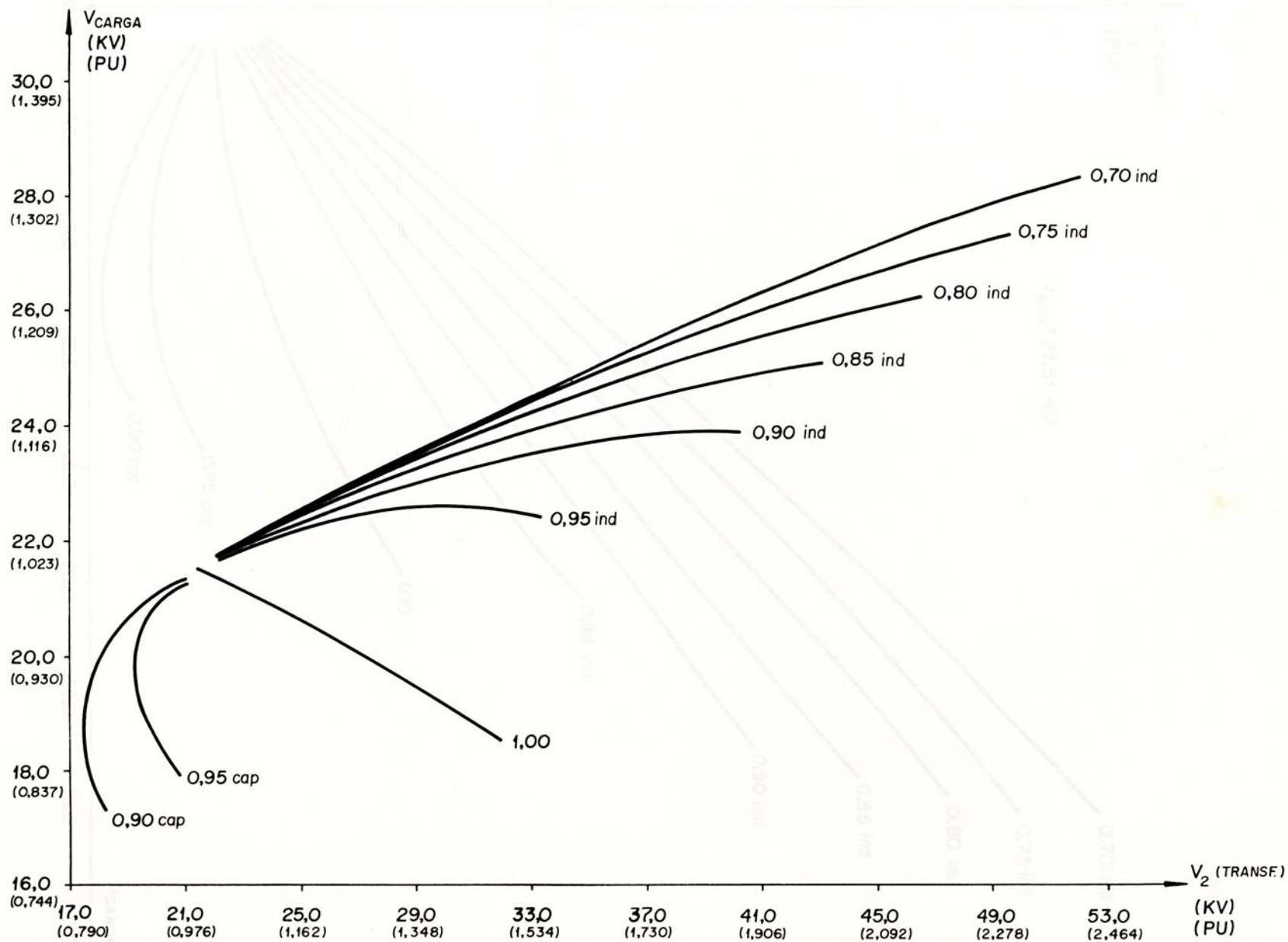


Figura 3.12 - Tensão na carga pela tensão nos terminais do transformador com diversos fatores de potência na relação de ressonância de 70%



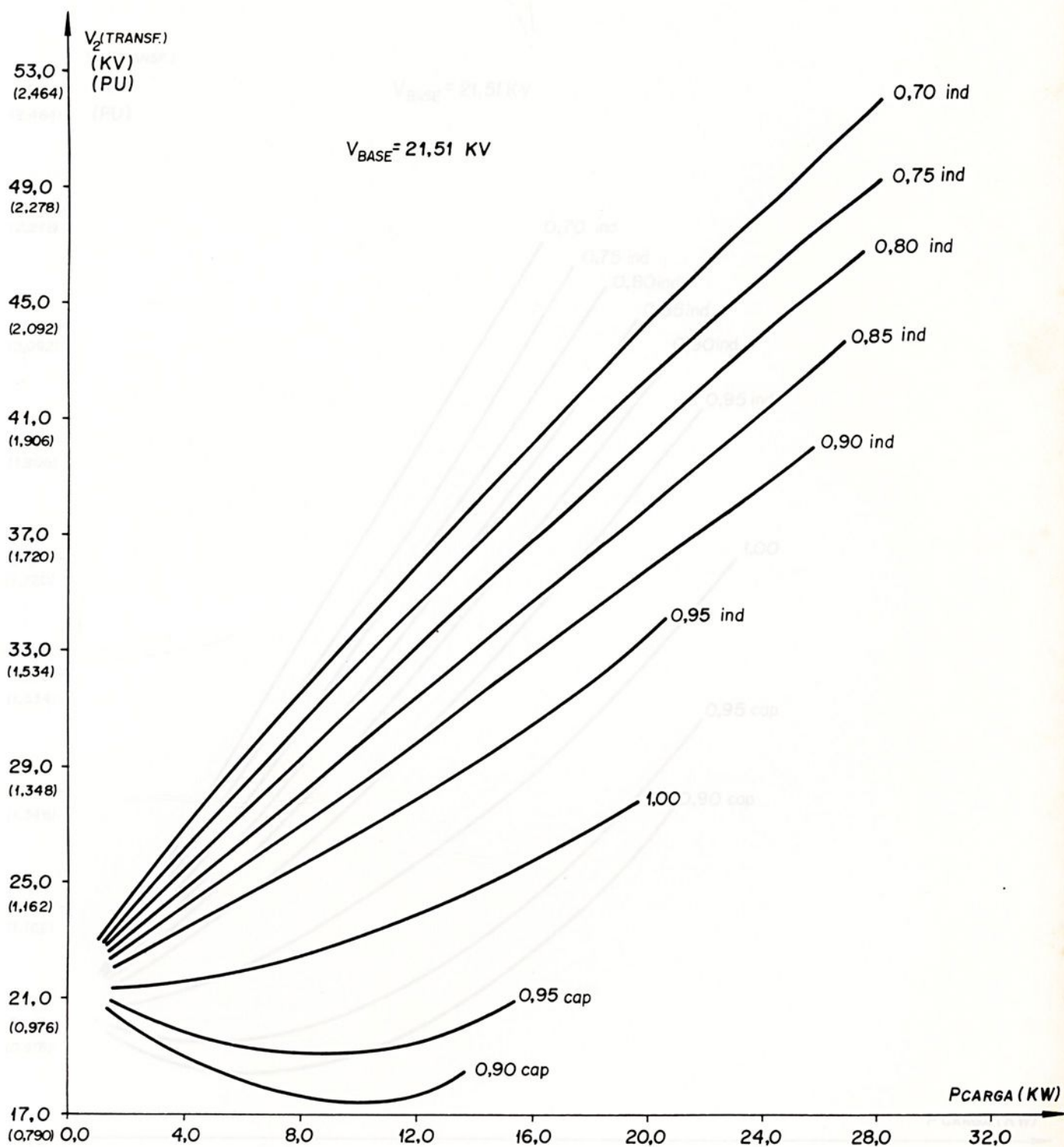


Figura 3.13 - Tensão nos terminais do transformador pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância de 70%

