



MODELAGEM DE ARCO ELÉTRICO NO AR.
APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Alessandra de Sá e Benevides Câmara

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Carlos Manuel de Jesus Cruz de
Medeiros Portela

Rio de Janeiro
Novembro de 2010

MODELAGEM DE ARCO ELÉTRICO NO AR.
APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Alessandra de Sá e Benevides Câmara

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela, D.Sc.

Prof. Edson Hirokazu Watanabe, D.Eng.

Prof. Glauco Nery Taranto, Ph.D.

Prof^a. Maria Cristina Dias Tavares, D.Sc

Prof. Silvério Visacro Filho, D.Sc.

Prof. Edson Guedes da Costa, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

NOVEMBRO DE 2010

Câmara, Alessandra de Sá e Benevides

Modelagem do Arco Elétrico. Aplicações em Sistemas de Potência / Alessandra de Sá e Benevides Câmara: UFRJ/COPPE, 2010

XVIII, 332 p. : IL. ; 29,7 cm

Orientador : Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Tese (doutorado) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2010

Referências Bibliográficas : p. 118-122

1. Arco Elétrico. 2. Extinção do Arco Secundário. 3. Religamento Monofásico. 4. Linha não-convencional. I. Câmara, Alessandra de Sá e Benevides. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título

DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho ao Prof. Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela.
(In Memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para esse trabalho, apoiando com todo tipo de aporte e interação – desde incentivo, passando por autorizações, sugestões e a realização dedicada de suas tarefas.

Agradeço aos meus familiares e amigos que tão bem compreenderam minhas constantes ausências.

Agradeço, especialmente, ao Prof. Carlos Portela, por sua dedicação, pelas longas conversas, onde além de conhecimento se estimulava o pensamento. A última vez que o vi foi no dia da defesa desse trabalho. A última vez que conversamos foi alguns dias depois e não tive a chance de agradecê-lo por tudo : pela dedicação, pelos ensinamentos e acima de tudo pela confiança ... e exemplo. Foi uma convivência que durou cerca de 10 anos na história da minha vida, mas cuja fonte de inspiração e transformação é “barra infinita”. Gratidão Eterna, Mestre !

O Sentido Oculto das Cousas

*O mistério das cousas, onde está ele?
Onde está ele que não aparece
Pelo menos a mostrar-nos que é mistério?
Que sabe o rio disso e que sabe a árvore?
E eu, que não sou mais do que eles, que sei disso?
Sempre que olho para as cousas e penso no que os homens pensam delas,
Rio como um regato que soa fresco numa pedra.*

*Porque o único sentido oculto das cousas
É elas não terem sentido oculto nenhum,
É mais estranho do que todas as estranhezas
E do que os sonhos de todos os poetas
E os pensamentos de todos os filósofos,
Que as cousas sejam realmente o que parecem ser
E não haja nada que compreender.*

*Sim, eis o que os meus sentidos aprenderam sozinhos: –
As cousas não têm significação: têm existência.
As cousas são o único sentido oculto das cousas.*

*O Guardador de Rebanhos
Alberto Caeiro*

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

MODELAGEM DO ARCO ELÉTRICO.
APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE POTÊNCIA.

Alessandra de Sá e Benevides Câmara

Novembro/2010

Orientador: Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Programa: Engenharia Elétrica

O presente trabalho tem por foco o estudo e a modelagem do comportamento do arco elétrico no ar, principalmente no que tange ao fenômeno do arco secundário e os aspectos mais relevantes quanto à sua extinção, incluindo a interação arco-rede. A extinção do arco secundário é condição de referência para que se garanta o sucesso da manobra de religamento monofásico.

Dessa forma, são apresentadas sugestões para o desenvolvimento de estudos para implementação do religamento monofásico, considerando-o inclusive ainda nas etapas de definição das características construtivas da linha.

Destaca-se o desenvolvimento de um modelo para o comportamento dinâmico do arco elétrico do tipo “caixa-cinzenta”, cujo ajuste e definição dos parâmetros têm por base dados obtidos de uma pesquisa em vãos de linha de 500 kV, especialmente construídos para esse propósito.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ELECTRIC ARC MODELLING. APPLICATIONS ON POWER SYSTEMS.

Alessandra de Sá e Benevides Camara

November/2010

Advisor: Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Department: Electrical Engineering

This work focus on study and modelling of the electric arc in air behavior, mainly related to the secondary arc phenomenom and its most important aspects, considering its extinction time and including the arc-grid interaction. Secondary arc extinction is reference condition to assure the single-phase switching success.

Suggestions are presented for development of single-phase switching implementation studies, including to consider it in early stages of the transmission line basic characteristics design.

The main topic developed in the present thesis is the study of a "gray-box" model for the electric arc dynamic behavior, which parameters adjustment and definition are based on experimental data obtained from a research , using actual 500 kV line spans specially built for the experiments.

Sumário

Capítulo 1	
INTRODUÇÃO	01
1.1. Motivação	03
1.2. Organização	04
1.3 Principais Contribuições do Trabalho	06
1.4. Publicações	07
Capítulo 2	
CONSIDERAÇÕES BÁSICAS SOBRE O ARCO SECUNDÁRIO E O RELIGAMENTO MONOFÁSICO	
08	
2.1. O Arco Elétrico em Sistemas de Potência	08
2.2. O Arco Secundário	09
2.3. Comportamento Básico do Arco	10
2.4. Fenômenos Físicos Básicos	11
2.4.1. Processos de Ionização e Recombinação	11
2.4.2 Distribuição de Temperatura no Arco	13
2.4.3. Extinção Térmica / Dielétrica	15
2.5. Dispositivos e Métodos para Facilitar a Extinção do Arco Secundário	16
2.6. Análise quanto à Extinção do Arco Secundário	19
Capítulo 3	
LINHAS DE TRANSMISSÃO PROJETADAS CONSIDERANDO O RELIGAMENTO MONOFÁSICO	
23	
3.1. Definição das Características Básicas de uma LT com Religamento Monofásico	23
3.1.1. Critérios Adicionais na Definição do Feixe de Condutores de uma LT considerando o Religamento Monofásico	25
3.1.2. Exemplo de aplicação da metodologia proposta para inclusão do religamento monofásico e otimização da compensação em derivação, na determinação das características construtivas básicas de LT's	29
3.2. Estudos de Regime Transitório para implementação de Religamento Monofásico	38
3.2.1. Critérios de estudo tradicionalmente utilizados	39
3.2.1.(a) – Critérios Gerais de Análise	40
3.2.1.(b) – Descrição e Análise de Casos Simulados	40
3.2.1.(c) – Conclusões	52
3.3. Linhas Não-Convencionais e o Religamento Monofásico	53
3.3.1. Transmissão em Muito Longa Distância : A Meia-Onda+ e o Religamento Monofásico	54

Capítulo 4	
MODELAGEM DO ARCO ELÉTRICO	64
4.1. Principais Modelos de Representação do Arco	64
4.2. Apresentação do Modelo de Arco Elétrico Analisado	66
4.2.1. Modelo "Caixa-Cinzenta"	66
4.2.2. Modelo Utilizado	67
4.2.2.(a) Característica Estacionária	69
4.2.2.(b) Comportamento Incremental do Arco	70
4.2.2.(c) Comportamento Dinâmico do Arco	70
Capítulo 5	
AJUSTE E VALIDAÇÃO DO MODELO DE ARCO ELÉTRICO COM DUAS	
CONSTANTES DE TEMPO	73
5.1. Utilização de dados experimentais: pesquisa “Modelagem de Arco	
Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico “	73
5.1.1. Condicionamentos básicos dos aspectos laboratoriais do projeto ..	77
5.1.1.(a) Descrição da Primeira Fase de Ensaios	78
5.2. Análise do Comportamento do Arco Elétrico a partir de dados	
experimentais	81
5.2.1. Comportamento Quasi-Estacionário	81
5.2.1.(a) Alongamento do Arco	81
5.2.2.(b) Procedimentos para cálculo do alongamento do arco ...	83
5.2.1.(c) Definição da Característica Estática	88
5.2.2. Comportamento Dinâmico do Arco Elétrico	93
Capítulo 6	
CONCLUSÕES	114
Referência Bibliográfica	118

ANEXO 1

Exemplo do Capítulo 3 :Parâmetros Unitários em função da frequência da linha de transmissão LNC1 e demais cálculos e gráficos associados ao exemplo

ANEXO 2

Anexo 2-1: Levantamento do Pior Ponto de Defeito

Anexo 2-2: Tensão Restabelecimento Transitória x Corrente Arco Secundário (ANEEL: Critério 1)

Anexo 2-3 :Variação dos Reatores de Neutro

Anexo 2-4 :Oscilogramas

Anexo 2-5 :Resultados da Configuração Final

ANEXO 3

Texto sobre Transmissão em Muito Longa Distância

ANEXO 4

Anexo 4-1: Transitórios de Manobra de Linha para LT Hipotética entre Porto Velho e Araraquara (Meia-Onda)

Anexo 4-2: “Estimativa preliminar de gama plausível de impedância de curto-circuito dos autotransformadores ligados nos terminais das linhas de pouco mais de meia onda”, DT411 – P&D “Modelagem do Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico” (autor : Carlos Portela / COPPETEC), FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

ANEXO 5

Curvas relacionadas ao comportamento do arco no ar

ANEXO 6

Formulação da Impedância Incremental para Modelos de Arco

ANEXO 7

Imagens do ensaio 971

ANEXO 8

Cálculos das Constantes de Tempo do Arco a partir de dados experimentais

LISTA DE FIGURAS

	<i>Pág.</i>
2.2.(1) <i>Efeito da Componente Unidirecional no Arco Secundário</i>	9
2.2.(2) <i>Representação da LT por sucessão de quadripolos / Manobra Monofásica</i>	10
2.4.(1) <i>Caracterização da ionização para quatro tipos de gases distintos, em função do potencial de ionização e da temperatura</i>	13
2.5.(1) <i>Compensação em Derivação : Reator de 4-pernas</i>	17
3.1.(1) <i>Disposição Geométrica dos condutores da LT considerada (LNC1)</i>	30
3.1.(2) <i>Representação Esquemática da Transposição da LT</i>	30
3.1.(3) <i>Rede representada aos terminais da linha</i>	31
3.1.(4) <i>Condições de Operação relacionadas à Manobra Monofásica.....</i>	32
3.1.(5) <i>Representação do esquema de compensação em derivação escolhido.....</i>	37
3.2.(1) <i>Curva de referência para análise da extinção corrente de arco secundário, considerando-se tempo morto de 500 ms</i>	42
3.2.(2) <i>Curva de referência: tempo morto para extinção do arco secundário x valor eficaz da corrente de arco secundário, para tensões até 765 kV.....</i>	44
3.2.(3) <i>Representação Esquemática da LT sob manobra – Configuração Inicial e Final (Pós-seccionamento).....</i>	46
3.2.(4) <i>Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL - Contingência : Defeito Monofásico em TI - Ano 1- Variação dos Reatores de Neutro</i>	51
3.3.(1) <i>Ilustração da Disposição do Feixe de Condutores ao Meio do Vão.....</i>	57
3.3.(2) <i>Ilustração do Efeito da Injeção de Sinais de Corrente para promover a instabilidade (e extinção) do Arco Secundário.....</i>	62

3.3.(3)	<i>Ilustração do efeito da Injeção de Sinal de Corrente para promover a Extinção do Arco Secundário.....</i>	63
4.2.(1)	<i>Característica Estacionária para Arco no Ar (E (campo elétrico) , I (corrente) – Regiões de Cassie e Mayr.....</i>	69
4.2.(2)	<i>Representação esquemática do modelo de arco elétrico com dois sub-arcos de Thiel acoplados em paralelo</i>	71
5.1.(1)	<i>Apresentação simplificada do arranjo montado para os ensaios.....</i>	74
5.1.(2)	<i>Conclusão das montagens do primeiro vão.....</i>	75
5.1.(3)	<i>Segundo vão de linha em destaque</i>	76
5.1.(4)	<i>Ensaio em cadeia em “I”</i>	76
5.1.(5)	<i>Localização dos Ensaios</i>	78
5.1.(6)	<i>Circuito gerador de arco e correntes de impulso.....</i>	80
5.1.(7)	<i>Alocação das Câmera</i>	80
5.2.(1)	<i>Corrente e Tensão Sustentadas referentes ao Ensaio 971.....</i>	82
5.2.(2)	<i>Localização de: (A) ponto de aterramento no pé da torre de transmissão A 53, com coordenadas {0,0,0}; (B) e (C) pontos de contato da cadeia de suspensão em “I” com o condutor e a torre A53 ; (D) e (E) medidores de velocidade de vento 1 e 2; (F) , (G), (H) e (I) pontos de conexão dos divisores (medidores) de tensão; (J) e (K) pontos de contato da cadeia de suspensão em “V” com o cabo condutor e a torre A53; (L) e (M) pontos de contato entre a cadeia de ancoragem com o cabo condutor e a torre D51; (N) posição de filmagem AT 04, com coordenadas: {74,5 , 2,5 , 1,3} e (O) posição de filmagem AP 02, com coordenadas: {2,5 , 92 , 1,3}. Dimensões dadas em metros</i>	82
5.2.1.(3)	<i>Aproximação da Característica Estacionária do Arco Elétrico.....</i>	83
5.2.1.(4)	<i>Característica Estacionária do Arco Elétrico – aproximação para corrente de 150 A</i>	84

5.2.1.(5) <i>Instantes iniciais do arco (arco tangenciando e se afastando, em seguida, da cadeia).....</i>	85
5.2.1.(6) <i>Arco em seu comprimento de referência.....</i>	86
5.2.1.(7) <i>Corrente de frequência industrial e sua pseudo primeira-harmônica (ensaio 971).....</i>	86
5.2.1.(8) <i>Tensão de arco e sua pseudo primeira-harmônica (ensaio 971).....</i>	87
5.2.1.(9) <i>Comportamento das pseudo-primeira-harmônicas de corrente e tensão e da variação do comprimento do arco (ensaio 971).....</i>	87
5.2.1.(10) <i>Alongamento do Arco ao longo do ensaio 971.....</i>	88
5.2.1.(11) <i>$U_a \times I_{60Hz}$, sem filtragem das medidas.....</i>	89
5.2.1.(12) <i>Capacitância média, em Farad, calculada para o ensaio 971.....</i>	90
5.2.1.(13) <i>Capacitância Média Unitária (F.m), calculada para o ensaio 971.....</i>	90
5.2.1.(14) <i>Capacitância Total e Unitária Médias(F.m), ensaio 971.....</i>	91
5.2.1.(15) <i>$U_a \times I_{60Hz}$, apenas com filtragem dos ruídos das medidas</i>	91
5.2.1.(16) <i>$u_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$)</i>	91
5.2.1.(17) <i>$e_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$) – Evolução da característica estática nos ciclos iniciais do arco elétrico</i>	92
5.2.1.(18) <i>$e_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$) – Evolução da característica estática nos últimos ciclos do arco elétrico.....</i>	92
5.2.2.(1) <i>Corrente Sustentada e de Impulso ao longo do intervalo de tempo referente aos dois primeiros impulsos aplicados no Ensaio 971.....</i>	93
5.2.2.(2) <i>Corrente de Arco no intervalo de tempo referente aos dois primeiros impulsos aplicados no Ensaio 971</i>	94
5.2.2.(3) <i>Destaque aos instantes de aplicação dos dois primeiros impulsos do Ensaio 971.....</i>	94

5.2.2.(4) $g(t)$ e $g(t) \times \ell(t)$ para o intervalo equivalente ao 1º impulso do ensaio 971.....	96
5.2.2.(5) <i>Correntes de Impulso – Ensaio 971</i>	97
5.2.2.(6) <i>Corrente Sustentada – Ensaio 971</i>	98
5.2.2.(7) <i>Tensão na extremidade da cadeia junto ao condutor</i>	98
5.2.2.(8) <i>Tensão na extremidade da cadeia junto a torre</i>	99
5.2.2.(9) <i>Intervalo do 1º impulso do ensaio 971</i>	99
5.2.2.(10) <i>Destaque para frente do 1º impulso do ensaio 971</i>	100
5.2.2.(11) <i>Corrente de frequência industrial do ensaio 971</i>	101
5.2.2.(12) <i>Corrente de arco ao longo do intervalo do 1º impulso do ensaio 971</i>	101
5.2.2.(13) <i>Principais interferências observadas no intervalo do 1º impulso do ensaio 971</i>	102
5.2.2.(14) <i>Corrente sustentada, de impulso e de arco – variação de “p”</i>	103
5.2.2.(15) <i>Corrente e Tensão Filtradas para análise de comportamento dinâmico</i> ...	104
5.2.2.(16) $g_u(t)$ e $g_{cor_u}(t)$ nos 1 ms iniciais do impulso 1 do ensaio 971.....	105
5.2.2.(17) <i>Destaque de região da condutância referente à passagem por zero de corrente e tensão</i>	107
5.2.2.(18) <i>Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $g_{cor_u}(t)$, sem filtro</i>	108
5.2.2.(19) <i>Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $g_{cor_u}(t)$, com filtro $p = 50$</i>	108