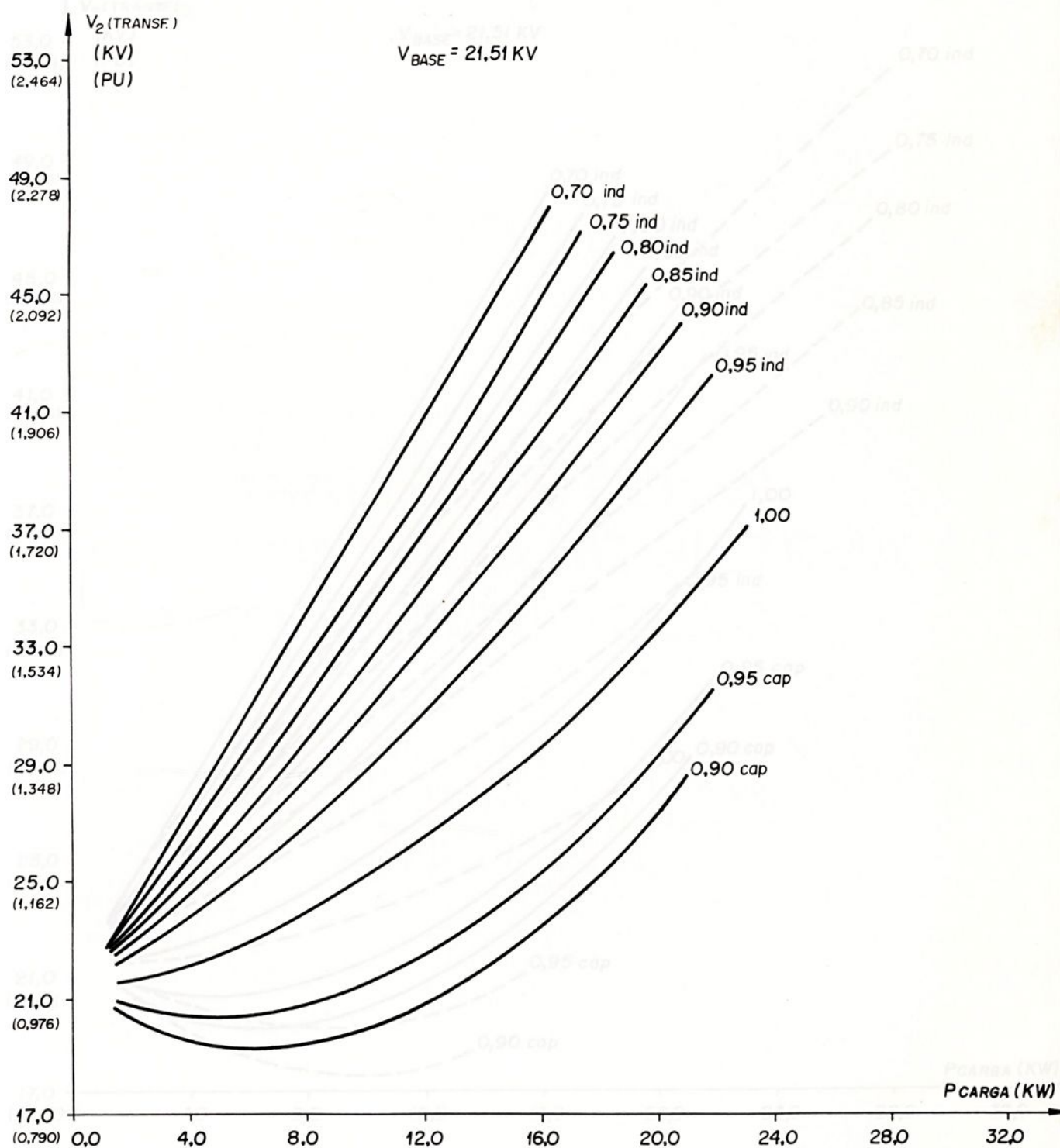


Figura 3.15 - Sobreposição das figuras 3.13 e 3.14

Figura 3.14 - Tensão nos terminais do transformador pela potência ativa derivada com diversos fatores de potência na relação de ressonância de 100%

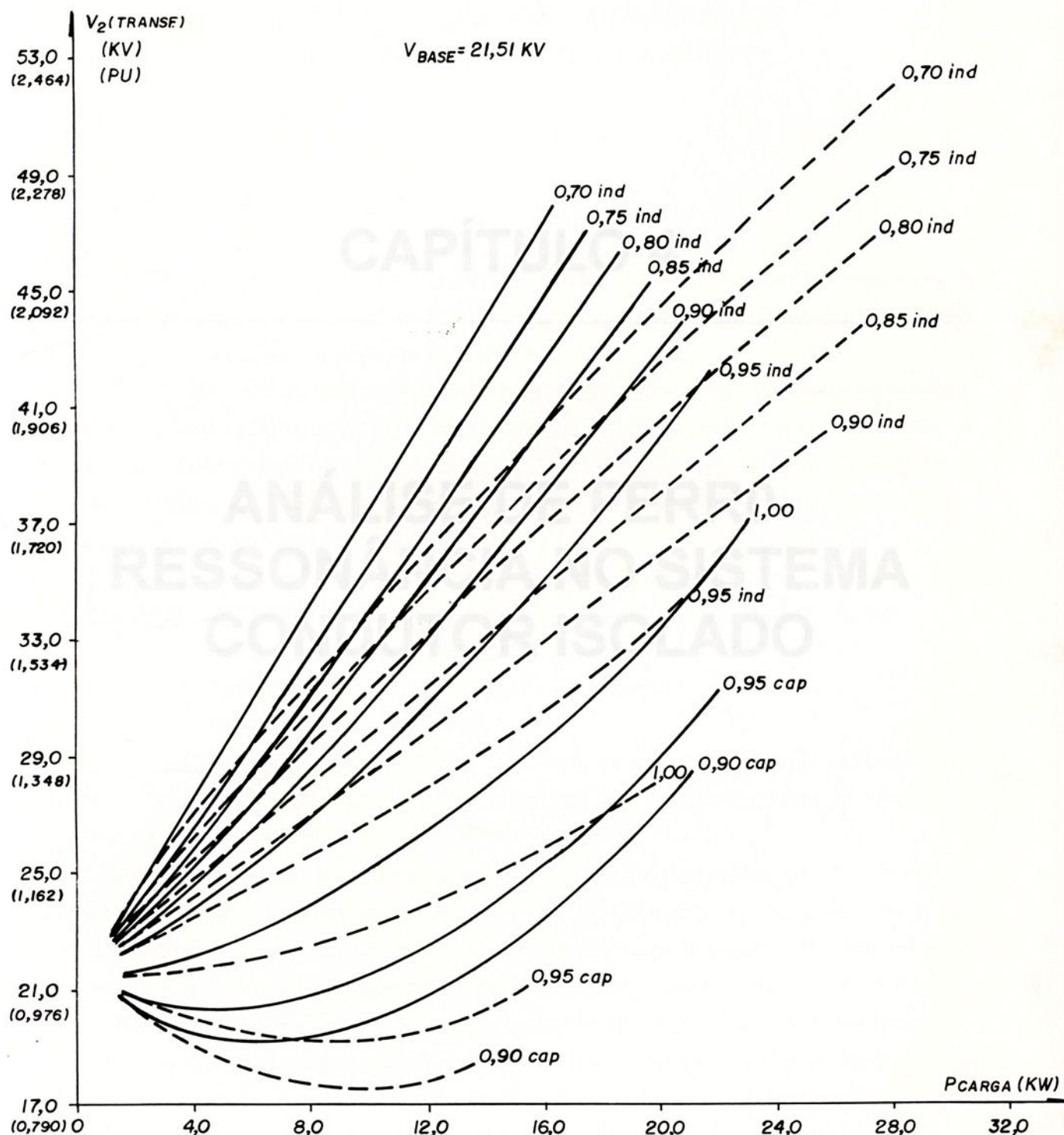


Figura 3.15 - Sobreposição das figuras 3.13 e 3.14

- relação de ressonância de 70%
- relação de ressonância de 100%

N.º 683

BIBLIOTECA - UNESP
CAMPUS DE BAURD

ANÁLISE DE FERRO-RESSONÂNCIA NO SISTEMA CONDUTOR ISOLADO

1.1 INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE FERRO- RESSONÂNCIA NO SISTEMA CONDUTOR ISOLADO

- sobretensões de chaveamento (manobra)

- sobretensões temporárias

As sobretensões atmosféricas são causadas por surtos atmosféricos, usualmente de duração muito curta da ordem de microssegundos, e amplitude máxima da ordem de 5 pu.

As sobretensões de chaveamento são causadas por surtos de manobras tais como energização e religamento de linhas e ocorrência e abertura de faltas. Tal sobretensão é em geral fortemente amortecida, de curta-duração na ordem de milissegundos e com amplitude máxima de difícil previsão, mas sempre inferior a 4 pu.

As sobretensões temporárias são geralmente causadas por manobras (por exemplo: rejeição de carga), faltas, ciclo faltante, fenômenos não lineares (ferro-ressonância), entre outros. Podem ser caracterizadas por um tempo de duração superior a centenas de microssegundos e de amplitude em geral inferior a 1,5 pu.

As sobretensões temporárias podem ser classificadas em três grupos:

- grupo 1: com frequência de oscilação próxima à industrial;
- grupo 2: com frequência de oscilação maior que a industrial;
- grupo 3: com frequência de oscilação menor que a industrial.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE FERRO-RESSONÂNCIA NO SISTEMA CONDUTOR ISOLADO

1.1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência estão sujeitos de forma contínua a inúmeros tipos de fenômenos transitórios, variando desde oscilações de frequência relativamente baixa até às rápidas variações.

Os fenômenos transitórios podem ocorrer devido a uma variedade de razões, podendo gerar sobrecorrentes, sobretensões, formas de ondas anormais e transitórios eletromecânicos. Em geral, um evento qualquer poderá dar origem a todos os efeitos acima mencionados, porém, na maioria dos estudos, algum destes efeitos é mais importante do que os outros.

Baseado no grau de amortecimento e no tempo de duração das sobretensões, de acordo com a norma IEC-TC 28, estas são classificadas em:

- sobretensões atmosféricas;
- sobretensões de chaveamento (manobra);
- sobretensões temporárias.

As sobretensões atmosféricas são causadas por surtos atmosféricos, usualmente de duração muito curta, da ordem de micro-segundos, e amplitude máxima da ordem de 6 pu.

As sobretensões de chaveamento são causadas por surtos de manobras tais como energização e religamento de linhas e ocorrência e abertura de faltas. Tal sobretensão é em geral fortemente amortecida, de curta-duração na ordem de mili-segundos e com amplitude máxima de difícil previsão, mas sempre inferior a 4 pu.

As sobretensões temporárias são geralmente causadas por: manobras (por exemplo rejeição de carga), faltas, efeito ferranti, fenômenos não lineares (ferro-ressonância), entre outros. Podem ser caracterizadas por um tempo de duração superior a dezenas de mili-segundos e de amplitude em geral inferior a 1,5 pu.

As sobretensões temporárias podem ser classificadas em três grupos:

- grupo 1: com frequência de oscilação próxima à industrial;
- grupo 2: com frequência de oscilação maior que a industrial;
- grupo 3: com frequência de oscilação menor que a industrial.

Pretende-se aqui fazer um estudo do fenômeno ferro-ressonância, uma vez que, tal condição é estabelecida quando um circuito contém elementos resistivos, capacitivos e indutores não lineares.

A possibilidade de ocorrência da ferro-ressonância nesses circuitos pode levar a valores extremamente grandes de tensões e correntes que poderiam prejudicar ou mesmo danificar os equipamentos do sistema.

Esse fenômeno pode ocorrer na derivação de potência através do condutor isolado e transformador abaixador, pois todos os elementos acima mencionados estão contidos neste circuito.

4.2 CONCEITUAÇÃO DE RESSONÂNCIA SÉRIE

As condições de ressonância estão associadas a circuitos que contém resistências, capacitâncias e indutâncias lineares e tais circuitos são excitados por uma tensão com frequência próxima ou igual a sua frequência natural.

Considere o circuito da figura 4.1 composto de uma fonte de tensão senoidal v , uma resistência R , uma capacitância C e uma indutância L .

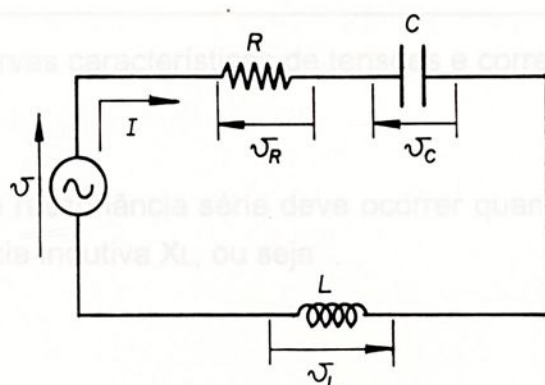


Figura 4.1 - Circuito RLC série

Os valores eficazes das quedas de tensão instantâneas v_r , v_c e v_l valem respectivamente,

$$V_R = R.I \quad (4.1a)$$

$$V_C = [1/(\omega.C)].I = X_C.I \quad (4.1b)$$

$$V_L = \omega.L.I = X_L.I \quad (4.1c)$$

Como as tensões V_L e V_C estão em oposição de fase, sua adição fasorial, far-se-á com a subtração de seus módulos. Logo a corrente no circuito da figura 4.1 será:

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (4.2)$$

A figura 4.2 indica as formas de onda das quedas de tensões e corrente.

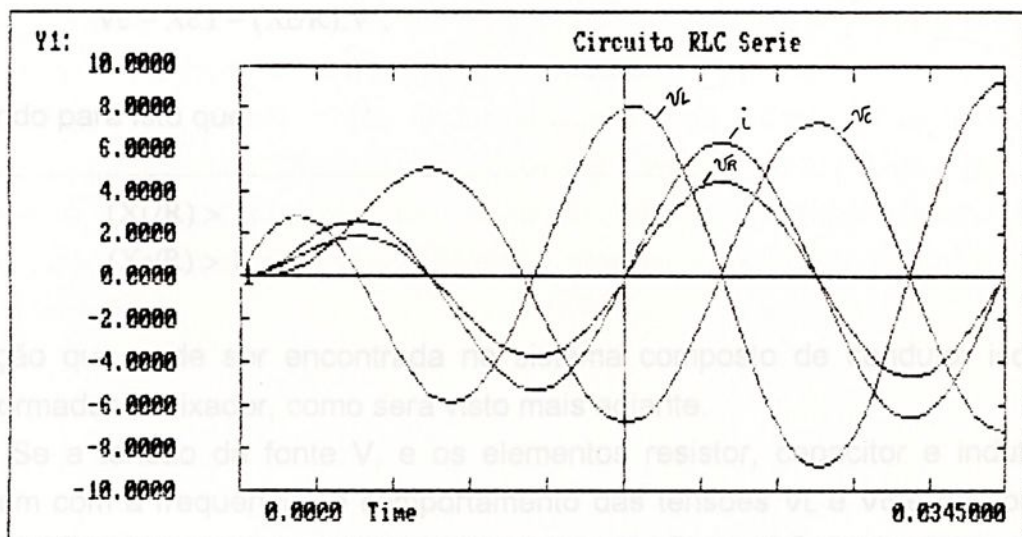


Figura 4.2 - Curvas características de tensões e corrente no circuito RLC

A condição de ressonância série deve ocorrer quando a reatância capacitiva X_C for igual a reatância indutiva X_L , ou seja:

$$X_C = X_L$$

e nesta condição, a corrente no circuito série da figura 4.1, terá seu valor eficaz dado por:

$$I = V/R \quad (4.3)$$

e a frequência angular natural por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.4)$$

Convém observar no circuito da figura 4.1 que, para uma resistência muito pequena e uma frequência angular igual a natural, as oscilações de carga e

descarga entre o capacitor **C** e o indutor **L** serão não amortecidas e as amplitudes das oscilações de corrente tornam-se máxima.

As tensões de ressonância podem ser perigosas e proporcionar danos irreversíveis aos equipamentos instalados nos sistemas elétricos.

Nesta situação pode-se ter os valores das tensões V_L e V_C maior que a própria tensão da fonte V , como indica as equações (4.5), válidas para a condição de ressonância:

$$V_L = X_L \cdot I = (X_L/R) \cdot V \quad (4.5a)$$

$$V_C = X_C \cdot I = (X_C/R) \cdot V \quad (4.5b)$$

bastando para isto que:

$$(X_L/R) > 1$$

$$(X_C/R) > 1$$

condição que pode ser encontrada no sistema composto de condutor isolado e transformador abaixador, como será visto mais adiante.

Se a tensão da fonte V , e os elementos resistor, capacitor e indutor não variarem com a frequência, o comportamento das tensões V_L e V_C e da corrente I em função da frequência, pode ser observado na figura 4.3, onde nota-se que o maior valor da corrente ocorre na frequência natural (de ressonância) e as máximas tensões de V_L e V_C em frequências distintas.

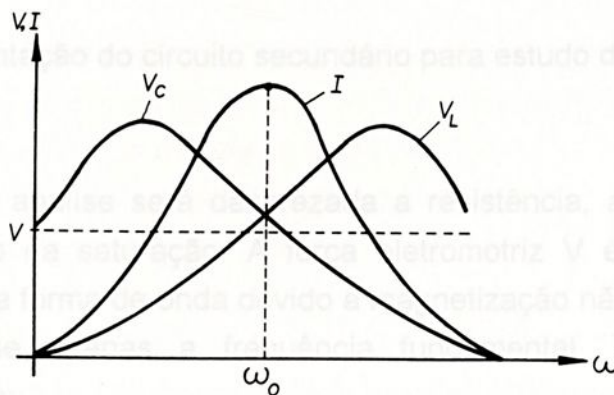


Figura 4.3 - Curvas de ressonância em função de ω

4.3 ESTUDO DA FERRO-RESSONÂNCIA

Nas condições do item anterior, foi suposto que a indutância L dos circuitos era independente da corrente e constante. Este fato acontece quando as indutâncias possuem núcleos de material não ferro-magnéticos e seu fluxo magnético flui preponderantemente pelo ar. Entretanto, se as indutâncias são montadas sobre núcleos fechados de material ferro-magnéticos e o fluxo magnético flui totalmente ou quase que plenamente pelo ferro, os circuitos não terão uma indutância constante, ao contrário, os valores das indutâncias irão depender das correntes e do grau de saturação do material do núcleo. Esta situação é encontrada nos transformadores e outros equipamentos elétricos.

A figura 4.4 abaixo, indica de forma simplificada o circuito que representa o sistema secundário de obtenção de potência, constituído de uma capacitância equivalente entre a linha principal e condutor isolado, um transformador utilizado para abaixar a tensão do condutor isolado e uma fonte de tensão, que é a induzida sobre o mesmo.