5.2.2.(20) <i>Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 200$.....</i>	109
5.2.2.(21) <i>Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 450$.....</i>	109
5.2.2.(22) <i>Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 800$.....</i>	110
5.2.2.(23) <i>Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 1250$.....</i>	110
5.2.2.(24) <i>Comparação entre $gcor_u(t)$ calculado por aproximação da eq. (5.11) e “medido” ($\theta_1 = 2.8\mu s$ e θ_2 variável)</i>	112
5.2.2.(25) <i>Comparação entre $gcor_u(t)$ calculado por aproximação da eq. (4.11) e “medido” ($\theta_1 =$ variável e $\theta_2 = 10\mu s$)</i>	112
6.(1) <i>Representação esquemática do modelo de arco elétrico considerado.....</i>	117

LISTA DE TABELAS

	<i>Pág.</i>
3.1 <i>Resultados indicados pelo Critério 1</i>	34
3.2 <i>Impedância Equivalente de Thevenin em diferentes localidades ao longo da LT, considerando-a aberta monofasicamente em ambos os terminais</i>	35
3.3 <i>Condições Alternativas para Extinção de Arco Secundário</i>	44
3.4 <i>Corrente de Arco Secundário e Tensão Induzida nas Extremidades da Fase Aberta (Regime Permanente, Freqüência Fundamental (60 Hz))</i>	47
3.5 <i>Resultados dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Manobra de Energização de Linha</i>	58
3.6 <i>Resultados dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Manobra de Religamento Tripolar</i>	59
3.7 <i>Resultados dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Manobra de Rejeição de Carga</i>	60
3.8 <i>Tensão Induzida na Fase Aberta – Sem Defeito (ausência de arco)</i>	61
3.9 <i>Tensão Induzida na Fase Aberta e Corrente de Arco Secundário – Defeito em Locais Diferentes ao longo da linha (presença de arco secundário)</i>	61
5.1 <i>Constantes de Tempo observadas com o ensaio 971</i>	106

SIMBOLOGIA

$Abs[Z]$: módulo do número complexo Z

c_d : capacitância unitária de seqüência direta

c_h : capacitância unitária de seqüência homopolar

C_p : calor específico a pressão constante

E : o campo elétrico

g_o : valor da condutância residual

$Im[Z]$: parte imaginária do número complexo Z

K : condutividade térmica

K^* : condutividade térmica equivalente por turbulência

P : pressão

P_0 : potência total dissipada pelo arco

$Re[Z]$: parte real do número complexo Z

S_c : potência característica

T : temperatura absoluta

TRT : tensão de restabelecimento transitória

X/R : relação entre as partes imaginária e real de uma impedância; fator de qualidade.

y_d : admitância transversal unitária de seqüência direta

y_h : admitância transversal unitária de seqüência homopolar

z_d : impedância longitudinal unitária de seqüência direta

z_h : impedância longitudinal unitária de seqüência homopolar

z_c : impedância característica

ρ : densidade

\bar{v} : velocidade

i : $\sqrt{-1}$

i : Corrente [A]

CAPÍTULO 1

Introdução

Estatisticamente, observa-se que a grande maioria das falhas em linhas de transmissão está associada a curtos-circuitos monofásicos, de caráter não-permanente, variando de 70% a cerca de 90%, sendo tão mais alto esse percentual quanto maior o nível de tensão. Em certas condições, como no caso de redes de neutro isolado ou ligadas à terra por algum dispositivo, ocorre a extinção natural do arco, sem a necessidade de qualquer manobra ou dispositivo especial.

Entretanto, no caso de redes de neutro “efetivamente aterrado”, na maioria dos casos o arco elétrico não se extingue naturalmente, havendo necessidade de efetuar manobras para eliminar o defeito e retornar à condição normal de operação da linha. São viáveis, consoante condições específicas, diversos tipos de soluções.

Em algumas condições, há uma probabilidade elevada de extinção do curto-circuito com a abertura apenas da fase afetada, nas duas extremidades da linha. Com a abertura somente da fase defeituosa observa-se uma redução da corrente de arco a um valor razoavelmente moderado (arco secundário), assegurando elevada probabilidade de extinção num tempo curto, após o qual as duas extremidades dessa fase são religadas. O sucesso deste procedimento, exceto para linhas muito curtas, exige normalmente precauções específicas no sentido de reduzir a corrente de arco secundário e de evitar o reacendimento ou reignição do arco após a respectiva extinção. Há diversos tipos de procedimentos para conseguir o objetivo em causa, com domínios de aplicação específicos, sendo o mais comum o uso de reatores de neutro, no caso de linhas com compensação em derivação.

A vantagem básica deste procedimento, conhecido como religamento monofásico (ou monopolar) é manter em operação duas das fases da linha, durante a abertura da fase afetada, limitando as perturbações na rede.

Outro tipo de procedimento, no sentido de extinguir o defeito, é a abertura das três fases da linha, mantendo a abertura durante um tempo relativamente curto, associado à extinção do regime transitório, subsequente à abertura. Em alguns casos, tal tempo deve ser aumentado, evitando probabilidade significativa do religamento da linha originar um novo curto-circuito ou danos em equipamentos.

Com este procedimento, durante a abertura a linha é interrompida com uma perturbação da rede mais severa que a causada pela abertura e religamento monofásico, o que, eventualmente, pode impedir o religamento trifásico rápido, por exemplo, em virtude da abertura trifásica originar defasagem excessiva entre as tensões nos barramentos interligados pela linha.

Sendo assim, a utilização de religamento trifásico em redes de transmissão pouco malhadas e com linhas longas, características observadas em boa parte do sistema elétrico brasileiro, pode representar sérios riscos no que se refere à estabilidade, tanto eletromecânica quanto de tensão, seja pela simples abertura trifásica, seja pela necessidade de um tempo de abertura relativamente longo a fim de se evitar sobretensões elevadas quando do religamento.

O religamento trifásico sem sucesso, rápido ou não, ou seja, sem extinção do defeito durante a abertura da linha, pode levar ainda a consequências desastrosas para o sistema, com a propagação do defeito em efeito cascata.

Em síntese, a utilização da manobra trifásica pode representar uma fonte de perturbação tal que, conforme as características de grande número de sub-sistemas de transmissão da rede brasileira, seus efeitos podem ser traduzidos em impactos negativos na estabilidade e confiabilidade do sistema.

Em contrapartida, para utilização de religamento monofásico busca-se meios de se garantir o sucesso da manobra dentro dos limites apontados em estudos de estabilidade, através de esquemas de operação associados a determinados dispositivos, caso estudos apontem que estes sejam necessários. O emprego de tais dispositivos se deve à necessidade de se assegurar a extinção do chamado arco secundário, dentro do tempo morto pré-estabelecido de acordo com os estudos de rede (estabilidade).

A manobra do religamento monofásico se caracteriza pela abertura das extremidades da fase sob falta, onde a corrente de falta (da ordem de kA) dá lugar a uma corrente (arco secundário) devido ao acoplamento entre fases. Para as configurações de linhas de transmissão usuais, tal corrente de arco secundário varia de algumas dezenas a poucas centenas de Amperes, e deverá estar extinta antes do religamento. Dessa forma, na manobra monofásica as principais grandezas a serem analisadas se referem basicamente àquelas associadas ao fenômeno de indução entre fases, ou seja, tensão e corrente nas extremidades e ao longo da linha, além do comportamento do arco secundário. Obviamente, para os casos em que se faz necessária a utilização de

equipamentos adicionais, deverão também ser analisadas as solicitações elétricas impostas a estes equipamentos.

O emprego de religamento monofásico se justifica na sua essência pela própria natureza do tipo de defeito que se pretende eliminar, e as vantagens diretas de sua utilização são percebidas principalmente como consequência da continuidade parcial do fornecimento, que implica ainda em efeitos positivos sob aspectos dinâmicos, de estabilidade eletromecânica e de tensão, confiabilidade e flexibilidade operacional.

1.1. Motivação

Ainda que haja consenso quanto à utilização do religamento monofásico no setor elétrico brasileiro, os estudos relacionados à sua aplicação esbarram na dificuldade de se avaliar com precisão o fenômeno mais importante no processo da manobra monofásica - *a extinção do arco secundário*.

As formas mais usuais de análise tendem a ser conservativas, imprecisas, e uma vez que desses estudos podem surgir indicações de dispositivos adicionais a serem empregados na linha de transmissão, pode-se dizer que a imprecisão dos estudos, além de carregar um risco inerente de conclusões equivocadas, no caso da aquisição de equipamentos superdimensionados, representa também a apresentação de uma demanda equivocada aos custos do empreendimento.

A dificuldade de estabelecer uma metodologia genérica e simples para análise do arco secundário resulta, fundamentalmente, do seguinte:

- ◆ Número de fenômenos envolvidos de importância “similar” bastante elevado.
- ◆ Vários dos fenômenos em jogo têm constantes de tempo da mesma ordem de grandeza.

Por estas razões, tratamentos muito simplificados correm o risco de se afastarem substancialmente da realidade, ou de se aplicarem apenas a uma condição particular, a partir da qual as simplificações foram definidas.

Por exemplo, tem-se verificado, até para curto-circuitos no ar, num mesmo ponto de uma rede, com abertura e religamento monofásico, que, por vezes, o arco é “basicamente” estável, ocorrendo a extinção em virtude do alongamento gradual do seu

comprimento, e, outras vezes, mesmo antes de alongamento significativo, o arco é “basicamente” instável, ocorrendo extinções na vizinhança de passagens naturais da corrente por zero, mas sucedendo-se, em alguns casos, reignições.

Desta forma, um modelo razoável tem que considerar as condições de “instabilidade - estabilidade” intrínsecas, a reignição dielétrica e o alongamento do arco; para os dois primeiros aspectos, é essencial levar em conta o comportamento “transitório” da rede, vista aos terminais do arco, sendo totalmente inadequada a caracterização da rede apenas pelos seus parâmetros a frequência industrial.

O emprego de um modelo mais robusto e confiável do arco elétrico preenche a lacuna atualmente existente nos estudos relacionados ao religamento monofásico, sobretudo no que tange os estudos de regime transitório, onde se avalia, principalmente, a extinção do arco secundário.

Uma outra questão é o momento ao longo dos estudos de planejamento em que usualmente se desenvolvem as análises relacionadas à implementação do religamento monofásico. Tradicionalmente, o que se observa é a realização dos estudos em etapas posteriores ao dimensionamento da linha de transmissão. A inclusão de alguns parâmetros de análise ainda no dimensionamento dos feixes colaboraria para a especificação de LT's mais favoráveis ao religamento monofásico, desonerando inclusive os custos do projeto com eventuais dispositivos adicionais para promoção da extinção do arco.

Sendo assim, os objetivos que sintetizam as principais contribuições da elaboração do presente trabalho são: discorrer sobre a inclusão do religamento monofásico ainda nas etapas de concepção das características construtivas básicas da LT, e desenvolver um modelo de arco robusto e confiável, a ser empregado nos estudos relacionados à manobra em questão.

1.2. Organização

O trabalho encontra-se dividido em mais quatro capítulos principais, além desse introdutório. Os capítulos encontram-se subdivididos de acordo com assuntos correlatos ao seu tema principal, sintetizados a seguir :

- ◆ **Capítulo 2** : *Considerações Básicas sobre o Arco Secundário e o Religamento Monofásico.*

O Capítulo 2 apresenta conceitos básicos sobre o arco elétrico, o arco secundário no contexto do religamento monofásico, além de comentar sobre a extinção do arco secundário e dispositivos e métodos para assegurar o religamento monofásico com sucesso.

◆ **Capítulo 3** : *Linhas de Transmissão projetadas considerando o Religamento Monofásico.*

No Capítulo 3 o enfoque principal é a influência das características construtivas da LT, ou ainda, de seus parâmetros elétricos no religamento monofásico. Dessa forma, nesse capítulo é sugerida uma metodologia para inclusão de considerações sobre os principais parâmetros relacionados à manobra monofásica ainda na definição da disposição dos feixes de condutores de uma LT, agregando ainda a otimização da LT sob o enfoque das consideradas LT's não-convencionais. A conjugação de critérios relacionados ao religamento monofásico, compactação ou assimetria do feixe de condutores na otimização da configuração da LT retrata a evolução dos conceitos de dimensionamento de linhas de transmissão.

Também é apresentado um exemplo de estudo relacionado ao religamento monofásico, tal qual como se desenvolve atualmente na maioria das empresas do setor elétrico brasileiro, além de estudos considerando os conceitos aqui apresentados.

◆ **Capítulo 4** : *Modelagem do Arco Elétrico.*

Nesse capítulo é apresentado um modelo de arco elétrico, a ser sugerido e analisado, desde seus conceitos fundamentais até sua representação em termos de comportamentos estacionário e dinâmico.

O grande diferencial desse modelo com relação aos usualmente apresentados, e que o torna potencialmente mais robusto e confiável, é basicamente o fato de trabalhar com duas constantes de tempo. Assim, espera-se ter o arco melhor caracterizado, uma vez que se tem a representação de duas regiões principais bastante distintas, incluindo a interação entre elas.

◆ **Capítulo 5** : *Verificação e Validação do Modelo de Arco Elétrico com Duas Constantes de Tempo.*

No Capítulo 5 são desenvolvidos estudos relacionados ao comportamento do arco e ao ajuste dos parâmetros do modelo analisado, tendo por base os resultados experimentais de uma pesquisa em curso, dedicada exclusivamente ao assunto em tela.

Ainda que o tema central seja o religamento monofásico e a extinção do arco secundário, ressalta-se que cada capítulo aborda um assunto específico, tendo suas próprias conclusões.

Nos Anexos encontram-se informações consideradas relevantes mencionadas ao longo do trabalho e extraídas de algumas referências, além de resultados que porventura tenham sua apresentação sintetizada ou comentada em algum dos capítulos.

1.3. Principais Contribuições do Presente Trabalho

Neste trabalho destacam-se algumas idéias e conceitos apresentados, não só pelos “produtos” aqui ilustrados, mas pela gama de possibilidades a serem desenvolvidas a partir da exploração dessas idéias. Dessa forma, pode-se citar:

- ◆ A abordagem sobre as metodologias de análise da extinção do arco secundário, onde sugere-se a inclusão de parâmetros de análise ainda nas etapas de dimensionamento dos feixes de condutores das linhas de transmissão. Tradicionalmente, a questão da extinção do arco secundário é tratada posteriormente, somente nos estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra de linha, quando as características construtivas básicas do empreendimento já estão definidas, o que acaba por exigir, muitas vezes, o dimensionamento de equipamentos adicionais.
- ◆ A modelagem do arco elétrico adotada, onde o arco é representado por dois sub-arcos interagindo entre si, sintetizando o comportamento de pelo menos duas regiões de fenômenos com constantes de tempo bem distintas. Os modelos tradicionalmente adotados, com apenas uma constante de tempo, incorrem na valorização de apenas alguma gama de fenômeno predominante no ajuste de seus parâmetros. Para ajuste das constantes de tempo do modelo estudado, foram utilizados dados de ensaios laboratoriais, com vãos experimentais em tamanho real de uma linha de 500 kV típica do sistema brasileiro (FURNAS). Tais ensaios referem-se a um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento, envolvendo indústria (FURNAS), laboratório (CEPEL) e universidade (UFRJ e UNICAMP). O ineditismo dos ensaios demandou esforços conjuntos das entidades envolvidas na busca de soluções e adequações tal que se pudesse atender ao pretendido, envolvendo desde o desenvolvimento de metodologias de análise de dados e mesmo de execução experimental, até adaptações e alterações substanciais das instalações laboratoriais envolvidas, com

dispositivos e métodos especialmente desenvolvidos para obtenção, armazenamento e tratamento dos diversos tipos de dados manipulados. Dessa forma, a própria experiência na execução dos ensaios fomentou diversos subprodutos relacionados às práticas experimentais e metodologias de análise.

1.4. Publicações

Como parte das atividades desenvolvidas ao longo desse trabalho, inclui-se ainda a elaboração e participação em artigos, listados a seguir:

- ◆ “Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Some Basic Aspects on Main Elements Representation”, Camara, A.S.B., Portela, C. M., Tavares, M. C., International Conference on High Voltage Engineering and Application - ICHVE 2008, Chongqing, China, Novembro 9-13, 2008.
- ◆ “Single-phase autoreclosure studies considering a robust and reliable secondary arc model based on a gray-box model”, Camara, A.S.B., Portela, C. M., Tavares, M. C., ICHVE 2008, Chongqing, China.
- ◆ “Single-phase autoreclosure studies: secondary arc model research including a 500kV line experimental circuit”, Camara, A., Gonçalves, R., Portela, C., Rodrigues, M., Oliveira, O., Tavares, M. C., ICHVE 2008, Chongking, China.
- ◆ “Estudos de Religamento Monofásico – Pesquisa e Desenvolvimento de Modelo do Arco Secundário”, Portela, C., Camara, A., Gonçalves, R., Tavares, M. C., Oliveira, O., Rodrigues, M., XX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife (PE), 22 a 25 de Novembro, 2009 – **Trabalho Premiado (3º Lugar)**.
- ◆ “Secondary Arc Voltage and Current Harmonic Content for Field Tests Results”, Montanari, A. A., Tavares, M. C., Portela, C. M., Câmara, A., International Conference On Power System Transients - IPST09, Kyoto (Japão), Junho, 2009.
- ◆ “Conteúdo Harmônico de Corrente e Tensão de Arcos Elétricos Gerados Artificialmente em Ambiente Não-Confinado”, Tavares, M.C., Talysis, J., Portela, C., Camara, A., XVII Congresso Brasileiro de Automação (XVII CBA), 12 a 16 de setembro de 2010, Bonito, MS.

CAPÍTULO 2

Considerações Básicas sobre o Arco Secundário e o Religamento Monofásico

2.1. O Arco Elétrico em Sistemas de Potência

Conforme mencionado em [2], o arco elétrico se manifesta em sistemas de potência nas mais diversas formas, que para fins de estudo, podem ser classificados de maneira genérica em arcos de caráter aleatório e arcos associados a aplicações específicas.

Os arcos de caráter aleatório são aqueles relacionados a fenômenos naturais, podendo acarretar contingências com grande risco para o sistema. Dessa forma, podemos citar como seus representantes, as descargas atmosféricas, descargas no ar para a terra ou entre fases (devido a sobretensões ou deterioração do isolamento em cadeias de isoladores por contaminação, por exemplo), ou seja, fenômenos com alto grau de imprevisibilidade quanto à sua ocorrência.

Os arcos associados a aplicações específicas podem ser ilustrados por aqueles presentes na manobra ou atuação de dispositivos, tais como, disjuntores, centelhadores, pára-raios com “gap”, válvulas de mercúrio, lâmpadas de descargas em gases, eletrodos de fornos elétricos e etc.

Grande parte dos trabalhos de pesquisa existentes sobre modelagem de arco elétrico se refere a disjuntores, sendo comum para o caso do arco ao ar livre estimativas de comportamento a partir de extrapolações destes resultados.

Embora os arcos de potência que precedem o arco secundário estejam associados a fenômenos cujos parâmetros apresentam alto grau de aleatoriedade, a análise do arco secundário se dá de forma semelhante aos arcos associados a aplicações específicas, uma vez que sua ocorrência está associada a um tipo de manobra definida. A aleatoriedade de determinados parâmetros que influenciam o comportamento do arco, poderia adicionar ainda um tratamento estatístico na análise de seu comportamento, conforme descrito por PORTELA [1] e ponderado em [2].

Entretanto, conforme pode se observar a partir de resultados [2], a incorporação de tais efeitos não influencia significativamente a análise quanto à extinção do arco

secundário. Determinados fatores de caráter predominantemente determinístico acabam por predominar na caracterização do comportamento do arco secundário, como por exemplo, a interação arco-rede.

2.2. O Arco Secundário

A análise do comportamento do arco elétrico, mais precisamente da extinção do chamado arco secundário, é o elemento mais importante no estudo do chaveamento monofásico de uma linha de transmissão.

Seu transitório de formação envolve inicialmente um arco de potência, originado por um defeito fase-terra em um ponto qualquer da linha. Com a abertura dos disjuntores nas extremidades da fase sob falta, o nível de corrente desse arco é reduzido do valor inicial da corrente de arco, da ordem de kA, para o que chamamos de arco secundário, cujo valor normalmente não ultrapassa algumas dezenas de Amperes. Este arco que se mantém mesmo após a abertura dos disjuntores é sustentado pelo acoplamento eletromagnético entre fases (*Fig. 2.2.(2)*). No período transitório de formação do arco secundário observa-se ainda o amortecimento de uma componente unidirecional, relacionada com o instante de formação do arco secundário e com as características do sistema (*Fig.2.2.(1)*).

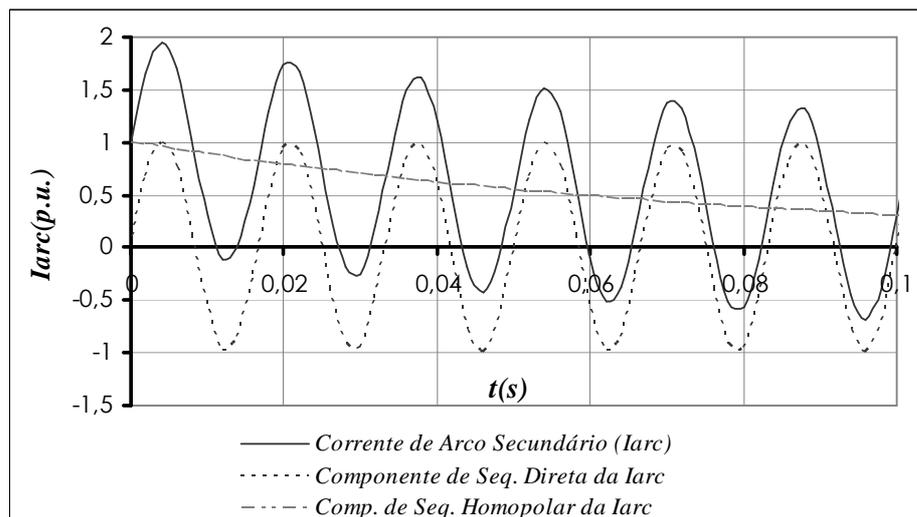
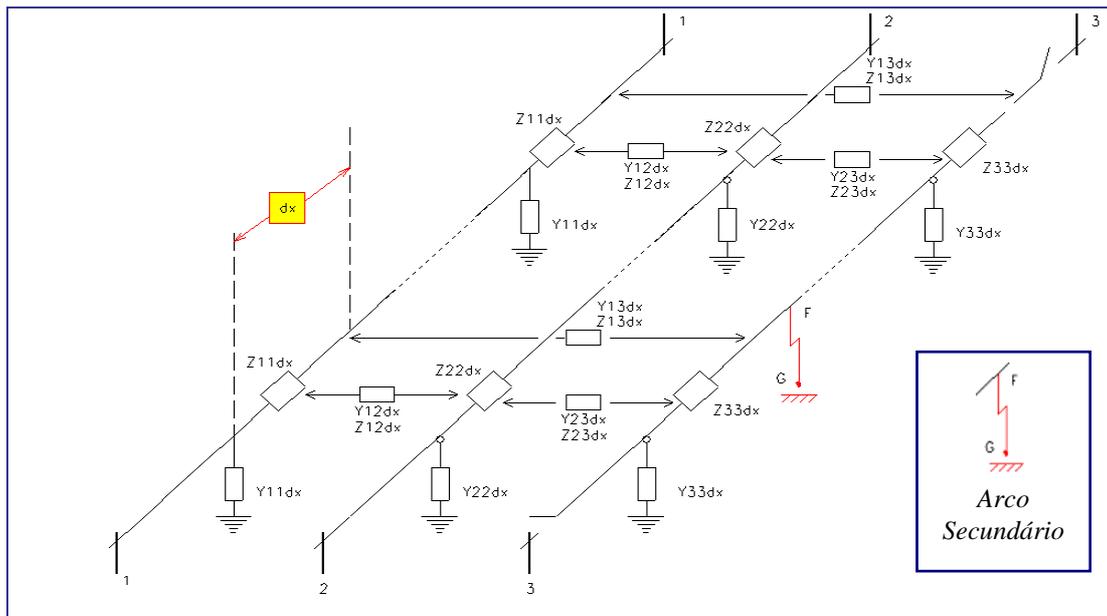


Figura 2.2.(1) – Efeito da Componente Unidirecional no Arco Secundário



dx : seção incremental de linha

Y_{kk} e **Z_{kk}** : admitância transversal e impedância longitudinal unitárias próprias

Y_{kn} e **Z_{kn}**, tal que **k ≠ n** : admitância e impedância unitárias mútuas (acoplamento entre fases)

Figura 2.2.(2) – Representação da LT por sucessão de quadripolos / Manobra Monofásica

2.3. Comportamento Básico do Arco

Como definição física do arco, pode-se dizer que se trata de um plasma a alta temperatura, de baixa resistividade elétrica e que conduz corrente quando submetido a um campo elétrico.

O arco se desenvolve em torno de uma coluna principal entre seus terminais, sendo uma região aproximadamente cilíndrica, onde o calor produzido pelas perdas do tipo Joule mantém a ionização fluindo axialmente na direção dos eletrodos e radialmente para o exterior do arco. Para arcos longos e de baixa corrente este fluxo axial normalmente é desprezado.

Vários estudos experimentais, incluindo os resultados obtidos até o presente momento com pesquisa correlata em desenvolvimento, indicam que a queda de tensão ao longo da coluna do arco principal corresponde a um fenômeno essencialmente não-linear, em que a variação do campo elétrico com a elasticidade de corrente tem densidade negativa para densidades de correntes baixas e uma elasticidade aproximadamente nula para densidades de correntes altas.

A tensão de arco secundário é praticamente proporcional ao comprimento do arco, para igual valor da corrente. O comprimento do arco varia acentuadamente com o tempo. Os principais fatores que influenciam a variação do comprimento do arco são a velocidade do vento, a convecção e a turbulência do ar, a magnitude e a duração da corrente de falta precedente.

O resultado final deste processo complexo como um todo, pode ser associado a uma variação acentuada da condutância do arco com uma redução relativa importante e um subsequente aumento. Eventualmente, após algumas dessas variações acentuadas a condutância do arco não volta a variar acentuadamente, ocorrendo então a extinção.

2.4. Fenômenos Físicos Básicos

2.4.1. Processos de Ionização e Recombinação

Num arco no ar tem-se uma zona central de plasma a alta temperatura, um canal principal ionizado e condutor de eletricidade. Em consequência, o arco absorve energia do sistema elétrico, que pode ser traduzida em uma potência por unidade de volume.

Simultaneamente ao processo de ionização, ocorre um fenômeno denominado recombinação que, embora também libere energia, provoca uma diminuição do número de partículas ionizadas. A simultaneidade destes processos retrata um comportamento de equilíbrio dinâmico, onde as condições de ocorrência é que vão favorecer o predomínio de um deles, levando à caracterização de uma alta ionização ou desionização. Para que ocorra a liberação de energia é necessário um tempo de poucos nanossegundos, ou seja, não é um fenômeno instantâneo. Sendo assim, as partículas devem estar próximas por tempo suficiente, o que é mais favorável nas temperaturas mais baixas, onde a agitação é menor. Além da temperatura, a pressão é uma variável de influência significativa no processo de recombinação.

Na verdade, ocorrem diversos mecanismos de arrefecimento ou transmissão de energia ao meio envolvente, nomeadamente por condução, transmissão de energia de dissipação e de ionização, convecção e radiação. Em condições ideais de equilíbrio estável, a potência elétrica fornecida (à zona central do arco) seria igual à potência transmitida ao meio envolvente, e ter-se-ia um perfil de temperatura aproximadamente estacionário.

Para correntes alternadas, mesmo com um arco em condições ideais, tem-se, em função do tempo, uma variação das grandezas físicas que não podem ser analisadas como uma sucessão de condições de equilíbrio, devido à inércia de vários dos fenômenos envolvidos, e, também, ao fato da variação periódica de temperatura provocar fenômenos específicos.

A Fig. 2.4.(1) [1] ilustra a proporção de ionização térmica em função do potencial de ionização e da temperatura para diferentes gases, sendo este potencial definido como a energia dispendida para arrancar um elétron. A unidade adotada como referência na Fig. 2.4.(1) é o eV (eletron-volt), que representa o produto da carga do elétron pela integração do campo elétrico para retirá-lo até fora do átomo ou da molécula. Ainda que as curvas apresentadas não considerem a variação de pressão, pode-se atestar o comportamento bastante diferenciado dos gases frente ao fenômeno de ionização. Para uma energia de 10 eV a ionização começa a surgir nos 7.000 K e já é quase total em 15.000 K, e para um potencial de 17,5 eV o início se dá a partir dos 10.000 K sendo quase total em 25.000 K.

O potencial de ionização do nitrogênio (N_2) e do oxigênio (O_2) é de 12,2 eV e 15,5 eV, respectivamente, enquanto o do flúor (F_2), presente no SF_6 , é de 17,5 eV. Nota-se que para o SF_6 a ionização ocorre parcialmente em fases sucessivas, pelo que não é correto analisar a ionização apenas com base na energia de ionização total. O mesmo sucede, embora menos acentuadamente, para os outros gases. Vale ressaltar que o ar livre representa uma mistura de gases, ou seja, caracterizá-lo por um de seus componentes pode levar a uma representação errada de seu comportamento.

Por outro lado, a convecção natural do ar, resultante da potência dissipada no arco, origina um deslocamento “global” do ar, na vizinhança do arco, que contribui, não só para o respectivo arrefecimento, como também para um aumento do comprimento do arco.

O vento e a turbulência, além de favorecerem o arrefecimento do arco, originam também seu respectivo alongamento.

Os efeitos eletrodinâmicos com as correntes nos condutores e/ou torres vizinhas, tendem também a provocar a alteração do percurso do arco.

Na hipótese de extinção de arco, o ar fica a temperatura relativamente elevada, e com alguma ionização residual, e, portanto, com rigidez dielétrica inferior à normal, o que favorece a reignição dielétrica, além de possibilitar a eventual reignição térmica.

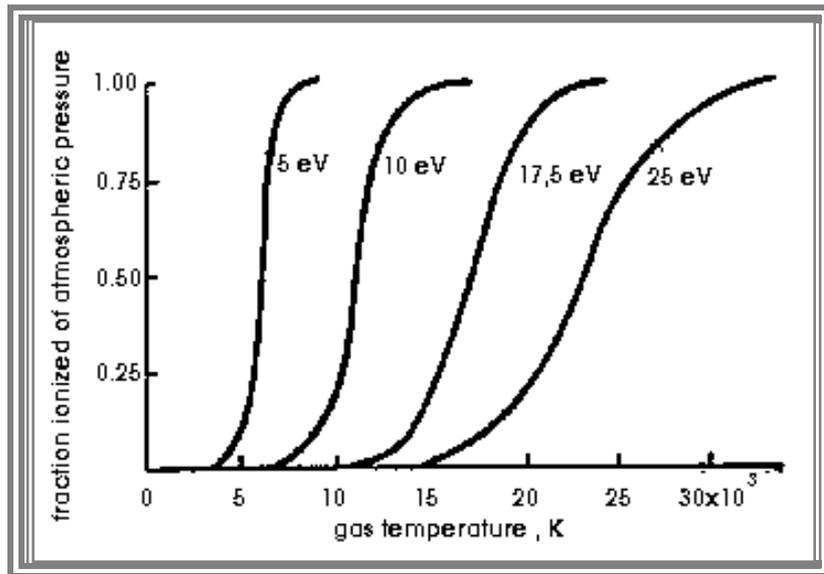


Figura 2.4.(1) – Caracterização da ionização para quatro tipos de gases distintos, em função do potencial de ionização e da temperatura [1]

Ressalta-se que as condições de extinção do arco dependem, além dos aspectos ligados ao arco propriamente dito, das condições de interação entre o arco e a rede.

2.4.2. Distribuição de Temperatura no Arco

A distribuição de temperatura na secção do arco pode ser calculada, a partir das condições externas de contorno, quais sejam, temperatura do meio e tamanho do raio do arco.