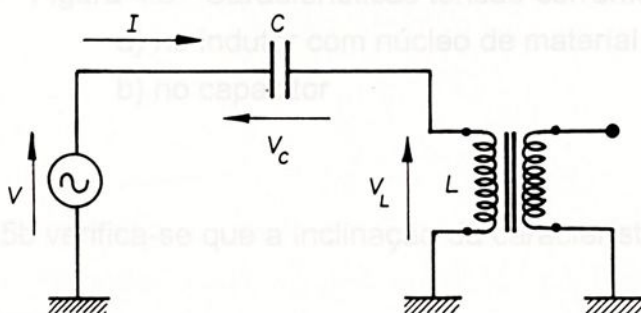


Figura 4.4 - Representação do circuito secundário para estudo da ferro-ressonância

Para início de análise será desprezada a resistência, a fim se obter uma forma pura do efeito da saturação. A força eletromotriz V é suposta senoidal. Qualquer distorção na forma de onda devido a magnetização não será considerada, devendo-se adotar-se apenas a frequência fundamental. Tem-se assim, na condição de equilíbrio:

$$V = V_C + V_L \quad (4.6)$$

A tensão V_L na indutância não é proporcional a corrente e a característica tensão-corrente do indutor é dada conforme indica a figura 4.5a, enquanto a tensão

V_c no capacitor é proporcional a corrente, inversamente proporcional a frequência e capacitância e está em oposição de fase em relação à tensão na indutância. Deste modo, resulta:

$$V_L = \omega \cdot f(I) \quad (4.7)$$

$$V_c = - I/(\omega \cdot C) \quad (4.8)$$

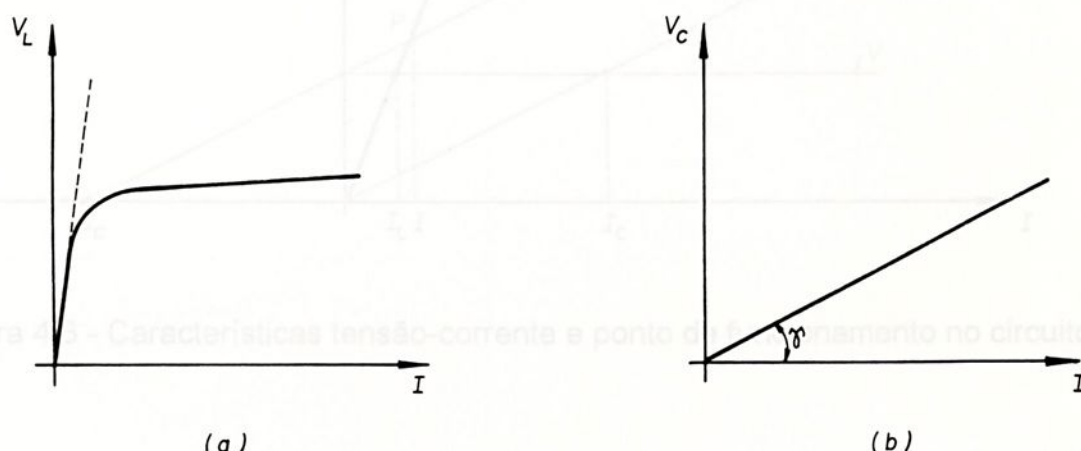


Figura 4.5 - Características tensão-corrente

- a) no indutor com núcleo de material ferromagnético
- b) no capacitor

Da figura 4.5b verifica-se que a inclinação da característica tensão-corrente é dada por:

$$\operatorname{tg} \gamma = 1/(\omega \cdot C) \quad (4.9)$$

de onde se conclui que esta será tanto maior quanto menor for o valor de ωC .

Substituindo-se as equações (4.7) e (4.8) na equação (4.6) a condição de equilíbrio no circuito é satisfeita e pode-se escrever:

$$V_L = \omega \cdot f(I) = V + I/(\omega \cdot C) = V + V_c \quad (4.10)$$

Da equação (4.10) pode-se montar o gráfico da figura 4.6 onde V , a tensão de alimentação do circuito da figura 4.4, é representada por uma constante, I_L representa a corrente no indutor se o circuito estivesse sob influência exclusiva da tensão V e não existisse o capacitor, I_c de maneira análoga a I_L se não existisse o indutor e I a corrente no circuito com inclusão de ambos elementos, indutor e capacitor.

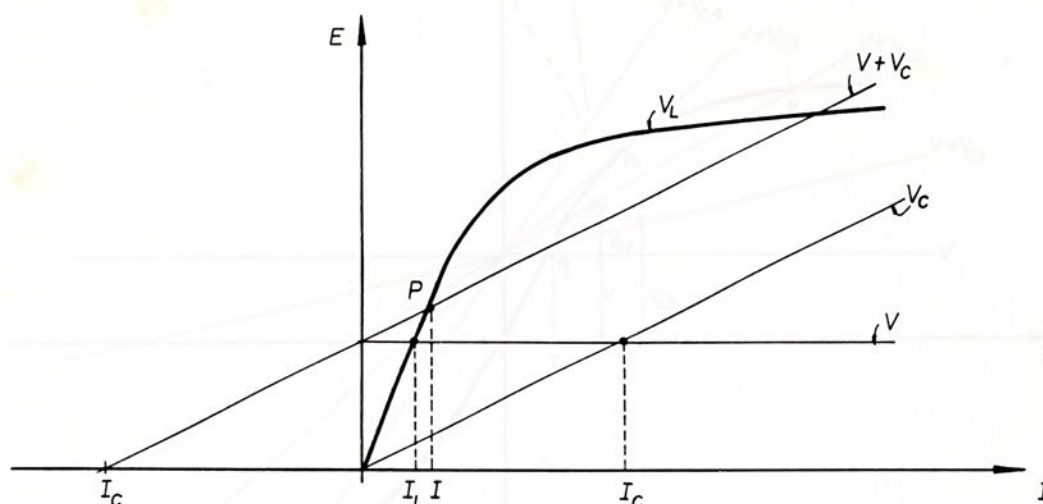


Figura 4.6 - Características tensão-corrente e ponto de funcionamento no circuito

Por outro lado, pode-se também obter o mesmo valor de I_c prolongando-se a reta $(V + V_c)$ para o lado esquerdo da figura 4.6, o ponto onde esta corta o eixo das correntes será I_c ,

Observa-se da figura 4.7 que para grandes valores de capacitância a tensão

$$I_c = -E/\operatorname{tg} \gamma = -E \cdot \omega \cdot C \quad (4.11)$$

Quando o valor da capacitância for C_1 , o ponto de funcionamento será P_1 , o sinal negativo registra o fato de que a corrente é capacitiva.

Da figura 4.6 se pode verificar que a aplicação da tensão V só no indutor, caso não existisse o capacitor origina pequenas correntes I_L , enquanto que para o capacitor, caso não existisse o indutor, origina consideráveis correntes I_c e uma corrente I de valor médio quando da ação conjunta de ambos elementos no circuito.

A equação (4.10) é estabelecida no gráfico da figura 4.6 no ponto P , ponto de funcionamento. Nesse ponto, aparece simultaneamente uma tensão indutiva V_L maior que a tensão V e uma tensão capacitiva V_c menor que a tensão V de alimentação. Entretanto, variando-se o valor da capacitância C , sob indutância, tensão e frequência do circuito constantes, altera-se a inclinação da curva do capacitor, gerando outros pontos de funcionamento conforme indica a figura 4.7

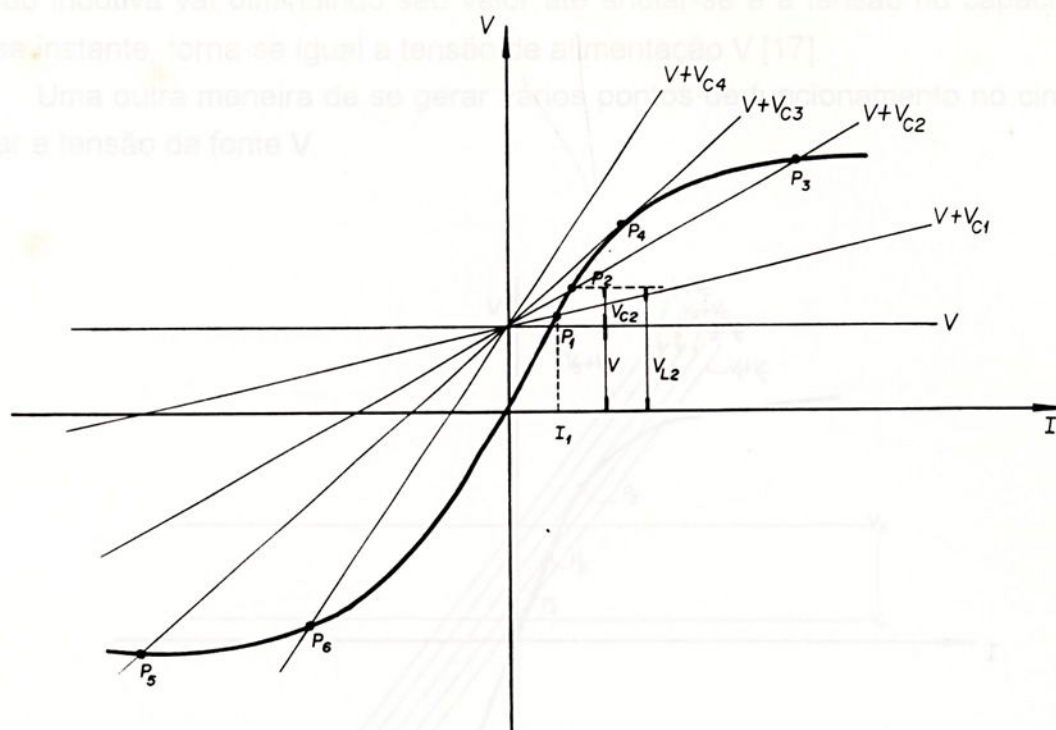


Figura 4.7 - Pontos de funcionamento variando o valor da capacitância C

Observa-se da figura 4.7 que, para grandes valores de capacitância a tensão V_L torna-se igual a tensão V da fonte.