A equação normalmente adotada para caracterização de um arco cilíndrico em regime permanente (Elenbaas-Heller) relaciona o gradiente de temperatura na direção radial com as condutividades elétrica (σ) e térmica (\mathbf{k}) em função da temperatura :

$$\left[\begin{aligned} & \sigma E^2 + \text{div} (K \text{ grad } T) + \text{div} (K^* \text{ grad } T) - (\bar{v}, C_p \text{ grad } T) + \\ & + \left(1 - \rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \right) (\bar{v}, \text{grad } P) - S = 0 \end{aligned} \right] \quad (2.1)$$

sendo, \mathbf{E} o campo elétrico, T a temperatura absoluta, \bar{v} a velocidade, ρ a densidade, \mathbf{K} a condutividade térmica, \mathbf{K}^* a condutividade térmica equivalente por turbulência, P a pressão, C_p o calor específico a pressão constante, e em que os diversos termos representam, por unidade de volume:

- (1) σE^2 : dissipação de energia elétrica
- (2) $\text{div}(K \text{ grad } T)$: transmissão de energia por condutividade (laminar)
- (3) $\text{div}(K^* \text{ grad } T)$: transmissão de energia por turbulência
- (4) $(\bar{v}, C_p \text{ grad } T)$: transmissão de calor transportado pelo gás no seu deslocamento
- (5) $(1) \times (\bar{v}, \text{grad } P)$: transmissão de energia correspondente a trabalho mecânico
- (6) $\left(-\rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T \right) (\bar{v}, \text{grad } P)$: variação de entalpia para um observador que se desloque com o fluido
- (7) S : perda por radiação

Esta equação é derivada considerando que uma camada cilíndrica interna tem o fluxo de calor externo radial pela sua superfície, de valor igual ao fluxo recebido do cilindro interno mais o calor gerado dentro dessa camada incremental. A distribuição de temperatura é obtida pela integração da equação acima, conhecendo-se a variação dos coeficientes k e σ com a temperatura.

Em alguns casos há mais termos a se considerar, por exemplo, a dissipação de energia por viscosidade.

Além disso, por vezes a composição do gás não depende apenas das propriedades pontuais (devido aos gradientes serem elevados).

O termo σE^2 representa a “origem” da energia que aquece o arco.

Em geral, na extinção do arco é importante o termo (2) e, havendo injeção de gases na zona do arco, também os termos (3) e (4).

Há cinco tipos de fenômenos essenciais que influenciam as características básicas do arco: a mobilidade das partículas (velocidade e intervalo de tempo entre choques sucessivos), a dissociação, a ionização, a convecção e a radiação.

A mobilidade das partículas está associada à distribuição de velocidades fortemente influenciadas pela temperatura, às seções “eficazes” para efeitos de choques de vários tipos, e à densidade das partículas.

A *condução térmica* é o processo mais importante na transferência de calor na parte central e mais aquecida do arco. Esta se dá por colisão física entre os átomos e por emissão e absorção de radiação. Além disso, a radiação de ondas longas pode se propagar completamente para fora do arco, chegando a representar 30% de todas as perdas por calor em arcos de alta temperatura.

2.4.3. Extinção Térmica / Dielétrica

O arco elétrico tem o comportamento de uma resistência ou condutância não-linear. No período de corrente intensa esta condutância tem valor elevado. Entretanto, na vizinhança do zero de corrente o valor da condutância decresce, facilitando a interrupção.

No instante de zero da corrente, o meio entre terminais do arco não está totalmente recombinado, ou seja, observa-se ainda a presença de cargas espaciais. O valor da condutância residual (g_0) neste instante, apesar de ser baixo o bastante para promover a interrupção da corrente, é diferente de zero. Quando é aplicada tensão sobre g_0 surge uma corrente de pequena amplitude, denominada corrente pós-arco.

Sendo os valores de g_0 e da corrente pós-arco muito baixos, a potência dissipada no meio entre terminais não é suficiente para reiniciar a ionização e uma consequente descarga elétrica. Por outro lado, se a condutância residual não possui um baixo valor, ou, a taxa de crescimento da tensão aplicada for muito elevada, a potência dissipada pela corrente pós-arco pode atingir valores suficientes para reaquecer o meio. A *ionização térmica* recomeça, possibilitando uma reignição da corrente, ocorrendo, então, uma *falha térmica*.

Assim, para o sucesso da interrupção do arco na fase térmica, é preciso que a potência total dissipada pelo arco, até o zero de corrente, seja menor que aquela "retirada" pelo fluxo de gás (P_0), e também, que a potência dissipada pela corrente pós-arco na condutância residual seja insuficiente para reaquecer o meio.

Não ocorrendo falha térmica, a corrente pós-arco é extinta satisfatoriamente e o meio agora estará sujeito a solicitações dielétricas.

Há um período de transição entre as *fases térmica e dielétrica*, cuja duração depende da corrente interrompida [6]. A suportabilidade dielétrica do meio durante esta fase não é explicada pelas leis que regem os fenômenos térmicos nem dielétricos de interrupção de corrente. Para correntes de pequena amplitude, esta fase tende a ter uma

duração extremamente pequena, podendo se considerar, no caso do arco secundário, desprezável. Sendo assim, considera-se que o fim da fase térmica marca o início da fase dielétrica.

No início da *fase dielétrica* tem-se a presença de cargas espaciais. O surgimento de sobretensões no sistema pode promover um campo elétrico aplicado a estas cargas capaz de acelerar os elétrons livres remanescentes, fornecendo energia suficiente para provocar uma crescente ionização por colisão de elétrons, podendo ocasionar uma ruptura dielétrica, ou seja, um reacendimento da corrente, sendo este fenômeno denominado de *falha dielétrica*.

2.5. Dispositivos e Métodos para Facilitar a Extinção do Arco Secundário

Determinadas configurações de linha e rede não favorecem à auto-extinção do arco secundário, sendo necessária então adoção de medidas a fim de se promover tal extinção.

Linhas de alta tensão longas e/ou compactas representam exemplos de condições potenciais para adoção de dispositivos para que se garanta o sucesso do religamento monofásico.

Os dispositivos mais comumente utilizados em redes de alta tensão estão associados basicamente à alteração das componentes homopolares e não-homopolares das redes terminais.

Algumas soluções encontram-se listadas a seguir.

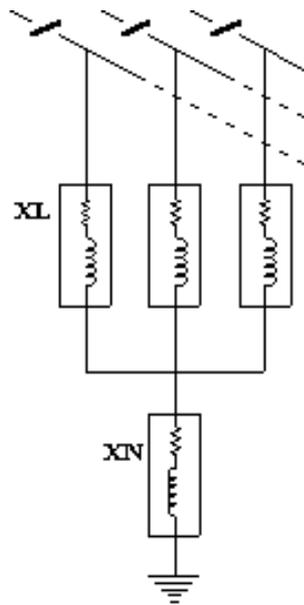
❖ ***Impedância de Neutro***

Para linhas com compensação em derivação é comum se adotar uma impedância para aterramento do neutro dos reatores de linha.

A impedância de neutro é convenientemente dimensionada para representar, além de um fator de amortecimento adicional, uma modificação da impedância de sequência zero tal que se fuja da sintonia de eventuais picos de ressonância. Por isso, é tão comum observarmos a adoção de reatores, conhecidos como reatores de neutro, como solução para impedância de neutro, formando o conjunto reator de linha + reator

de neutro o chamado “reator de quatro pernas” (Fig.2.5.(1)). Há inúmeros trabalhos relacionados ao emprego desta solução, onde são sugeridos procedimentos para seleção da impedância de neutro, como por exemplo, o apresentado em [2, 4, 5].

Uma alternativa ainda para o aterramento da compensação em derivação é a utilização de pára-raios, devidamente dimensionados. Devido à característica extremamente não-linear dos pára-raios, tem-se o neutro isolado em regime permanente, e sob condições de desbalanço, com a elevação da tensão do neutro, os pára-raios entram em condução.



XL : reator de linha **XN** : reator de neutro

Figura 2.5.(1) – Reator de 4-pernas

❖ **Chaveamento de elementos em derivação / Impedância de Neutro**

Uma evolução da utilização da impedância de neutro é o chaveamento dos elementos conectados às fases e/ou do elemento que interliga o neutro à terra, caso tenha sido adotado.

Inicialmente concebido como um “esquema de reator a quatro pernas manobráveis” , as variações hoje encontradas apresentam um número apreciável de possibilidades, com diversas sequências de chaveamento, envolvendo reatores, resistores e chaves de aterramento rápido.

❖ **Chaveamento de Elementos Série**

O chaveamento de elementos série se refere basicamente à conexão de capacitores à fase em falta. Sua adoção está associada principalmente a linhas não compensadas, embora, se os capacitores forem devidamente dimensionados, possam ser utilizados também em linhas compensadas. O que geralmente ocorre é que, para este último caso, as soluções anteriores costumam apresentar custos globais inferiores [9], além de terem seu uso mais difundido.

❖ *Chave de Aterramento Rápido*

A chave de aterramento rápido é um dispositivo particularmente interessante de ser empregado quando não há compensação em derivação.

Observa-se uma utilização crescente deste equipamento, e sua presença em sistemas de 500 kV é assinalada por instalações com mais de vinte anos [7].

Sua utilização entretanto deve estar pautada em uma avaliação cautelosa da corrente de arco secundário e das solicitações impostas às próprias chaves de aterramento.

❖ *Eletrônica de Potência*

Embora a utilização de dispositivos FACTS ou ainda, equipamentos baseados em Eletrônica de Potência, ainda não tenha se tornado uma ferramenta comum no equacionamento de problemas relacionados à manobra monofásica, é possível se observar soluções potenciais a partir de seu emprego. Neste caso um conversor de tensão (ou corrente) poderia ser usado para duas finalidades: eliminar a corrente do arco secundário e equilibrar a tensão do sistema trifásico. Para eliminar a corrente de arco secundário, uma possibilidade seria a injeção de corrente na fase aberta de forma a anular a corrente do arco por um tempo suficiente para extingui-lo. O conceito a ser utilizado nessa eliminação de corrente seria similar àquele utilizado em filtros ativos de correntes harmônicas, com a diferença que neste caso a compensação poderia ser na frequência fundamental ou muito próxima desta. Também se poderia trabalhar com frequências relacionadas à assinatura harmônica do arco. A assinatura harmônica do arco é tema explorado em [26, 33, 34, 36, 37]. O segundo problema do desbalanço de tensão ocorre nas extremidades da linha que está com uma fase em aberto. Compensadores similares ao STATCOM poderiam ser usados para equilibrar as tensões nas extremidades da linha e evitar problemas devido à alta presença de componentes de

sequência negativa. Um caso extremo de balanceamento de tensão trifásica foi estudado por Miguel [43] mostrando a viabilidade de se obter tensão trifásica equilibrada em sistemas com perda de uma fase.

Os conceitos acima podem ser aplicados, em princípio, em linhas curtas ou muito longas (próximo a meio comprimento de onda).

Em [8] são apresentados conceitos básicos sobre a teoria de potência ativa e reativa instantânea, filtros ativos e FACTS, que podem ser importantes no entendimento e projeto destes compensadores.

2.6. Análise Quanto à Extinção do Arco Secundário

A análise do comportamento do arco elétrico, mais precisamente da extinção do chamado arco secundário, é a etapa mais importante no estudo de chaveamento monofásico, uma vez que a extinção do arco é fator decisivo para o sucesso da manobra.

Seu transitório de formação envolve inicialmente um arco de potência, originado por um defeito fase-terra em um ponto qualquer da linha. Com a abertura dos disjuntores nas extremidades da fase sob falta, o nível de corrente desse arco é reduzido do valor inicial da corrente de arco, da ordem de kA, para o que chamamos de arco secundário, cujo valor normalmente não ultrapassa algumas dezenas de Amperes. Este arco, que se mantém mesmo após a abertura dos disjuntores, é sustentado pelo acoplamento eletromagnético entre fases.

No período transitório de formação do arco secundário, além das oscilações transitórias, observa-se ainda o amortecimento de uma componente unidirecional. A duração deste transitório está associada às características da rede, ao arco, além do instante de aplicação do defeito e abertura da fase sob falta.

A análise da extinção do arco secundário se dá a luz do estudo de três fenômenos básicos envolvidos no comportamento físico do arco, quais sejam, **(a) extinção térmica**, **(b) reignição elétrica** e **(c) interação do arco com a rede**.

A seguir são listados alguns fatores de relevância para o fenômeno sob os aspectos suscetíveis de análise mencionados acima:

(a) Extinção Térmica

- Características físicas do ar (densidade, condutância elétrica, condução térmica, capacidade térmica, distribuição de temperatura, etc.).
- Taxa de variação da corrente antes da passagem pelo zero.
- Taxa de variação da tensão de restabelecimento.
- Comprimento inicial do arco.
- Alongamento do arco pós arco primário.
- Velocidade do vento.
- Posição das cadeias de isoladores e do arco, no caso do arco formado junto a cadeia.
- Corrente do arco primário e sua duração
- Último pico da corrente de arco secundário
- Amplitude da tensão de restabelecimento
- Presença de componente unidirecional e componentes harmônicas na corrente de arco secundário.
- Ocorrência de novos disparos (*break-down*) do arco, após o alongamento, curto-circuitando o arco expandido, pelo caminho mais curto entre os chifres de descarga ("gap" inicial).
- Natureza estatística dos fenômenos climáticos (vento, temperatura, chuva, fumaça, umidade, etc.) e dos mecanismos de ionização e descarga elétrica no ar.

(b) Reignição Elétrica

- Características físicas do ar (densidade, distribuição de temperatura, umidade, taxa de recombinação dos íons/elétrons, taxa de formação de íons e separação dos elétrons).

- Taxa de crescimento da tensão de restabelecimento do arco.
- Amplitudes máximas da envoltória da tensão de restabelecimento.
- Tempo decorrido da interrupção do arco primário influi significativamente na suportabilidade da tensão que aparece entre os “terminais” do arco. Por analogia ao adotado em arcos em disjuntores, tal tensão é conhecida também por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).
- Comprimento (gap) da cadeia de isoladores, no caso de arcos formados junto a cadeia.
- Crescimento do comprimento do arco pós-arco primário (alongamento).
- Corrente do arco secundário (amplitude).
- Posição da cadeia de isoladores e do arco (vertical, horizontal ou inclinada).
- Velocidade do vento ou situação de calmaria.
- Natureza estatística dos fenômenos climáticos (vento, umidade, temperatura, chuva, fumaça etc.) e dos mecanismos de ionização e descarga elétrica no ar livre, semelhante ao que ocorre com os raios.

(c) Interação do arco com a rede e o meio

- Acoplamento capacitivo (aumenta com o comprimento da LT e com a proximidade das fases).
- Acoplamento indutivo e carregamento da LT.
- Tempo morto admissível (requisitos do sistema interligado).
- Grau de compensação em derivação da LT (grau maior reduz a taxa inicial de subida da tensão de recuperação).
- Ponto da LT em que ocorre o defeito.

- Impedância da rede vista do ponto de defeito (varia em função da frequência, e também da tensão devido à saturação); pode ter interação harmônica com a não linearidade do arco.
- Tensão de operação da LT.
- Limitação na transferência de potência da rede para o arco quando do alongamento do arco, com aumento da resistência e da potência dissipada.
- Conteúdo de corrente unidirecional na corrente do arco secundário.
- Efeito de medidas e equipamentos para a redução da corrente de arco secundário e da sua extinção: reatores de neutro, chaves de aterramento etc.

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos e do grande número de variáveis a serem consideradas, conforme listado acima, ainda não se chegou a um consenso de uma metodologia para análise do comportamento do arco secundário.

À priori, de acordo com as informações contidas em grande parte da literatura disponível sobre o assunto, parece razoável se estabelecer uma modelagem de arco que valorize os principais aspectos relacionados ao equilíbrio de energia (Elenbaas-Heller), considerando, desta forma, o fornecimento de potência elétrica ao arco e os mecanismos de troca de calor (condução, convecção e radiação), representados através de variáveis que traduzem o estado físico médio da coluna central do arco. Assim, a partir de características estacionárias do ar, é possível se estabelecer seu comportamento dinâmico, representado basicamente pelas constantes de tempo presentes nas equações que caracterizam o comportamento do arco, do tipo *Mayr*, *Cassie*, *Thiel*, etc.

O modelo com duas constantes de tempo proposto em [3] parece sintetizar de forma satisfatória as principais grandezas que caracterizam o comportamento do arco e sua interação com a rede.

A utilização de uma metodologia que envolva cálculos no domínio da frequência, no domínio do tempo, e até um procedimento híbrido frequência-tempo, com o modelo do arco com duas constantes de tempo, parece ser a mais indicada para se analisar satisfatoriamente a viabilidade da manobra monofásica, no que se refere às suas características transitórias. Em [2] é apresentado um exemplo considerando tal filosofia de estudo.