Quando o valor da capacitância for C_1 , o ponto de funcionamento será P_1 , com uma corrente I_1 e uma tensão V_{L1} nos terminais do indutor. Diminuindo a capacitância, haverá um deslocamento do ponto de funcionamento para P_2 , com um aumento da corrente I e da tensão V_L . Decrescendo ainda mais a capacitância haverá uma limitação para o ponto de funcionamento, onde a característica do capacitor não intercepta a característica magnética do indutor e sim tangencia, indicada na figura 4.7 pelo ponto P_4 . Para valores de capacitâncias menores, não será possível nenhuma operação do circuito no primeiro quadrante de forma que o indutor continue recebendo corrente atrasada através da fonte e tensões positivas sobre o mesmo.

A operação do circuito passando a ser feita no terceiro quadrante, ponto P_6 , terá uma corrente I_6 com direção modificada, passando de uma corrente atrasada no primeiro quadrante para uma corrente adiantada de grandes valores e com tensões V_{L6} e V_{C6} também de valores elevados. Verifica-se assim, que quando o valor da capacitância é muito pequeno, o ponto de funcionamento muda para o ramo negativo da característica magnética, as tensões na indutância V_L e na capacitância V_C alteram seus valores e a medida que se diminui a capacitância, a

tensão indutiva vai diminuindo seu valor até anular-se e a tensão no capacitor V_C , nesse instante, torna-se igual a tensão de alimentação V [17].

Uma outra maneira de se gerar vários pontos de funcionamento no circuito é variar a tensão da fonte V .

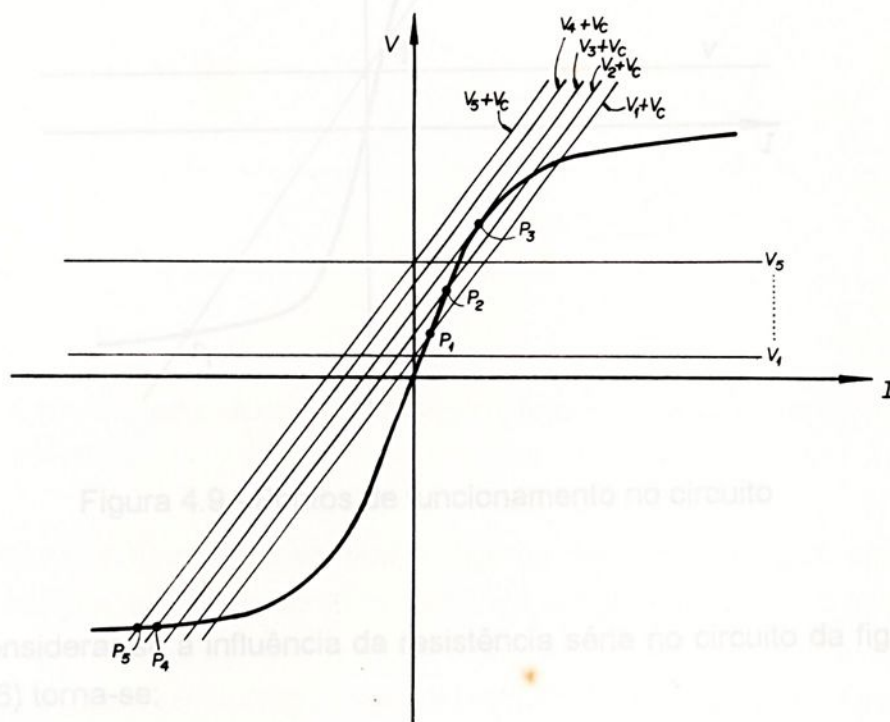


Figura 4.8 - Pontos de funcionamento variando a tensão da fonte V

Da figura 4.8 nota-se que para um acréscimo da tensão da fonte de V_2 para V_4 , o ponto de operação varia e subitamente, modifica-se do estado indutivo para o capacitivo, do primeiro quadrante para o terceiro quadrante, um salto que não é reversível se a tensão for diminuída. Como consequência, tem-se um aumento da corrente que circula no circuito.

Como já mencionado, a característica do capacitor pode também interceptar o ramo negativo da característica magnética, de forma que podem existir dois pontos estáveis e distintos de operação, um de baixa tensão e corrente atrasada, ponto P_2 , e outro de alta tensão e corrente adiantada, ponto P_1 , observado na figura 4.9. Qual desses pontos de operação pode ocorrer, depende do instante de chaveamento. Porém, pode ainda existir, um terceiro ponto de operação P_3 , de desempenho instável, como indicado na figura 4.9

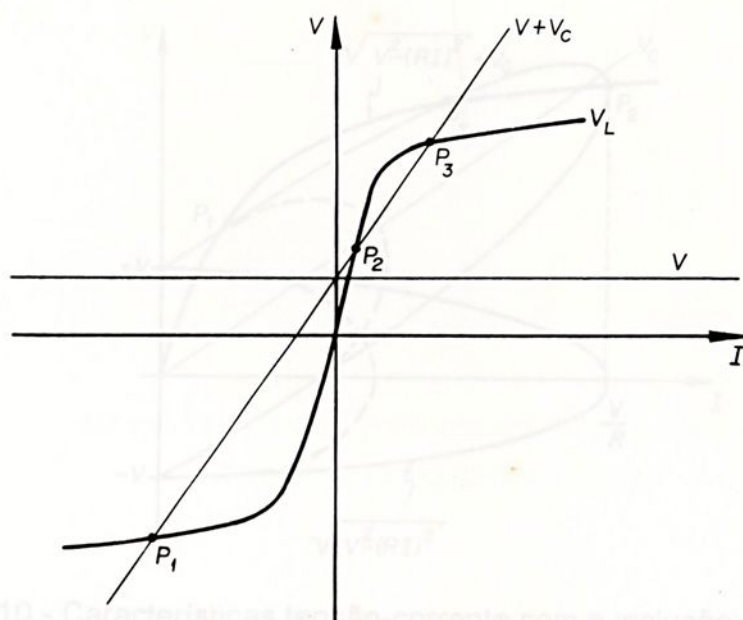


Figura 4.9 - Pontos de funcionamento no circuito

Ao considerar-se a influência da resistência série no circuito da figura 4.4, a equação (4.6) torna-se:

$$V = \sqrt{(V_L + V_C)^2 + (R \cdot I)^2} \quad (4.12)$$

de onde, após manipulações convenientes, se pode escrever que:

$$V_L = \omega \cdot f(I) = \sqrt{V^2 - (R \cdot I)^2} + \frac{I}{\omega \cdot C} \quad (4.13)$$

logo,

$$V_L = \omega \cdot f(I) = \sqrt{V^2 - (R \cdot I)^2} + V_C \quad (4.14)$$

A equação (4.14) é semelhante a equação (4.10), porém na equação (4.14) a tensão V_C é somada a uma função que representa uma elipse e na equação (4.10) a uma constante.

Da equação (4.14) pode-se montar o gráfico da figura 4.10

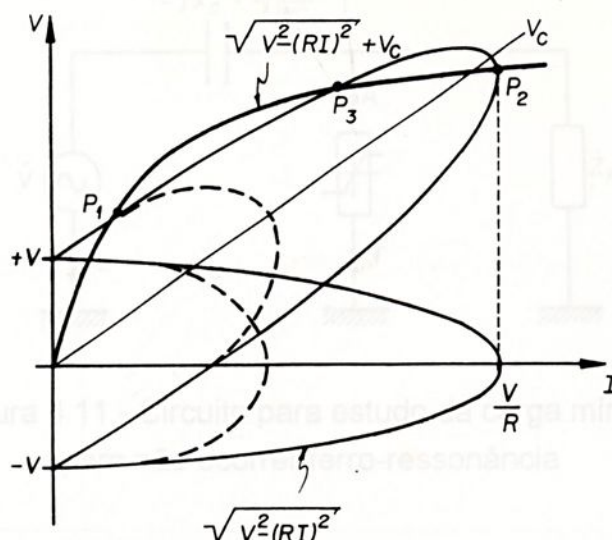


Figura 4.10 - Características tensão-corrente com a inclusão da resistência

Da figura 4.10 verifica-se que todas as três intersecções aparecem no primeiro quadrante, embora o ponto P2 pertença ao ramo negativo da característica. Os pontos de funcionamento P1 e P2 indicam pontos estáveis e distintos de operação e o ponto P3 um comportamento instável do circuito. Desta figura, nota-se ainda, que a utilização de valores pequenos de resistência pode proporcionar um efeito desprezível no ponto de funcionamento P1, operando com pequenas correntes e tensões, porém, no ponto de funcionamento P2 que pode operar com altas correntes e tensões, a resistência pode evitar um aumento excessivo de corrente e tensão no caso da aplicação de altos valores de capacitâncias. Por outro lado, como indicado pela elipse tracejada na figura 4.10, a inclusão de resistências de altos valores reduzirá a elipse, de modo que, o ponto de operação P2 pode ser eliminado. Desta forma, somente o ponto de operação P1 irá funcionar, com pequenas correntes e tensões.

Caso o fenômeno da ferro-ressonância seja observado no circuito, uma das maneiras de solucionar tal problema é a inserção de cargas no secundário do transformador. A seguir é apresentado o cálculo desta carga. Considere a figura 4.11.



Figura 4.12 - Circuito equivalente Thévenin

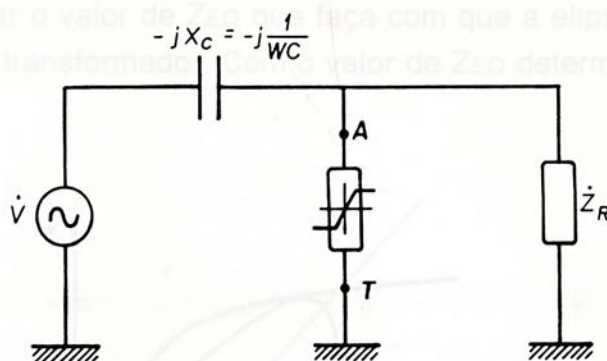


Figura 4.11 - Circuito para estudo da carga mínima para não ocorrer ferro-ressonância

Iniciar-se-á o estudo através de um circuito equivalente Thevènin. Calcula-se primeiro a impedância equivalente Thevènin, vista entre os pontos A e T.

$$\dot{Z}_{EQ} = \frac{-\dot{Z}_R \cdot j \frac{1}{\omega \cdot C}}{\dot{Z}_R - j \frac{1}{\omega \cdot C}} = \frac{\dot{Z}_R}{1 + j \dot{Z}_R \cdot \omega \cdot C} \quad (4.15)$$

Agora, para o cálculo da tensão Thevènin:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_R - j \frac{1}{\omega \cdot C}} \quad (4.17)$$

$$\dot{V}_{Th} = \dot{Z}_R \cdot \dot{I} = \dot{V} \cdot \frac{\dot{Z}_R}{\dot{Z}_R - j \frac{1}{\omega \cdot C}} = j \frac{\dot{V} \cdot \dot{Z}_R \cdot \omega \cdot C}{1 + j \dot{Z}_R \cdot \omega \cdot C} \quad (4.18)$$

$$\dot{V}_{Th} = j \dot{V} \cdot \dot{Z}_{EQ} \cdot \omega \cdot C \quad (4.16)$$

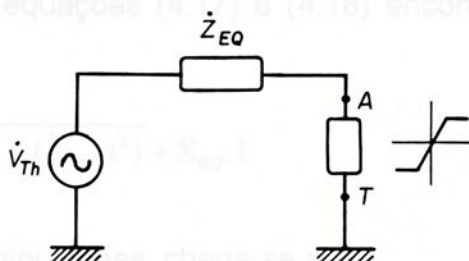


Figura 4.12 - Circuito equivalente Thevènin

Com esses dados conhecidos, monta-se o gráfico da figura 4.13, e a seguir procura-se determinar o valor de Z_{EQ} que faça com que a elipse tangencie a curva de magnetização do transformador. Com o valor de Z_{EQ} determinado, calcula-se Z_R mínimo.

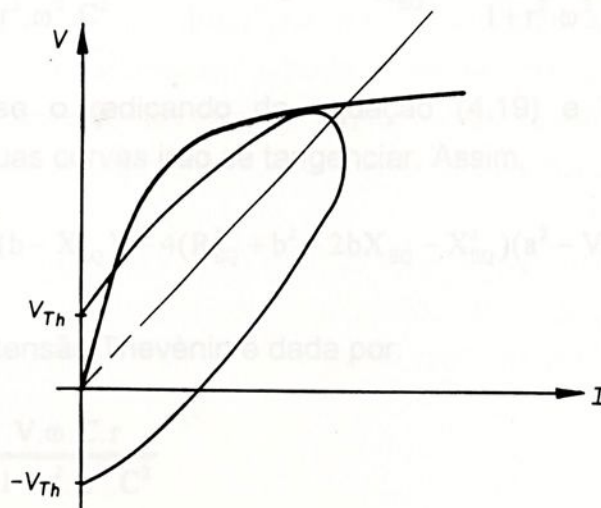


Figura 4.13 - Características para que não ocorra ferro-ressonância

Para o cálculo algébrico desse ponto, considere a impedância da carga Z_R constituída apenas de uma resistência r_L e a parte horizontal da curva de saturação do transformador dada pela equação:

$$V = a + b \cdot I \quad (4.17)$$

sendo a equação da elipse,

$$V = \sqrt{V_{Th}^2 - (R_{EQ} \cdot I)^2} + X_{EQ} \cdot I \quad (4.18)$$

onde R_{EQ} e X_{EQ} representam a parte real e imaginária de Z_{EQ} , respectivamente.

Da igualdade das equações (4.17) e (4.18) encontra-se os dois pontos de funcionamento. Logo:

$$a + b \cdot I = \sqrt{V_{Th}^2 - (R_{EQ} \cdot I)^2} + X_{EQ} \cdot I$$

Após, algumas manipulações, chega-se a:

$$I^2(R_{EQ}^2 + b^2 - 2bX_{EQ} - X_{EQ}^2) + I[2a(b - X_{EQ})] + (a^2 - V_{Th}^2) = 0 \quad (4.19)$$

Sabe-se da equação (4.15), que os valores de R_{EQ} e X_{EQ} são iguais a:

$$R = \frac{r}{1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} \quad \text{e} \quad X_{EQ} = -\frac{r^2 \cdot \omega \cdot C}{1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} \quad (4.20)$$

Encontrando-se o radicando da equação (4.19) e o igualando a zero, garante-se que as duas curvas irão se tangenciar. Assim,

$$\Delta = 4a^2(b - X_{EQ})^2 - 4(R_{EQ}^2 + b^2 - 2bX_{EQ} - X_{EQ}^2)(a^2 - V_{Th}^2) = 0$$

O módulo da tensão Thevenin é dada por:

$$V_{Th} = \frac{V \cdot \omega \cdot C \cdot r}{\sqrt{1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2}}$$

portanto, tem-se:

$$4a^2 \left[b - \left(\frac{r^2 \cdot \omega \cdot C}{1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} \right) \right]^2 - 4 \left[\frac{r^2}{(1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)^2} + b^2 - 2b \frac{r^2 \cdot \omega \cdot C}{1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} - \frac{r^4 \cdot \omega^2 \cdot C^2}{(1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)^2} \right] \cdot \left[a^2 - \frac{V^2 \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2}{1 + r^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2} \right] = 0 \quad (4.21)$$

Na equação (4.21) todos os termos têm seus valores conhecidos com exceção da resistência "r" da carga, que pode ser desta forma calculada.



Figura 4.14 - Característica do sistema condutor isolado - transformador abaixador

Verifica-se da figura 4.14 que poderá ocorrer ferro-ressonância no sistema, caso o transformador fique à vazia. Para se tentar evitar tal condição, calcular-se-á a carga mínima que deve ficar ligada permanentemente no secundário do transformador, conforme descrito anteriormente. Utilizando-se a equação (4.21) e

4.4 APLICAÇÃO DO ESTUDO DA FERRO-RESSONÂNCIA NO SISTEMA COMPOSTO PELO CONDUTOR ISOLADO E TRANSFORMADOR ABAIXADOR

A configuração indicada pela figura 4.4, representa o sistema composto de condutor isolado e transformador abaixador, se não existir nenhuma carga ligada ao terminal secundário do transformador. A fonte de tensão seria a tensão induzida no condutor isolado e a capacitância, a de Thevenin, vista do condutor isolado. Vê-se portanto, que neste sistema existe a possibilidade da ocorrência do problema ferro-ressonância.