Capítulo 3

LINHAS DE TRANSMISSÃO PROJETADAS CONSIDERANDO O RELIGAMENTO MONOFÁSICO

Podemos afirmar que, de acordo com o atual modelo do setor elétrico brasileiro (SEB), o Religamento Monofásico incorporou-se às diretrizes de planejamento e operação do SEB como integrante das consideradas manobras básicas de operação de uma linha de transmissão.

Entretanto, no que se refere ao Planejamento, os estudos relacionados ao tema em tela ficam legados a uma etapa posterior à definição das características elétricas básicas construtivas da LT, o que limita a determinação de soluções que garantam o sucesso no emprego do religamento monofásico.

3.1. Definição das Características Básicas de uma LT com Religamento Monofásico

Ao se projetar uma linha de transmissão, na determinação de suas características elétricas básicas, a definição da quantidade, tipo e distribuição espacial dos condutores pretende atender uma potência a ser transmitida por uma certa distância, com o menor custo possível. As soluções potenciais são delimitadas de acordo com princípios básicos de coordenação de isolamento, tais como os mencionados em [10, 11, 12, 13, 14, 15].

Diante da evolução tecnológica, tanto no que se refere às ferramentas de cálculo disponíveis, como na própria evolução dos materiais, equipamentos e dispositivos acessórios, novas “filosofias” de projeto de LT foram surgindo. Termos como “torre compacta”, “linha de potência natural elevada (LPNE)” ou feixe expandido, “transmissão em meia-onda”, dentre outros, acabaram por incitar o surgimento de uma denominação comum a todos aqueles projetos que fogem da simetria e métrica tradicional – *a LT Não-Convencional*.

Vale destacar que as Leis da Física que regem os projetos das linhas convencionais e não-convencionais são as mesmas – o que muda é a filosofia de como empregá-las.

Filosofias à parte, o objetivo sempre é escolher, dentre uma gama de possibilidades, a que melhor atende a demanda da LT solicitada.

Considerando que o emprego do religamento monofásico está condicionado à garantia de extinção do arco secundário dentro de um tempo morto (pré-estabelecido nos estudos de estabilidade de rede), e que o arco secundário está estreitamente relacionado ao acoplamento entre fases da LT, pode se afirmar que estamos diante de um fenômeno diretamente influenciado pelas características construtivas da LT. Dessa forma, ele pode, facilmente, ser incluído como um elemento condicionante adicional na determinação das características da LT ainda nas etapas de planejamento, especialmente no tocante à distribuição espacial dos feixes.

A inclusão de uma análise simplificada do arco secundário, ainda na fase de concepção da LT, colabora sobremaneira para uma otimização mais refinada da LT em causa, uma vez que diminui, ou até elimina, custos de dispositivos adicionais para viabilização do religamento monofásico, trazendo ainda, como benefício indireto, um aumento da confiabilidade, já que a exclusão de dispositivos de manobra adicionais diminui também o risco de falhas.

Ressalta-se que, uma vez que o arco secundário é o fenômeno de maior relevância no estudo do religamento monofásico, seu estudo preliminar, ainda na fase de concepção dos feixes, vale como mais um parâmetro para escolha da melhor configuração para a LT, não sendo o objeto principal de análise nesse momento. Sendo assim, a introdução da questão do arco secundário como parâmetro para escolha do feixe de condutores, pode se limitar a uma análise paramétrica à frequência industrial, com a inclusão de alguns critérios básicos relacionados ao arco, mais especificamente o valor máximo da corrente de arco secundário em regime permanente.

Estudos do comportamento do arco secundário pormenorizados devem ainda ser desenvolvidos no âmbito dos estudos realizados após a determinação da configuração básica da LT, como os de transitórios eletromagnéticos de manobra de LT, onde pode se avaliar melhor o tempo de extinção do arco, ou ainda, o tempo morto efetivamente necessário para que se garanta o sucesso da manobra .

No caso de se prever a utilização de compensação reativa em derivação na linha sob estudo, pode se considerar o aterramento dessa compensação através de uma

impedância de neutro – solução bastante difundida nas linhas compensadas, sendo o aterramento mais comum feito através de reatores de neutro, apresentado no capítulo anterior (Fig. 2.5.(1)).

3.1.1. Critérios Adicionais na Definição do Feixe de Condutores de uma LT considerando o Religamento Monofásico

O que se propõe a seguir é que, uma vez definidas configurações possíveis da LT segundo critérios tradicionais de dimensionamento de LT's, informações adicionais relacionadas ao arco secundário devem ser avaliadas, levando em consideração para tal as diversas condições de operação ou contingências a que a LT estaria sendo submetida durante o religamento monofásico.

Nessa etapa, uma análise sucinta do arco secundário dispensa sua avaliação transitória, ou mesmo modelos mais elaborados de seu comportamento. O que se pretende é basicamente observar o efeito do acoplamento entre fases. Na verdade, o estudo aqui se assemelha com um estudo de indução em linhas paralelas, considerando apenas a frequência industrial num primeiro momento.

Sendo assim, para a análise preliminar proposta deve se considerar quanto às condições de manobra, operação e grandezas envolvidas:

1. Grandezas Calculadas :

- a. Tensão Induzida na Fase Aberta.
- b. Corrente e Tensão de Restabelecimento Transitória prospectivas do Arco Secundário.

2. Condições de Manobra e Operação:

- a. Variação do Local de Defeito.
- b. Uma fase aberta em uma extremidade.
- c. Uma fase aberta em ambas extremidades.

Tendo em mente que os critérios de análise devem restringir paulatinamente as soluções possíveis a fim de encontrar as hipóteses potencialmente ótimas, como síntese dos critérios de análise sugere-se a seguinte seqüência básica:

Critério 1 :

Verificação, para cada opção de linha, do maior valor absoluto da *impedância equivalente vista do ponto de defeito* ($z_f(60\text{Hz}) = \mathbf{R} + \mathbf{I} \mathbf{X}$), com o menor valor da relação \mathbf{X}/\mathbf{R} dessa impedância, à frequência industrial.

Um \mathbf{X}/\mathbf{R} muito alto pode indicar uma janela estreita de parâmetros para os quais se tem variação moderada da corrente e da “tensão de restabelecimento” do arco secundário.

No caso de linha com compensação em derivação, esse critério é particularmente interessante como norteador da definição do reator de quatro pernas. Em síntese, o que se busca é uma combinação tal de reatores de linha e de neutro de modo que se tenha para $z_f(60\text{Hz})$ o maior módulo ($\text{Max}[\text{Abs}[z_f(60\text{Hz})]]$), com um alto valor de sua parte real (\mathbf{R}) e um baixo valor de sua parte imaginária (\mathbf{X}) ($\text{Max}[\text{Re}[z_f(60\text{Hz})]]$ e $\text{Min}[\text{Im}[z_f(60\text{Hz})]]$).

Embora, a princípio, todas as condições de operação da linha devam ser investigadas a fim de se detectar possíveis ressonâncias no entorno da frequência industrial, destaca-se que, no caso de linhas com religamento monofásico, a condição de operação de maior relevância é a de linha aberta monofasicamente em ambas extremidades.

Critério 2 :

Uma vez definida a gama de soluções potenciais a partir do primeiro critério, busca-se, dentre essas soluções, a que apresente a menor corrente de arco secundário (\mathbf{I}_{arc}), avaliando também a tensão de restabelecimento de arco secundário ($\mathbf{U}_{trt_{arc}}$), à frequência industrial.

Independentemente da análise numérica específica, há necessidade de uma visão global da variação da \mathbf{I}_{arc} e TRT ao longo da LT, de acordo com parâmetros estratégicos da rede ou mesmo da LT e possíveis equipamentos associados.

É interessante acrescentar uma avaliação semelhante a essa considerando a variação dos parâmetros estratégicos que caracterizam a evolução da rede.

Critério 3:

Verificar, a partir da solução escolhida para a compensação em derivação após o segundo critério, a tensão em vazio nas extremidades da LT, em condições normais de operação.

No caso de se adotar compensação em derivação, pode-se ainda variar os reatores de linha e seu aterramento, obtendo assim a otimização do conjunto linha + compensação.

A otimização da compensação em derivação sugere a inclusão das condições de operação: Linha fechada e Linha aberta tripolarmente, com ou sem defeito, com medição da tensão nas extremidades da linha para todas as condições de operação.

Como roteiro de estudo, *considerando a otimização da compensação*, temos então:

- 1. Definição de uma ou mais alternativas de feixes, de acordo com critérios econômicos e de coordenação de isolamento [10, 11, 12, 13, 14] . A esses critérios acrescenta-se a parametrização da compensação em derivação, otimizando-a para frequência industrial. Tal parametrização tem como referência as medições da tensão induzida na fase aberta e do módulo da corrente de arco secundário.*
- 2. Uma vez determinada a configuração básica da linha a frequência industrial, calcula-se os parâmetros da solução adotada em função da frequência. No caso de não se utilizar compensação em derivação, basta o cálculo para frequência industrial.*
- 3. Montagem do circuito linha-rede, explorando parâmetros estratégicos que afetam os condicionamentos do religamento monofásico. Como exemplo, podemos citar a alteração da componente de seqüência homopolar dos transformadores como elemento mitigador do arco secundário).*
- 4. Ajuste do circuito para as condições de carga máxima e mínima previstas.*

5. *Aplicação de defeito monofásico ao longo da LT, variando também a fase. Medição da corrente de defeito e tensão pré-defeito. No caso de otimização da compensação em derivação, calcular também a tensão e corrente de neutro da compensação. Nessa etapa selecionam-se os locais de defeito bem como as respectivas fases a serem consideradas nas etapas seguintes.*

6. *Considerar apenas uma extremidade da linha aberta e medir as grandezas apontadas em 5. Deve-se considerar, independentemente do local de defeito, as combinações (a) terminal emissor fechado + terminal receptor aberto e (b) terminal emissor aberto + terminal receptor fechado.*

7. *Considerar as duas extremidades abertas e medir as grandezas apontadas em 5, lembrando que a corrente agora medida no ponto de defeito é efetivamente a corrente de arco secundário.*

Sob a ótica do religamento monofásico, a condição apresentada em 7 se caracteriza como a de maior relevância. Entretanto, as demais condições de operação devem ser verificadas a fim de se detectar possíveis problemas de ressonância, principalmente no caso de haver compensação na LT. Dessa forma, embora a seqüência da manobra induza à ordem apresentada acima, para efeitos práticos de cálculos e simulação, o mais conveniente é que a condição apresentada em 7 anteceda a 6, uma vez que ela apontará as soluções a serem efetivamente consideradas por estar diretamente associada ao arco secundário.

Ressalta-se ainda a importância de se considerar a influência de variações de parâmetros da rede aos terminais da linha, relacionadas a equipamentos associados ao projeto que a linha integra, que podem, inclusive, promover a extinção do arco secundário. Como exemplo, tem-se a alteração da impedância homopolar de transformadores, que não representa aumento de custo mas pode ser uma solução potencialmente na viabilização do religamento monofásico.

O estudo apresentado a seguir ilustra a metodologia proposta acima.

3.1.2. Exemplo de aplicação da metodologia proposta para inclusão do religamento monofásico e otimização da compensação em derivação, na determinação das características construtivas básicas de LT's

Dados do Exemplo :

Linha de Transmissão

A LT trifásica em 525 kV usada como referência (LNC1) possui 400 km de extensão, com feixes dispostos conforme apresentado na Fig. 3.1.(1), com transposições em trechos subseqüentes de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 de sua extensão, com mesma seqüência de rotação de fases em cada transposição (Fig. 3.1.(2)).

Parâmetros unitários e demais características elétricas básicas da linha, para frequência de 60 Hz e hipótese da linha ser considerada idealmente transposta :

Parâmetros Unitários de Seqüência Direta :

$$c_d = 18,6688 \text{ nF/km}$$

$$y_d = i 7,07396 \text{ } \mu\text{S/km a 60 Hz}$$

$$z_d = 0,0353634 + i 0,234603 \text{ } \Omega/\text{km a 60 Hz}$$

Parâmetros Unitários de Seqüência Homopolar :

$$c_h = 9,39825 \text{ nF/km}$$

$$y_h = i 3,54306 \text{ } \mu\text{S/km a 60 Hz}$$

$$z_h = 0,346714 + i 1,31066 \text{ } \Omega/\text{km a 60 Hz}$$

Impedância Característica:

$$z_c = 183,604 \text{ } \Omega \text{ a 60 Hz}$$

Potência Característica :

$$S_c = 1501,19 \text{ MVA}$$

Os gráficos apresentados nas páginas do **Anexo 1**, A1-2 a A1-7, ilustram a variação dos parâmetros unitários em função da frequência, na hipótese de transposição ideal.

Disposição dos Condutores

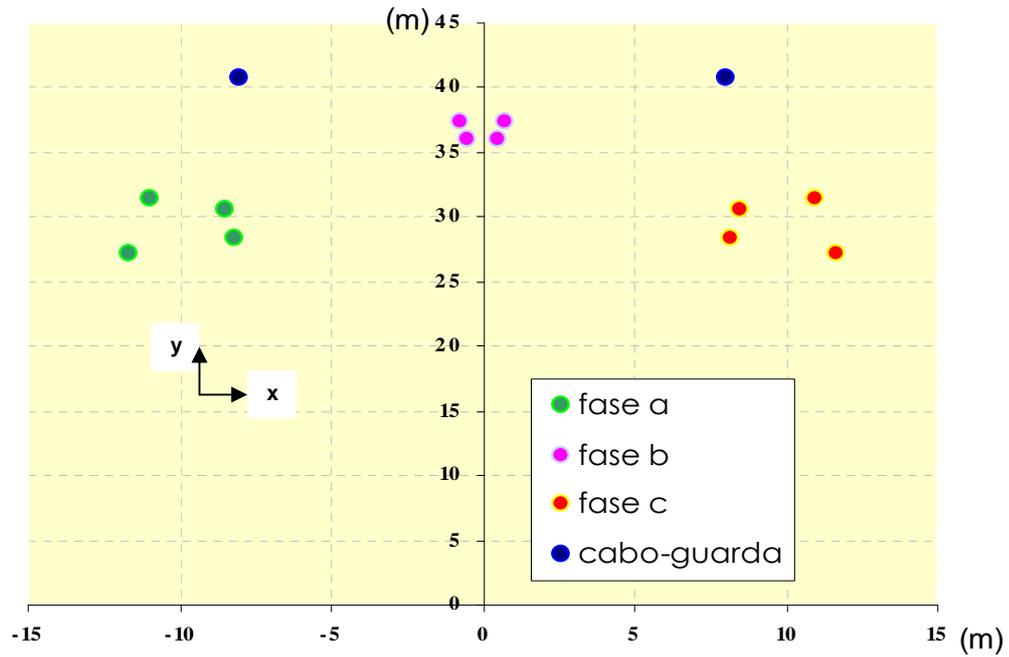


Figura 3.1.(1) – *Disposição Geométrica dos condutores da LT considerada*

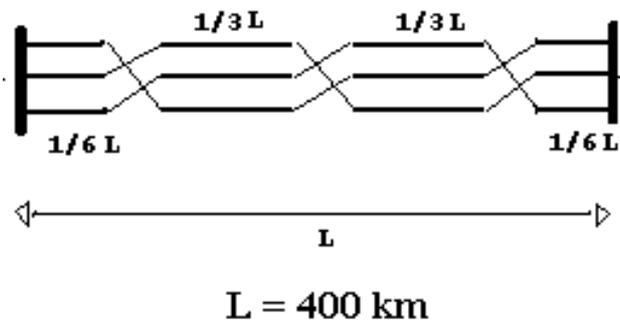
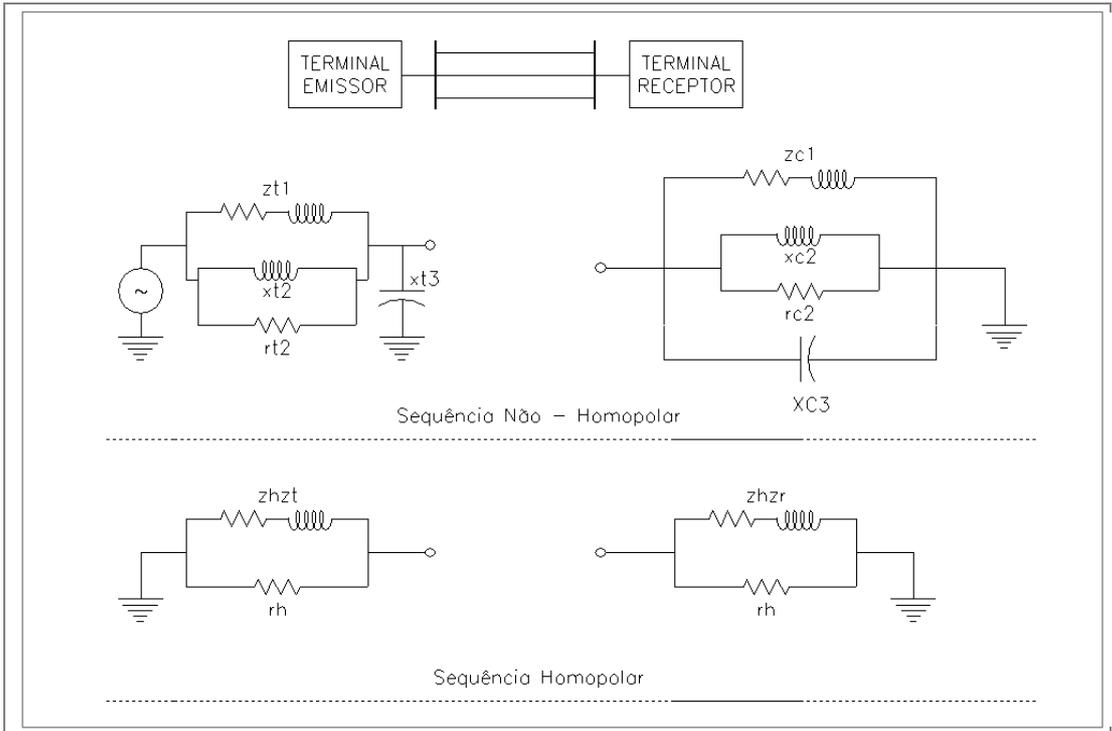


Figura 3.1.(2) – *Representação Esquemática da Transposição da LT*

Representação da Rede

A representação da rede utilizada aos terminais da linha, já sob a forma de equivalentes, encontra-se ilustrada na Fig. 3.1.(3).



Sendo:

LADO FONTE (TERMINAL EMISSOR)

LADO CARGA (TERMINAL RECEPTOR)

Seqüência Não-Homopolar (Direta)

Seqüência Não-Homopolar (Direta)

$$z_{t1} = (0.6301 + i * (\omega * 0,1003)) \Omega$$

$$z_{c1} = 359,16 + i * (\omega * 0,3228) \Omega;$$

$$r_{t2} = 1575 \Omega$$

$$r_{c2} = 397,9344 \Omega;$$

$$x_{t2} = i * (\omega * 0,0836) \Omega$$

$$x_{c2} = i * (\omega * 3,2124) \Omega;$$

$$x_{t3} = -i * (1 / (\omega * 2,6526 * 10^{-7})) \Omega$$

$$x_{c3} = -i * (1 / (\omega * 3,1844 * 10^{-7})) \Omega;$$

Impedância Equivalente (zt) Vista ao Terminal :

Impedância Equivalente (zdc) Total Vista ao Terminal :

$$z_t = ((z_{t1}^{-1}) + (r_{t2}^{-1}) + (x_{t2}^{-1}))^{-1} \Omega$$

$$z_{dc} = ((z_{c1}^{-1}) + (r_{c2}^{-1}) + (x_{c2}^{-1}) + (x_{c3}^{-1}))^{-1} \Omega;$$

Impedância Equivalente (zdt) Total Vista ao Terminal:

$$z_{dt} = ((1/z_t) + (1/x_{t3}))^{-1} \Omega$$

Seqüência Homopolar

Seqüência Homopolar

$$\text{tetac} = \text{ArcTan}[40.];$$

$$\text{tetac} = \text{ArcTan}[40.]$$

$$z_{hzt} = ((525^2) / 10000) * (\text{Cos}[\text{tetac}] + i * \text{Sin}[\text{tetac}]) \Omega;$$

$$z_{hzt} = (((525^2) / 600) * 0,1) * (\text{Cos}[\text{tetac}] + i * \text{Sin}[\text{tetac}]) \Omega$$

$$r_h = 10000. \Omega;$$

$$r_h = 10000. \Omega$$

$$z_{ht} = ((1/z_{hzt}) + (1/r_h))^{-1} \Omega$$

$$z_{hc} = ((1/z_{hzt}) + (1/r_h))^{-1} \Omega$$

Figura 3.1.(3) – Rede Representada Aos Terminais da Linha

Cálculos e critérios básicos para definição do conjunto de reatores a quatro pernas (reator de linha + reator de neutro) a serem adotados.

Os procedimentos abaixo descritos consideraram apenas o domínio em regime sustentado, valendo como uma análise prévia, meramente indicadora de possíveis soluções.

Critério 1 : Levantamento da impedância a frequência industrial ($z_f(60\text{Hz})$) em diversos pontos ao longo da linha, variando-se os reatores de linha numa determinada faixa de compensação em derivação (entre 30% e 70%). Para cada reator de linha (X_L) considerado variou-se o reator de neutro (X_N) numa gama tal que a relação X_N/X_L variasse de 0 a 1. Tal medição considerou ainda as condições de operação apontadas na Fig. 3.1.(4):

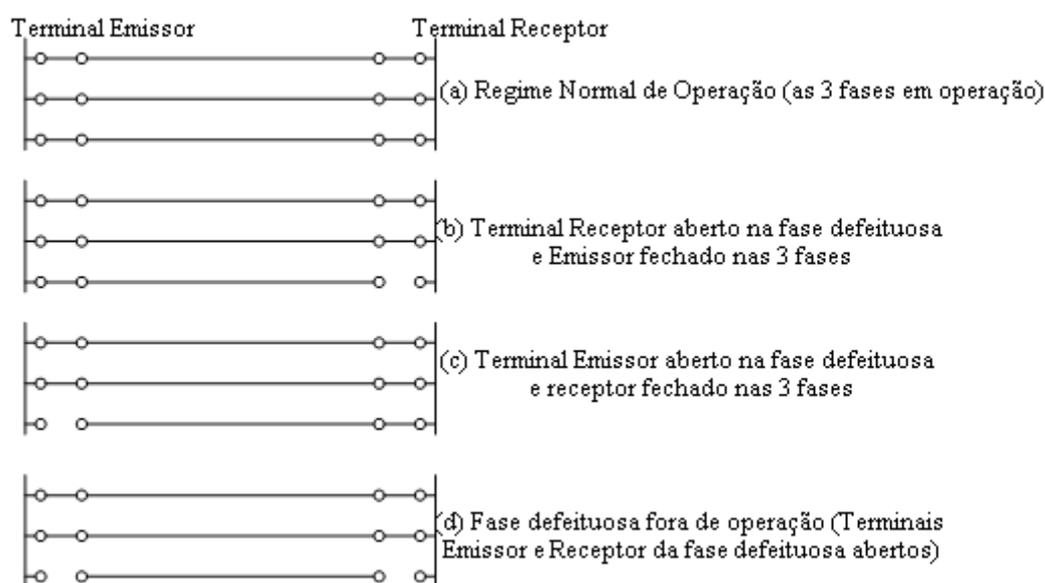


Figura 3.1.(4) – Condições de Operação relacionadas à Manobra Monofásica

Os conjuntos de reatores selecionados foram aqueles que conjugaram para $z_f(60\text{Hz})$, as condições de maior módulo, com maior parte real, segundo a condição apontada em (d) (Fig. 3.1.(4)). Embora os cálculos tenham sido efetuados para todas as condições listadas em Fig. 3.1.(4), a descrita em (d) foi considerada a norteadora da escolha, uma vez que ela representa efetivamente a situação de operação sob a qual se avalia a extinção do arco secundário.

Uma das proposições do método sugeria a investigação do menor valor absoluto da parte imaginária de $z_f(60\text{Hz})$ também como elemento indicador de soluções

potenciais. Entretanto, na avaliação dos resultados observou-se que seu comportamento não indicava, necessariamente, soluções convergentes com as apontadas pelos demais elementos de avaliação.

Cálculos

Os cálculos foram desenvolvidos no programa *Mathematica 5.1* e seus resultados mais relevantes encontram-se no Anexo 1.

Embora tenham sido computados resultados para dois valores de carga - normal e pesada (20% superior a normal) - observou-se que, embora $z_f(60\text{Hz})$ apresentasse valores próximos para as duas condições de carga, para carga pesada ele se mostrou ligeiramente mais desfavorável.

Dessa forma as Tabelas 3.1 e 3.2, apresentadas a seguir, reportam somente os resultados para a condição de carga mais severa.

A Tabela 3.1 destaca os valores para a impedância equivalente a frequência industrial em diversos pontos de defeito ($z_f(60\text{Hz})$), bem como seus respectivos valores de compensação em derivação indicados pelo chamado **Critério 1** adotado, para carga pesada.

A Tabela 3.2 destaca algum dos valores mais significativos para as observações gerais declaradas no item a seguir, na análise dos resultados.

Tabela 3.1 – Resultados indicados pelo Critério 1

Local de ocorrência de defeito monofásico	Condição de operação dos DJ's da LT aos terminais	Impedâncias a 60 Hz (Ω)		
		$(Z_f(60\text{Hz}))$	Reator de Linha (x_L)	Reator de Neutro (x_N)
Terminal emissor da linha	fase sob defeito ainda fechada	1,32873 + 19,5055 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE com fase defeituosa aberta	206,254 + 159,777 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE e TR com fase defeituosa aberta	165596, + 27341,5 i	4,55015 + 1365,05 i	3,19695 + 799,237 i
1/6 do comprimento da linha distante do Terminal emissor	fase sob defeito ainda fechada	6,06125 + 34,658 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE com fase defeituosa aberta	228,45 + 135,41 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE e TR com fase defeituosa aberta	168194, + 27168,1 i	4,55015 + 1365,05 i	3,19695 + 799,237 i
Meio da linha	fase sob defeito ainda fechada	12,6145 + 52,6361 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE com fase defeituosa aberta	166,619 + 127,134 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TR com fase defeituosa aberta	13,851 + 70,3562 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE e TR com fase defeituosa aberta	170328, + 26978,5 i	4,55015 + 1365,05 i	3,19695 + 799,237 i
1/6 do comprimento da linha distante do Terminal receptor	fase sob defeito ainda fechada	14,8791 + 53,3697 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TR com fase defeituosa aberta	20,3954 + 91,3663 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE e TR com fase defeituosa aberta	168312, + 27021,4 i	4,55015 + 1365,05 i	3,19695 + 799,237 i
Terminal Receptor da Linha	fase sob defeito ainda fechada	14,4261 + 47,3187 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE com fase defeituosa aberta	206,254 + 159,777 i	5,92027 + 1776,08 i	7,10433 + 1776,08 i
	TE e TR com fase defeituosa aberta	168312, + 27021,4 i	4,55015 + 1365,05 i	3,19695 + 799,237 i

Legenda :

TE : terminal emissor **TR :** terminal receptor

$Z_f(60\text{Hz})$: Impedância equivalente vista do ponto de defeito, a frequência industrial (60 Hz)

derivação com reator de neutro de valor ôhmico igual ao reator de linha ($X_N/X_L=1$). Destaca-se que as duas soluções apontadas representam os extremos considerados para variação da compensação nos cálculos desenvolvidos.

4. No cômputo geral dos resultados Anexo 1 foram apresentados os cálculos também para as condições opostas do que se deseja para $z_f(60\text{Hz})$, uma vez que elas caracterizam situações excludentes quanto à seleção de soluções.

5. Observa-se na condição de uma fase aberta em ambas extremidades, onde efetivamente tem-se o arco secundário, que *o valor mínimo da parte imaginária de $z_f(60\text{Hz})$ ($\text{Im}[z_f(60\text{Hz})]$), ou seja, seu maior valor negativo absoluto (não se trata do menor módulo de $\text{Im}[z_f(60\text{Hz})]$), ocorre para uma compensação em derivação próxima do valor para compensação apontada como ótima pelos critérios adotados. Vale lembrar que o valor mínimo de $\text{Im}[z_f(60\text{Hz})]$ não corresponde ao seu menor valor em módulo, podendo de fato representar uma reatância capacitiva elevada, o que contraria a condição almejada de se ter a menor reatância possível.*

5.1. Em termos de valores, o que se apresenta é valor mínimo de $\text{Im}[z_f(60\text{Hz})]$ para compensação em derivação de 53,2% com $X_N/X_L=0,3$, $z_f(60\text{Hz})$ com módulo variando de 114616 Ω a 117672 Ω , consoante o ponto de defeito considerado, com comportamento predominantemente capacitivo. Ressalta-se que a solução final indicada representa uma compensação em derivação de 52%, com $X_N/X_L=0,59$ e módulo de $z_f(60\text{Hz})$ variando de 167838 Ω a 172451 Ω , consoante o ponto de defeito, com comportamento predominantemente resistivo. No Anexo 1 (págs. A1-15 a A1-74) também encontram-se os valores e gráficos para as diversas condições de operação relacionadas a manobra manofásica, adotando-se essa solução.

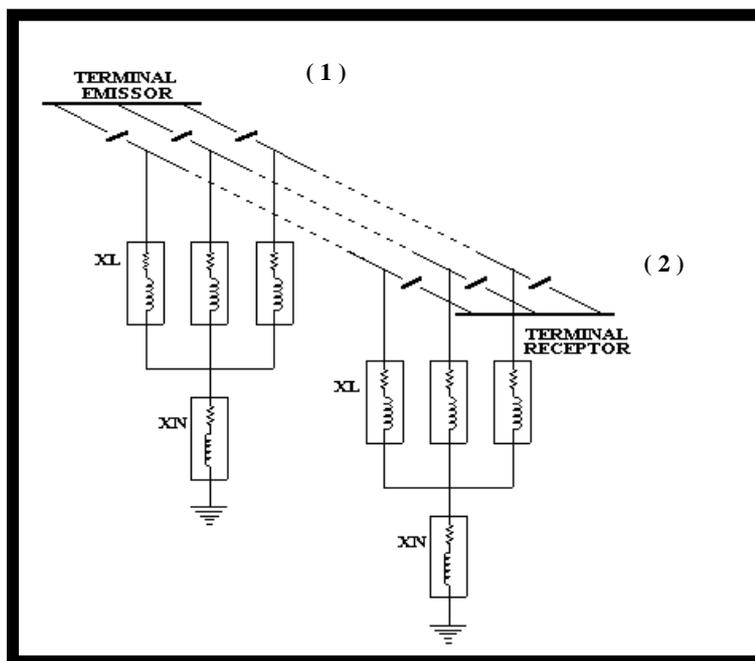
6. Na tabela 3.1 são apresentados os valores de $z_f(60\text{Hz})$ e os respectivos pares de valores de reatores de linha e de neutro para diversas condições de defeito monofásico e de manobra, tendo como referência os parâmetros de análise do **Critério 1**. Para a etapa seguinte de cálculo, onde são verificadas correntes e tensões prospectivas do arco secundário, tensão induzida na fase aberta, dentre outros parâmetros, considerou-se um valor de referência para compensação em derivação com uma variação de $\pm 20\%$, sendo esse valor escolhido a partir do **Critério 1**.

Critério 2 : Verificação dos valores prospectivos, em frequência industrial da corrente de arco secundário, tensão induzida na fase aberta e TRT de arco para valores de compensação indicados pelo **Critério 1**.

Uma vez indicada a compensação em derivação a partir do **Critério 1**, procedeu-se com os cálculos propostos nos **Critérios 2 e 3**, fazendo uma varredura no entorno dessa “compensação ótima”. Para tal análise variou-se ainda a distribuição total da compensação nas extremidades da LT, tornando a compensação em derivação nos terminais ora idênticas, ora distintas.

Com este cálculo foi possível indicar o melhor conjunto provável de reatores, por comparação direta entre os valores considerados, qual seja:

- o 52% de compensação em derivação, com reatores de linha igualmente dimensionados em ambas extremidades, aterrados através de reatores de neutro de 800Ω , conforme apresentado na Fig. 3.1.(5).



Reator de Linha : $X_L = i 1365 \Omega$, a 60 Hz ($X/R = 300$) (202 Mvar / 525 kV, em cada extremidade)

Reator de Neutro : $X_N = i 800 \Omega$, a 60 Hz ($X/R = 250$)

Figura 3.1.(5) – Representação do esquema de compensação em derivação escolhido

Critério 3 : Análise do efeito da compensação reativa indicada pelos **Critérios 1 e 2** no perfil de tensão da linha. A tensão nas extremidades da LT em vazio deverá ser moderada em condições normais de operação.