Com os elementos mais típicos para esse sistema, far-se-á uma análise da curva de saturação de um transformador monofásico de relação 23000:230 V, com a capacitância Thevenin encontrada no sistema de transmissão B, que referida a 230 V fica igual a 0,8286 mF.

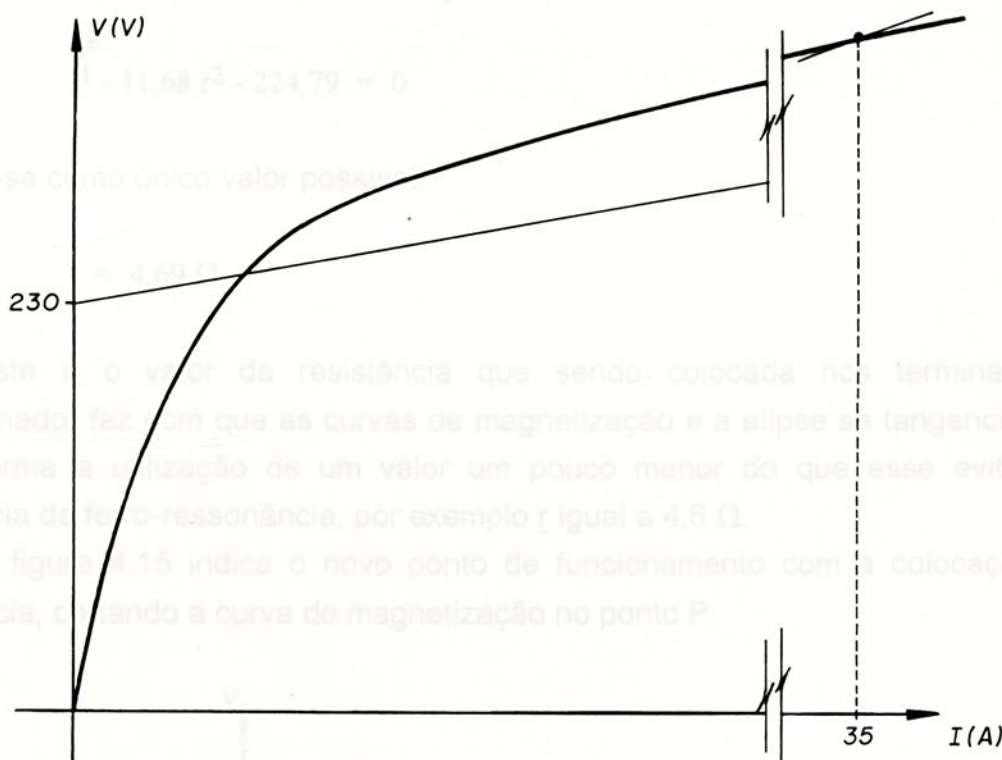


Figura 4.14 - Característica do sistema condutor isolado - transformador abaixador

Verifica-se da figura 4.14 que poderá ocorrer ferro-ressonância no sistema, caso o transformador fique à vazia. Para se tentar evitar tal condição, calcular-se-á a carga mínima que deve ficar ligada permanentemente no secundário do transformador, conforme descrito anteriormente. Utilizando-se a equação (4.21) e

admitindo que a curva de saturação, na região sob estudo, pode ser representada como uma reta paralela ao eixo das abscissas com os seguintes valores:

$$a = 400 \quad e \quad b = 0$$

logo,

$$V = 400$$

portanto, tem-se:

$$4 \cdot (400)^2 \left[0 - \left(\frac{r^2 \cdot 377 \cdot 0,8286 \cdot 10^{-3}}{1 + r^2 \cdot 377^2 \cdot (0,8286 \cdot 10^{-3})^2} \right) \right]^2 - 4 \left[\frac{r^2}{[1 + r^2 \cdot 377^2 \cdot (0,8286 \cdot 10^{-3})^2]^2} - \frac{r^4 \cdot 377^2 \cdot (0,8286 \cdot 10^{-3})^2}{[1 + r^2 \cdot 377^2 \cdot (0,8286 \cdot 10^{-3})^2]^2} \right] \cdot \left[400^2 - \frac{(273,4)^2 \cdot r^2 \cdot 377^2 \cdot (0,8286 \cdot 10^{-3})^2}{[1 + r^2 \cdot 377^2 \cdot (0,8286 \cdot 10^{-3})^2]^2} \right] = 0$$

manipulando-se convenientemente chega-se a:

$$r^4 - 11,68 \cdot r^2 - 224,79 = 0$$

obtendo-se como único valor possível,

$$r = 4,69 \, \Omega$$

Este é o valor da resistência que sendo colocada nos terminais do transformador faz com que as curvas de magnetização e a elipse se tangenciem, e desta forma a utilização de um valor um pouco menor do que esse evitará a ocorrência da ferro-ressonância, por exemplo r igual a $4,6 \, \Omega$.

A figura 4.15 indica o novo ponto de funcionamento com a colocação da resistência, cortando a curva de magnetização no ponto P.

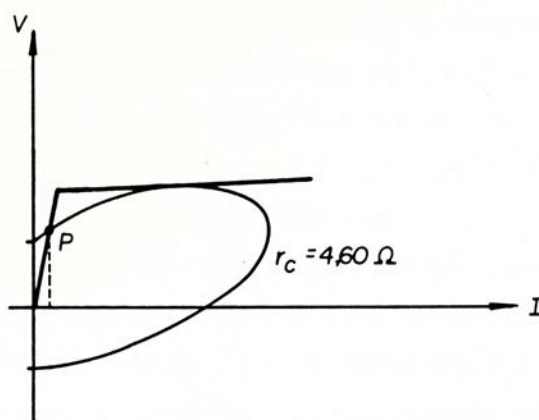


Figura 4.15 - Ponto de funcionamento do transformador

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

CAPÍTULO 5**CONCLUSÕES GERAIS**

As dificuldades que as grandes nações enfrentam de tempos em tempos com a aplicação de procedimentos para o uso racional de energia elétrica, é preocupação, também no Brasil, já há algum tempo. Não basta apenas impor leis, decretos, resoluções e portarias para solução desse problema, é preciso ir além, como por exemplo, investir em programas educacionais que atinjam a população, principalmente crianças e adolescentes, para a médio prazo colher resultados dessa iniciativa.

A conscientização sobre os meios racionais de se utilizar energia elétrica deve ser realizada de tal forma que, cada cidadão tenha seu direito de cidadania resgatado e respeitado por todos, particularmente, pelos órgãos governamentais, momento em que toda educação investida neste sentido resultará em atitudes coerentes e firmes, fluídas naturalmente de dentro para fora em cada cidadão.

A Eletrobrás com a participação de algumas concessionárias do setor de energia elétrica, iniciaram um projeto educativo nas escolas de primeiro grau no país. É levado ao jovem estudante informações básicas e essenciais sobre a melhor forma de se racionalizar o uso de energia elétrica nas várias atividades de seu cotidiano, como também, são programadas visitas a diversos setores dentro das próprias empresas de energia elétrica, entre outros. Tal medida vem despertando muito interesse pelos alunos, e o que é muito mais importante, estes estão assimilando o aprendizado, colocando em prática as informações recebidas. Percebe-se que muito há ainda por fazer, porém, a pequena semente foi plantada para em um futuro bem próximo serem colhidos seus frutos.

Embora exista grande desperdício de energia elétrica no Brasil, desde sua geração até o consumo, que é da ordem de 15% do total produzido nas usinas, existem inúmeros lugares espalhados pelo interior do país que estão totalmente desprovidos de benefício do uso de energia elétrica, apesar de estarem, muitas vezes, próximos das rotas das linhas de transmissão de energia elétrica.

A fonte alternativa de energia elétrica obtida através de indução eletrostática entre linha de transmissão e condutor isolado, poderá suprir de energia elétrica essas longínquas vilas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

As dificuldades que as grandes nações enfrentam de tempos em tempos com a aplicação de procedimentos e metodologias para o uso racional de energia elétrica, é preocupação, também no Brasil, já há algum tempo. Não basta apenas impor leis, decretos, resoluções e portarias para solução desse problema, é preciso ir além, como por exemplo, investir em programas educacionais que atinjam a população, principalmente crianças e adolescentes, para a médio prazo colher resultados dessa iniciativa.

A conscientização sobre os meios racionais de se utilizar energia elétrica deve ser resultado de intensas campanhas nacionais sobre o tema, de tal forma que, cada cidadão tenha seu direito de cidadania resgatado e respeitado por todos, particularmente, pelos órgãos governamentais, momento em que toda educação investida neste sentido resultará em atitudes coerentes e firmes fluidas naturalmente de dentro para fora em cada cidadão.

A Eletrobrás com a participação de algumas concessionárias do setor de energia elétrica, iniciaram um projeto educativo nas escolas de primeiro grau no país. É levado ao jovem estudante informações básicas e essenciais sobre a melhor forma de se racionalizar o uso de energia elétrica nas várias atividades de seu cotidiano, como também, são programadas visitas a diversos setores dentro das próprias empresas de energia elétrica, entre outros. Tal medida, vem despertando muito interesse pelos alunos, e o que é muito mais importante, estes estão assimilando o aprendizado, colocando em prática as informações recebidas. Percebe-se que muito há ainda por fazer, porém, a pequena semente foi plantada para em um futuro bem próximo serem colhidos seus frutos.