No Anexo 1 são apresentados alguns resultados dessa análise. Não foram observados valores que restringissem a utilização de qualquer reator dentre os três avaliados.

3.2. Estudos de Regime Transitório para implementação do Religamento Monofásico

Considerando que a extinção do arco secundário é a informação mais relevante para que se garanta o sucesso do religamento monofásico, é nos estudos de transitórios eletromagnéticos que se avalia de maneira mais objetiva as condições de extinção, mais precisamente, se a extinção provavelmente ocorrerá ainda no intervalo de tempo desejado, o chamado “tempo morto”, imposto pela rede, determinado em estudos de sistema.

Nos estudos de regime transitório são definidas ainda as características e requisitos elétricos de equipamentos, dispositivos ou métodos facilitadores da extinção do arco secundário que eventualmente se façam necessários.

Ainda que os estudos de regime transitório sejam a principal ferramenta de análise da extinção do arco secundário, é indicado o desenvolvimento de alguns cálculos prévios em regime permanente para nortear as contingências a serem efetivamente avaliadas sob a ótica do regime transitório, agilizando assim a evolução do estudo como um todo.

Dessa forma, podemos sintetizar que, em linhas gerais, as simulações em regime permanente e em regime transitório têm os seguintes objetivos:

- **Regime permanente:** indicar possíveis soluções e as piores contingências a serem analisadas em regime transitório, além de fornecer valores em regime sustentado para especificação de eventuais equipamentos adicionais, tal como reator de neutro ou chave de aterramento rápido, cuja instalação está associada à necessidade de se garantir a extinção do arco secundário dentro de um tempo morto pré-estabelecido;

- **Regime transitório:** análise da extinção do arco secundário (sucesso do religamento) e definição das características elétricas transitórias dos eventuais dispositivos associados.

De uma forma geral, num estudo de Religamento Monopolar as grandezas analisadas referem-se àquelas que advêm do acoplamento entre fases e surgem principalmente como consequência da manobra desbalanceada, podendo alcançar valores extremamente elevados caso se atinja alguma condição de ressonância, colocando nesse caso o isolamento dos componentes envolvidos sob risco de falha. Essas grandezas são :

- Tensão induzida na fase aberta (caso particular de Indução em Linhas Paralelas).
- Tensão e corrente impostas aos dispositivos adicionais.
- Corrente de Arco Secundário e sua duração.
- Energia nos pára-raios, principalmente daqueles instalados no neutro dos reatores (para proteção do reator de neutro, quando essa solução é adotada).

3.2.1. Critérios de estudos tradicionalmente utilizados

Critérios confiáveis de análise são requisitos fundamentais para qualquer tipo de estudo. No caso do planejador de sistemas de potência, em que o religamento monofásico está em pauta, a demanda principal se refere a metodologias de análise da extinção do arco secundário, uma vez que esse fenômeno define o sucesso da manobra.

O que se observa é que a grande maioria dos métodos de análise refere-se a condições de extinção em uma cadeia de isoladores, desprezando a interação arco-rede.

Quanto à evolução dos critérios, os mais antigos, extremamente conservativos, têm por base a adoção de limites para a corrente de arco secundário com valores baixos, como apresentados na Tabela 3.3. Na evolução dos critérios, apareceram aqueles que além da corrente de arco passaram a considerar também a tensão, como o apresentado

na Fig. 3.2.(1), embora ainda não caracterizem adequadamente o arco e a interação arco-rede.

No item 3.2.1.(A) são apresentados os critérios tradicionais mais adotados no Brasil, sendo seus empregos inclusive indicados pela ANEEL.

Na sequência, é apresentado um exemplo de estudo ilustrando a utilização de tais critérios.

3.2.1.(A) Critérios Gerais de Análise

1. Limites das Grandezas Analisadas

A escolha da melhor solução a ser adotada, ou mesmo a definição de eventuais restrições de manobra a serem apontadas, é pautada nos limites adotados das principais grandezas analisadas num estudo de religamento monofásico. Tais grandezas estão relacionadas ao arco secundário propriamente dito (tensão, corrente e tempo morto), e àquelas que se destacam sob condição de operação desbalanceada da LT, como tensão e corrente induzidas na fase aberta, e tensão e corrente no neutro de eventual compensação em derivação (com aterramento por impedância).

Os valores adotados então como limítrofes das grandezas sob análise são estabelecidos principalmente em estudos de coordenação de isolamento, para aqueles que se referem à LT e equipamentos associados, enquanto que para o arco os valores são definidos pelo que se estabeleceu a partir de resultados experimentais, já amplamente divulgados no passado.

Para o presente estudo comparativo, tais valores são apresentados a seguir. Eles tiveram como base valores normalmente adotados por concessionárias brasileiras.

- ◆ Tensão Induzida na fase aberta (fase-terra) :

1.1 p.u. da tensão de operação do sistema

- ◆ Tensão no Neutro dos Reatores de Linha (para LTs com compensação em derivação):

72.5 kV

- ◆ Energia nos PR's do Neutro dos Reatores de Linha (para LTs com compensação em derivação) :

756 kJ (para 108 kV de rating)

Embora os parâmetros apresentados acima não estejam diretamente associados ao arco, ressalta-se que as grandezas referentes ao neutro dos reatores de linha acabam por representar também parâmetros para determinação das características elétricas de eventuais equipamentos instalados para aterramento do neutro com o intuito de promover a extinção do arco secundário. Eventualmente, pode-se pensar em pequenas alterações nesses valores a fim de facilitar a implementação do religamento monofásico, como por exemplo, uma tensão de neutro um pouco mais elevada, permitindo assim a instalação de impedâncias de aterramento da compensação em derivação (como reatores de neutro) superiores, elevando assim também o *rating* dos pára-raios a serem adotados.

Os parâmetros a seguir referem-se diretamente ao arco.

- ◆ Corrente de Arco Secundário :

50 A

- ◆ Extinção do Arco Secundário :

Para análise da extinção do arco secundário serão apresentados os critérios determinados e aceitos atualmente pela ANEEL, conforme apontado em seus relatórios de estudos prévios apresentados nos editais de leilão dos últimos empreendimentos em transmissão (vide exemplo em [16]).

2. Critérios para Análise da Extinção do Arco Secundário Recomendados pela ANEEL

CRITÉRIO 1 (ANEEL):

Utilização de uma curva (Fig. 3.2.(1)) obtida em laboratório - ***Corrente de Arco x Primeiro pico da TRV da chave que simula a falta*** – pela qual se estima se haverá ou não extinção do arco secundário em até **500 ms** (tempo morto considerado nos testes para levantamento da curva).

O emprego da referida curva implica em ser condição imperativa que o par de pontos do ***último pico da corrente de arco secundário x primeiro pico da TRT da chave que simula a falta*** em regime transitório, ao fim de um tempo morto de 500 ms, se situe dentro da zona de provável extinção do arco, conforme ilustrado na Fig.3.2.(1).

O arco é representado através de uma chave, como um curto franco. É possível ainda representá-lo por uma chave em série com uma resistência de algumas dezenas de Ohms. O valor mais comumente utilizado para essa resistência é 50Ω .

O texto a seguir reporta tal como a ANEEL espera que essa curva seja considerada.

Primeiramente, devem ser investigadas as condições de arco secundário sem a utilização de quaisquer dispositivos que promovam sua extinção. Uma vez que se observe a improbabilidade de extinção do arco secundário no transcorrer de 500 ms, os estudos deverão considerar ainda o emprego dos chamados “meios convencionais” para mitigação do arco. Como “meios convencionais”, a ANEEL entende equipamentos de aterramento dos reatores de linha, no caso de linhas com compensação em derivação, como reatores de neutro.

É possível ainda a adoção de outros dispositivos/métodos para promoção da extinção do arco secundário, desde que se constate que os meios convencionais não se mostrem adequados, mesmo levando-se em consideração o **Critério 2**, explicitado a seguir, no qual, consoante a corrente de arco secundário, são considerados tempos mortos mais elevados, devendo ainda o dispositivo proposto se mostrar “tecnicamente e financeiramente aceitável”.

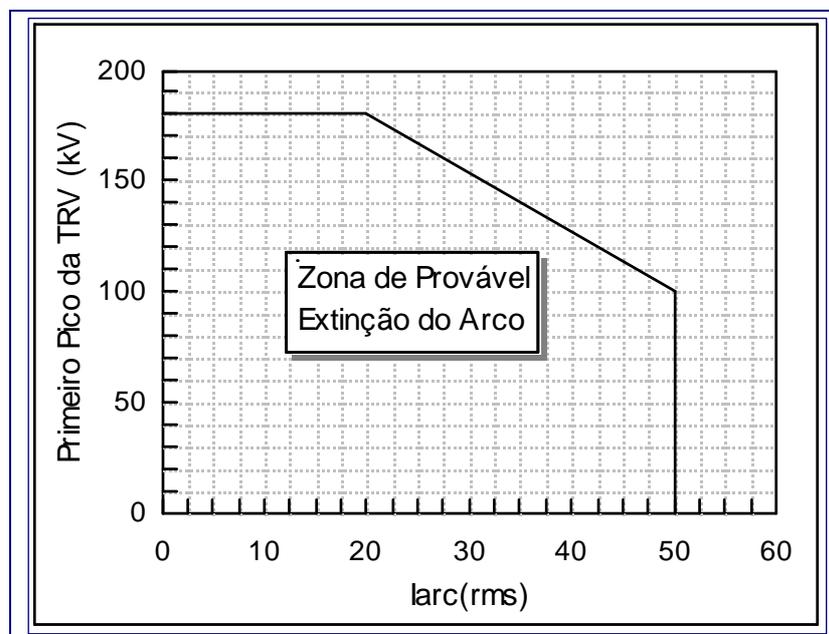


Figura 3.2.(1) - Curva de referência para análise da extinção corrente de arco secundário, considerando-se tempo morto de 500 ms

CRITÉRIO 2 (ANEEL):

Para tempo morto superior a 500 ms, utiliza-se a curva apresentada na Figura 3.2.(2), que relaciona o tempo morto para extinção do arco com o último pico da corrente de arco, da seguinte forma proposta, conforme texto extraído de um edital da ANEEL [16]:

(...) A TRANSMISSORA deve refazer os estudos de transitórios de forma a viabilizar o menor valor possível de corrente de arco, utilizando, inicialmente, apenas os meios de mitigação convencionais. Caso estes não se mostrem suficientes, outros meios de mitigação poderão ser considerados. Em qualquer caso, os tempos mortos a serem considerados nos ajustes para definição do tempo para religamento do disjuntor devem ser aqueles definidos pela curva da Figura 5 (*aqui Fig. 3.2.(2)*) para a corrente encontrada;

Nessa avaliação, devem ser consideradas, preferencialmente, soluções de engenharia que não demandem equipamentos que requeiram fabricação especial.

Nos casos em que os tempos mortos definidos de acordo com a alínea a acima forem iguais ou superiores a 1,75 segundos, a TRANSMISSORA deve avaliar a viabilidade técnica da adoção de medidas de mitigação não usuais, tais como chaves de aterramento rápido, entre outras, procurando o menor tempo morto possível, sem exceder 1,75 segundos.

Notas:

(a) Quando da adoção de chaves de aterramento rápido a extinção do arco pode ocorrer mesmo com correntes mais elevadas que as indicadas nesse critério. Nesse caso, a TRANSMISSORA deve demonstrar a extinção do arco, de forma independente da Figura 5 (*Fig. 3.2.(2)*).

(b) A adoção de solução que demande tempo morto superior a 500 ms fica condicionada à demonstração, pela TRANSMISSORA, por meio de estudos dinâmicos, que a mesma não compromete o desempenho do SIN. (...)

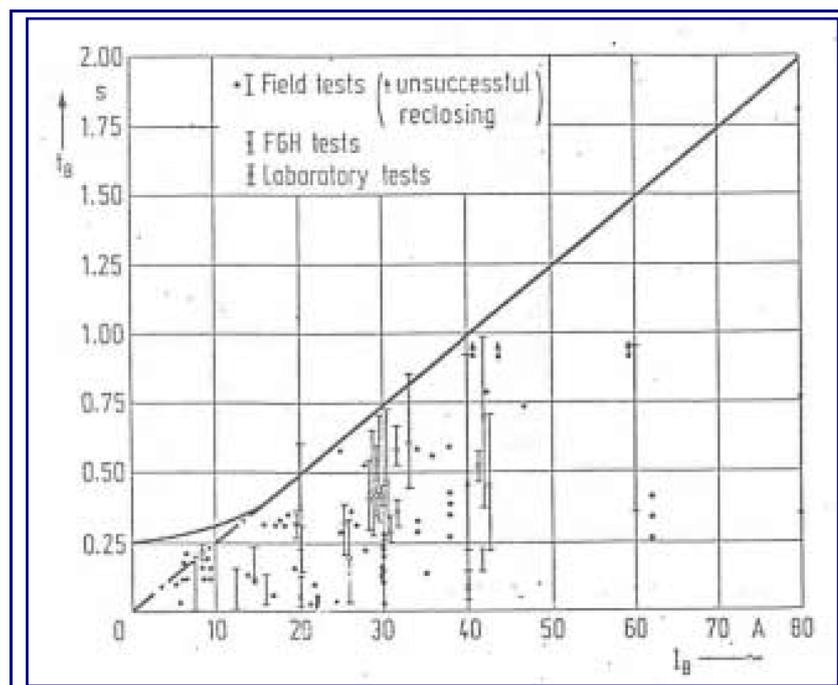


Figura 3.2.(2) - Curva de referência: tempo morto para extinção do arco secundário x valor eficaz da corrente de arco secundário, para tensões até 765 kV.

CRITÉRIO ALTERNATIVO :

Em [16] é citado um critério alternativo adotado pela ELETROSUL, conforme trecho transcrito a seguir .

(...) Para as correntes de arco secundário permissíveis, para a extinção do arco secundário nas linhas de transmissão, utilizou-se a Tabela abaixo (Tabela 3.3), de uso corrente pela Eletrosul, que reflete a experiência prática obtida na região Sul, desde a implantação do sistema de 525 kV da Eletrosul. (...)

Tabela 3.3 - Condições Alternativas para Extinção de Arco Secundário

VIABILIDADE DO RELIGAMENTO	FAIXA DE CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO (A_{RMS})	TEMPO MORTO DE RELIGAMENTO ASSOCIADO (s)
<i>Sim</i>	$I < 20,0$	$T_M = 0,5$
<i>Sim</i>	$40,0 < I < 60,0$	$1,0 < T_M < 1,5$
<i>Sim</i>	$60,0 < I < 80,0$	$T_M = 1,5$
<i>Não</i>	$I > 80,0$	-

3.2.1.(B) Descrição e Análise dos casos simulados

A LT considerada tem aproximadamente 360 km entre os terminais 1 e 2, havendo previsão de seccionamento posterior à sua entrada em operação através de uma SE intermediária a 268 km do Terminal 1.

O seccionamento acaba por ser um elemento favorável, uma vez que transforma uma LT de algumas centenas de km em dois trechos mais curtos, e por conseguinte, mais favoráveis à extinção do arco secundário. Assim, eventuais equipamentos dimensionados para entrada em operação da LT com religamento monofásico podem se tornar desnecessários após seu seccionamento.

Os casos simulados para análise da extinção do arco secundário, conforme os critérios apontados pela ANEEL, foram desenvolvidos no ATP e não levam em consideração os parâmetros da LT em função da frequência.

A análise dos valores limítrofes para as tensões prospectivas induzidas na fase aberta e de neutro foram verificadas no Mathematica 5.1, onde se tem a LT representada com seus parâmetros em função da frequência. (Obs : *Embora não seja usual essa representação nos estudos “tradicional”, seu emprego aqui visa assegurar, independentemente da filosofia de análise ilustrada, não haver possíveis ressonâncias nas condições apresentadas na manobra monofásica.*)

Foram feitas manobras de abertura monopolar com e sem curto, com variação do aterramento dos reatores de linha, para uma faixa de frequência de $58 \text{ Hz} < f < 62 \text{ Hz}$, a fim de se pesquisar se haveria dentro dos limites operativos de frequência alguma ressonância.

Dados do Exemplo :

A LT trifásica em 525 kV usada como referência neste exemplo (LC1) possui 360 km de extensão (Fig.3.2.(3)), 4 condutores por fase, com transposições em trechos subsequentes de 1/6, 1/3, 1/3 e 1/6 de sua extensão, com mesma seqüência de rotação de fases em cada transposição (Fig. 3.1.(2)).