Embora exista grande desperdício de energia elétrica no Brasil, desde sua geração até o consumo, que é da ordem de 18% do total produzido nas usinas, existem inúmeros lugarejos espalhados pelo interior do país que estão totalmente desprovidos do benefício do uso da energia elétrica, apesar de estarem, muitas vezes, próximos das rotas das linhas de transmissão de energia elétrica.

A fonte alternativa de energia elétrica obtida através de indução eletrostática entre linha de transmissão e condutor isolado, poderá suprir de energia elétrica essas longínquas vilas.

Esta técnica de derivação de potência, apesar de não receber até o momento, uma atenção mais específica e merecida, mostrou-se altamente adequada sob o ponto de vista técnico e econômico. Foi demonstrado, que os níveis finais de potência derivada encontram-se na faixa de algumas dezenas de quilowatts, que de certa forma, impõe um aspecto restritivo quando se tratar do suprimento de grandes cargas, porém, não é o caso da maioria das cargas localizadas no meio rural.

A regulação de tensão através de um circuito alimentador ressonante, LC, é talvez a técnica mais simples de obtê-la. A proposta de se utilizar uma relação de ressonância abaixo de 100%, mostrou-se altamente conveniente e a relação de ressonância de 70% foi a que melhor contribuiu para manter a qualidade da energia elétrica obtida e ainda reduzir os custos dos investimentos iniciais, pois o valor do indutor e o nível de isolamento do transformador diminuem face a relação de ressonância 100%.

O fenômeno da ferro-ressonância, possível de acontecer no circuito auxiliar de derivação de potência, uma vez que, aí estão contidos elementos resistivos, capacitivos e indutivos não lineares, foi abrangentemente estudado.

Como prevenção a esse fenômeno são inseridas e calculadas cargas ligadas no secundário do transformador. Em um sistema real, elaborou-se a simulação da carga mínima a ser obtida e fixada, resultando em uma carga mínima de $4,60 \Omega$, que está intimamente ligada com o valor do comprimento do condutor isolado, por causa da capacitância equivalente Thevenin, que depende desse comprimento.

Do apresentado, pode-se depreender que a estratégia de derivação de potência elétrica utilizando-se o efeito do acoplamento capacitivo entre linha de transmissão e condutor isolado poder ser perfeitamente realizada em futuros projetos de geração de energia de maneira não convencional, alimentando-se pequenas cargas, principalmente aquelas no meio rural.

As principais questões técnico/operacionais, isto é, a regulação de tensão e ferro-ressonância, que o circuito auxiliar composto de condutor isolado e transformador abaixador podem provocar, foram aqui amplamente discutidas e soluções propostas.

A participação e o envolvimento de concessionárias de energia e da própria Eletrobrás na montagem e operação de um projeto piloto, fazendo uso de linhas de transmissão em operação no país, deverá ser de fundamental importância para a obtenção de resultados no campo.



BIBLIOGRAFIA

- [1] YURENKOV, V. D. Feeding three-phase loads from ground wires on 220-750 kV. *Elektrichestvo*, n 7, p.65-70, 1965.
- [2] BERTHIAUME, R., BLAIS, R. Reliable supply tapped from the overhead ground wire on 735 kV transmission lines. *Electric power systems research*, n 1, p.117-119, 1977/78.
- [3] BLAIS, R., BERTHIAUME, R. Supplying laser and stroboscopic light beacons from the overhead ground wire on 735 kV transmission lines. *Transaction IEEE*, v.PAS-99, n 1, p.181-182, jan/fev 1980.
- [4] BERTHIAUME, R., BLAIS, R. Microwave repeater power supply tapped from the overhead ground wire on 735 kV transmission lines. *Transaction IEEE*, v.PAS-99, n 1, p.183-184, jan/fev 1980.
- [5] SIFUENTES, Fernando Llanos, ROJA, Ricardo Sánchez. Uso del acoplamiento electrostático para la alimentación de pequeñas cargas próximas a las líneas de transmisión de alta tensión. IX Conferência Latinoamericana de Electrificación Rural, Acapulco, v.IV-31, nov. 1981.
- [6] RODRIGUES, José Franciaco. Extração de pequenas potências por efeitos eletromagnéticos nas proximidades das linhas elétricas de alta tensão. Itajubá: EFEI, 1986. 182p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.
- [7] TORRES, Germano Lázaro. Análise de problemas típicos na extração de pequenas potências por efeitos eletromagnéticos nas proximidades das linhas elétricas de alta tensão. Itajubá: EFEI, 1986. 225p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.
- [8] CHAVES, Marcelo Lynce Ribeiro. Uma contribuição ao estudo de utilização de técnicas não convencionais para o suprimento de pequenas cargas nas proximidades das linhas de transmissão em alta tensão. Campinas: UNICAMP, 1995. 285p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- [9] ACERBI, Mucio Ricardo Caleiro. Captação de energia elétrica através do acoplamento capacitivo das linhas aéreas de transmissão. Uberlândia: UFU, 1995. 278p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, 1995.
- [10] RODRIGUES, José Franciaco. Uma contribuição ao estudo de estratégia de derivação de potência elétrica para suprimento de pequenas cargas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] YURENKOV, V. D. Feeding three-phase loads from ground wires on 220-750 kV. **Elektrichestvo.**, n.7, p.65-70, 1965.
- [2] BERTHIAUME, R., BLAIS, R. Reliable supply tapped from the overhead ground wire on 735 kV transmission lines. **Electric power systems research.**, n.1, p.117-119, 1977/78.
- [3] BLAIS, R., BERTHIAUME, R. Supplying fixed and stroboscopic light beacons from the overhead ground wire on 735 kV transmission lines. **Transaction IEEE.**, v.PAS-99, n.1, p.181-182, jan/fev.1980.
- [4] BERTHIAUME, R., BLAIS, R. Microwave repeater power supply tapped from the overhead ground wire on 735 kV transmission lines. **Transaction IEEE.**, v.PAS-99, n.1, p.183-184, jan/fev.1980.
- [5] SIFUENTES, Fernando Llanos., ROJA, Ricardo Sánchez. Uso del acoplamiento electrostático para lá alimentacion de pequeñas cargas proximas a las líneas de transmisión de alta tensión. **IX Conferência Latinoamericana de Electrificación Rural.**, Acapulco, v.IV-31, nov. 1981.
- [6] RODRIGUES, José Francisco. **Extração de pequenas potências por efeitos eletromagnéticos nas proximidades das linhas elétricas de alta tensão.** Itajubá: EFEI, 1985. 182p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 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.** Itajubá: EFEI, 1986. 225p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1986.
- [8] CHAVES, Marcelo Lynce Ribeiro. **Uma contribuição ao estudo de utilização de técnicas não convencionais para o suprimento de pequenas cargas nas proximidades das linhas de transmissão em alta tensão.** Campinas: UNICAMP, 1995. 285p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, 1995.
- [9] ACERBI, Mucio Ricardo Caleiro. **Captação de energia elétrica através do acoplamento capacitivo das linhas aéreas de transmissão.** Uberlândia: UFU, 1995. 278p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, 1995.
- [10] RODRIGUES, José Francisco. **Uma contribuição ao estudo de estratégia de derivação de potência elétrica para suprimento de pequenas cargas.**

Campinas: UNICAMP, 1993. 200p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, 1993.

- [11] RODRIGUES, J. F., DE OLIVEIRA, J. C., PISSOLATO FILHO, J. Avaliação e controle dos principais parâmetros envolvidos na extração de potência de linhas de transmissão através de indução eletromagnética. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 9, 1992, Vitória. **Anais...** Vitória: UFES, 1992. p.1024-1029.
- [12] FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de energia elétrica - linhas aéreas.** 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1979. 588p.
- [13] CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. **Bell system tech-jour.**, New York, v.5, p.539-555, oct.1926.
- [14] NUNES, Renato de Aquino Faria. **Transmissão de energia elétrica: teoria modal de propagação.** Itajubá: EFEI, 1982, (Notas de Aula).
- [15] DEWAN, S. B., STRAUGHEN, A. **Power semiconductor circuits.** N.Y.: A Wiley - Interscience Publication, 1975. p.155-174.
- [16] MILLER, T. J. E. **Reactive power control in electric systems.** New York: John Wiley & Sons, 1982, cap.4.
- [17] RUDENBERG, R. **Transient performance of electric power systems: phenomena in lumped networks.** Cambridge - Mit Press, 1970. p.642-656.
- [18] WESTINGHOUSE ELECTRICAL CORPORATION. **Electrical transmission and distribution reference book.** East Pittsburg, PA, 1964.

N.º 683

BIBLIOTECA - UNESP
CAMPUS DE BAURÃO





0810000683