Parâmetros unitários e demais características elétricas básicas da linha, para frequência de 60 Hz e hipótese da linha ser considerada idealmente transposta :

Parâmetros Unitários de Seqüência Direta :

$$y_d = i 5,6172 \mu\text{S/km a } 60 \text{ Hz}$$

$$z_d = 0,0179 + i 0,2973 \Omega/\text{km a } 60 \text{ Hz}$$

Parâmetros Unitários de Seqüência Homopolar :

$y_h = i 3,0536 \mu\text{S}/\text{km}$ a 60 Hz

$z_h = 0,374 + i 1,4242 \Omega/\text{km}$ a 60 Hz

Impedância Característica:

$z_c = 230 \Omega$

Potência Característica :

$S_c = 1198 \text{ MVA}$

A linha possui compensação em derivação de 150 Mvar em cada uma das extremidades T1 e T2.

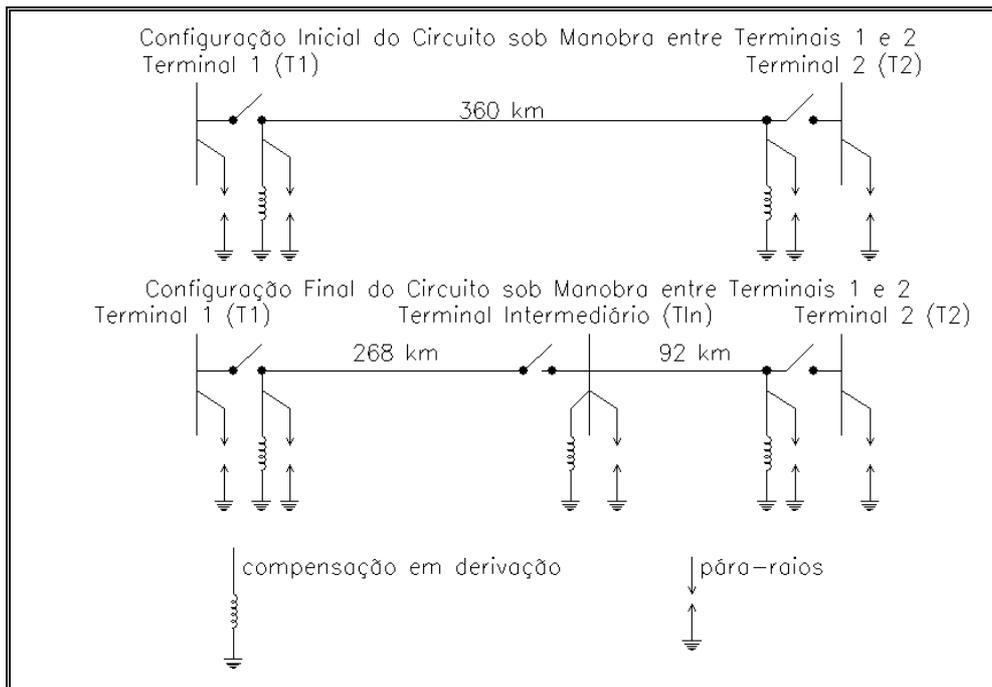


Figura 3.2.(3) - Representação Esquemática da LT sob manobra – Configuração Inicial e Final (Pós-seccionamento).

1) Casos simulados em Regime Permanente

Os casos simulados em regime permanente aqui apresentados visam, principalmente, nortear o estudo transitório indicando as condições a serem efetivamente investigadas.

A) Localização do pior ponto de ocorrência de falta monofásica, para cada trecho.

Foi feito o levantamento do pior ponto de ocorrência de falta monofásica ao longo da LT, ou seja, o local de defeito que apresentasse os maiores valores de corrente de arco secundário, tensão induzida e tensão no neutro, a fim de se direcionar as avaliações da LT sob falta para a pior condição. Os resultados estão apresentados no

Anexo 2-1. A partir desses resultados, definiu-se, para cada trecho, os principais pontos para aplicação de falta.

De maneira geral, o defeito monofásico em Terminal 1 mostrou ser a pior situação para extinção do arco secundário, condição essa comprovada também na avaliação dos resultados do Anexo 2-2, que retratam o Critério 1 da ANEEL.

A Tabela 3.4 sintetiza os valores da condição de operação que apresentou os valores mais severos, para as diversas localizações de defeito.

Tabela 3.4 - *Corrente de Arco Secundário e Tensão Induzida nas Extremidades da Fase Aberta (Regime Permanente, Freqüência Fundamental (60 Hz))*

<i>LT Terminal 1 - Terminal 2 , Circuito 1 fora de operação</i>			
<i>Fluxo na LT Terminal 1 - Terminal 2 (Circuito 2): 1200 MW / Ano 1</i>			
<i>Local do Defeito</i>	<i>VT1 (kVef)</i>	<i>VT2 (kVef)</i>	<i>Iarco (Aef)</i>
Terminal 1 (T1)	0,94	71,99	94,04
a 5km de T1	1,60	70,01	89,69
a 44,67 km de T1	11,20	61,94	89,10
a 89,05 km de T1	21,59	51,66	87,30
a 134,05 km de T1	31,59	41,90	84,80
a 151,05 km de T1	34,96	37,93	84,92
a 179,55 km de T1 (*)	39,99	31,83	83,18
a 222,88 km de T1	47,77	22,64	80,76
a 262,55 km de T1	55,35	15,97	81,87
A 267,55 km de T1 (**)	55,84	15,63	82,06
a 86 km de T2	56,45	15,19	82,28
a 75,83 km de T2	58,56	13,42	82,54
a 70 km de T2	59,78	12,20	82,48
a 45,5 km de T2	64,34	7,53	82,20
a 15,17 km de T2	69,26	1,32	81,42
a 5 km de T2	71,15	0,42	81,89
Terminal 2 (T2)	71,64	0,82	82,17

Obs :

(*) meio da LT
T1 : Terminal 1
VT1 : Tensão Induzida em T1

(**) Terminal Intermediário
T2 : Terminal 2
VT2 : Tensão Induzida em T2

Nesses casos não foram considerados quaisquer dispositivos de mitigação do arco secundário.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.4 identifica-se o curto-circuito no Terminal 1 como o que apresenta os valores mais elevados de corrente de arco secundário e tensão induzida na fase aberta, sendo portanto o pior local de defeito para efeitos de análise do arco secundário.

B) Definição do Aterramento dos Reatores de Linha

À priori, calcularam-se valores de reatores de neutro que não comprometessem os valores máximos admissíveis de regime permanente para corrente de arco secundário, tensão no neutro dos reatores de linha e tensão induzida na fase aberta. Tais resultados encontram-se no Anexo 2-3.

As condições de operação e contingências consideradas foram :

❖ Ano 1 : Carga Pesada

- Defeito Monofásico no Terminal 1 (T1)
- Defeito Monofásico no meio da LT
- Defeito Monofásico em Terminal 2 (T2)

❖ Ano 2: Carga Pesada, Circuito 1 fora de operação

- Defeito Monofásico no Terminal 1
- Defeito Monofásico no Terminal Intermediário (TIn) (LT T1 – Tin)
- Defeito Monofásico em Tin (LT T2 – Tin)
- Defeito Monofásico no Terminal 2

Para esta análise preliminar em regime permanente foram considerados todos os reatores de LT com o mesmo tipo de aterramento: aterramento sólido, ou, através de reatores de neutro.

Posteriormente, na análise transitória considerou-se ainda o aterramento dos reatores através de pára-raios, o que caracteriza uma condição de neutro isolado em regime permanente.

Uma vez verificado, a partir dos resultados do Anexo 2-1, ser o defeito monofásico no Terminal 1 a pior situação para extinção do arco secundário (condição essa comprovada também na avaliação sob regime transitório, cujos resultados se

encontram no Anexo 2-2), adotou-se como estratégia de estudo a busca de uma gama de soluções para tal contingência.

No Anexo 2-3 são apresentados os resultados de tais avaliações preliminares, em regime permanente. A Tabela A2.3-1 apresenta os valores encontrados para 60 Hz, assim como os oscilogramas do referido anexo de A2.3-1 a A2.3-3 ilustram graficamente a variação da corrente de arco secundário, a maior tensão induzida na fase aberta durante o arco, e a tensão no neutro dos reatores em função da variação dos reatores de neutro.

Os oscilogramas A2.3-4 a A2.3-6 representam os mesmos gráficos, considerando a frequência variando de 58 Hz a 62 Hz, a fim de se verificar a existência de alguma condição desfavorável em torno da frequência fundamental, com a intenção de cobrir tolerâncias quanto à frequência de operação do sistema.

C) Regime Permanente da Configuração Final

Foram realizadas simulações em regime permanente após definição da configuração final, a fim de se estabelecer os valores em regime normal de operação a serem adotados para fins de especificação do reator de neutro. Tais resultados encontram-se no Anexo 2-5.

Em regime normal de operação (sem falta), a frequência fundamental (60Hz), as correntes e tensões de neutro apresentaram valores extremamente baixos, sendo os maiores valores encontrados de 0,107 Aef e 0,115 kVef, no Terminal Intermediário.

Considerando a operação sob abertura monopolar (caso particular de indução em linhas paralelas), sem falta, o maior valor encontrado de tensão sustentada no neutro de curta duração (associada ao tempo morto de 0,5 s) foi de 72,5 kVef. Os resultados dos casos simulados nessa avaliação encontram-se no Anexo 2-5.

II) Regime Transitório

As simulações em regime transitório consistiram basicamente na avaliação do arco secundário quanto à sua extinção e valores a serem adotados na especificação dos reatores de neutro e pára-raios associados aos neutros.

De um modo geral, as simulações representaram aplicação de falta monofásica em um instante t , abertura das extremidades da fase sob falta 60 ms após a aplicação da falta, com tempo morto de 500 ms (abertura da chave que representa a falta, seguida do religamento da fase aberta).

A) Análise da Extinção do Arco Secundário

A partir da gama de reatores de neutro estabelecida em regime permanente como prováveis soluções, verificou-se a extinção do arco secundário, preferencialmente de acordo com o critério denominado Critério 1. Vale ressaltar que foram ainda considerados os reatores “aterrados” através de pára-raios, ou seja, isolados em regime permanente.

A localização das faltas nas LT's seguiu o indicado na avaliação prévia em regime permanente (Anexo 2-1). A fim de se buscar os piores resultados, procurou-se o pior instante de aplicação da falta, ou seja, aquele que provoca o maior “off-set” na corrente de arco. Esse “off-set” caracteriza uma maior dificuldade de extinção do arco secundário, uma vez que compromete sua passagem pelo zero.

Os resultados estão apresentados nas figuras do Anexo 2-2, que indicam claramente a necessidade da adoção de medidas adicionais para garantir a extinção do arco secundário para o trecho T1-TIn. A LT TIn – T2, não necessita de qualquer dispositivo, restrição ou medida adicional para se garantir a extinção do arco secundário em até 500 ms de tempo morto.

As condições e contingências consideradas foram:

❖ **Ano 1** : Carga Pesada

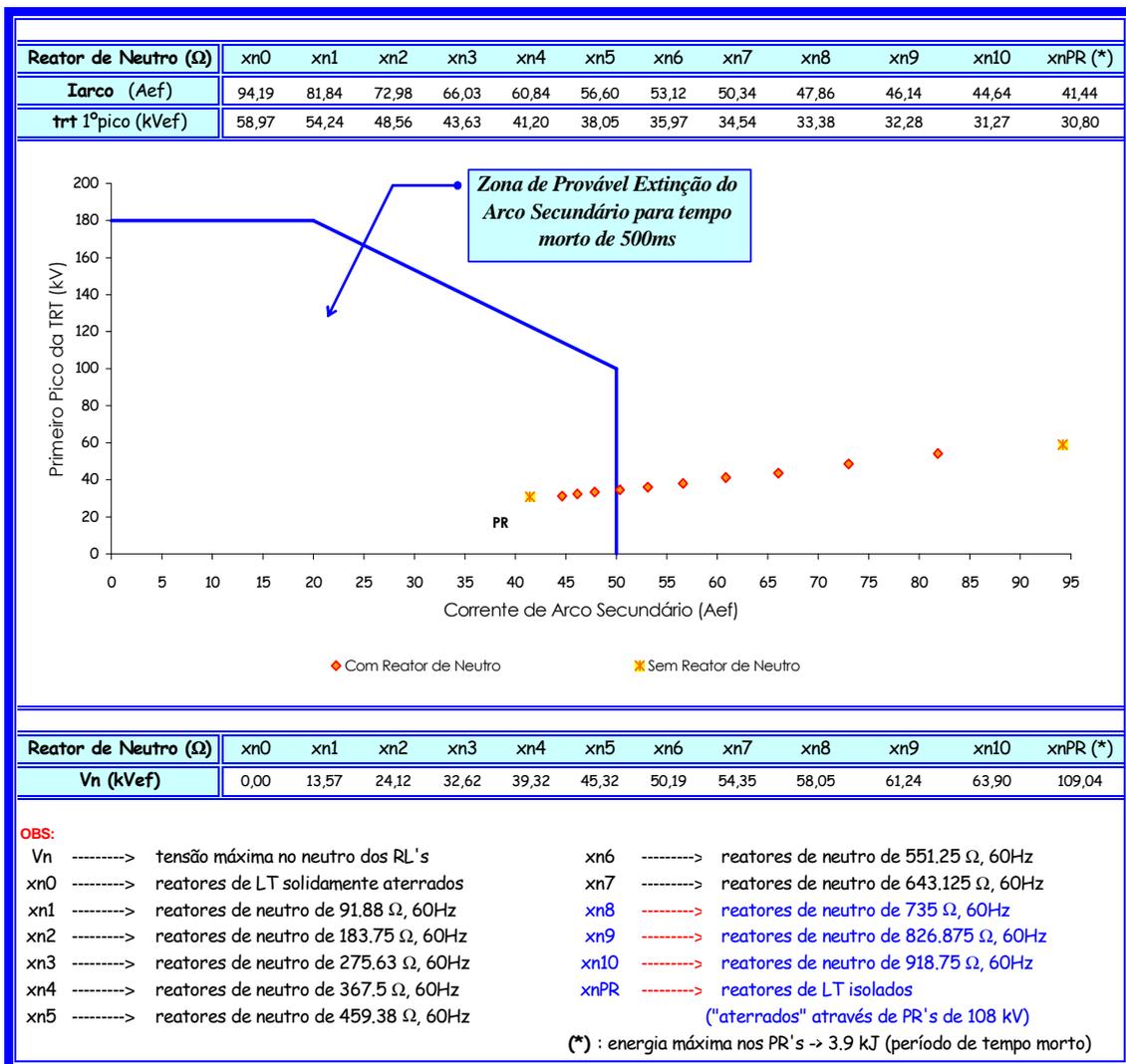
- Defeito Monofásico no Terminal 1 (T1)
- Defeito Monofásico no meio da LT
- Defeito Monofásico no Terminal 2 (T2)

❖ **Ano 2**: Carga Pesada, Circuito 1 fora de operação

- Defeito Monofásico no Terminal 1
- Defeito Monofásico no Terminal Intermediário (TIn) (LT T1 – TIn)
- Defeito Monofásico no Terminal Intermediário (LT T2 – TIn)
- Defeito Monofásico no Terminal 2

As figs. A2-1 a A2-7 apresentam os resultados correspondentes às condições citadas acima, sem qualquer dispositivo de mitigação da corrente de arco secundário. Para o ano 2 considerou-se ainda o reator manobrável de Terminal intermediário fora de operação.

Na fig. 3.2.(4) (Fig. A2-8) são apresentados os resultados em regime transitório, para o ano 1, utilizando-se os reatores de neutro apontados nos estudos de regime permanente como soluções potenciais, de acordo com os limites adotados como critério para as grandezas aferidas.



Obs: Destacados em azul os valores que se encontram dentro da curva limítrofe adotada como critério em regime transitório.

Figura 3.2.(4) - Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL - Contingência : Defeito Monofásico em T1 - Ano 1- Variação dos Reatores de Neutro

Na figura A2-9 são apresentados os resultados para os reatores de neutro, que dentre os apontados em regime permanente para o ano 1, apresentaram resultados satisfatórios também para regime transitório (Critério 1) conforme pode ser observado na própria figura A4.2-12, para o ano 2, restringindo assim a gama de aterramento do neutro para reatores entre 735 Ω e 918,75 Ω . Estão representados também os pares de ponto das condições extremas de aterramento dos reatores de linha, quais sejam, neutro solidamente aterrado e aterrado através de pára-raios (para efeitos comparativos).

Ressalta-se a questão de se determinar restrições ou soluções a partir de um critério, como o Critério 1, estabelecido em condições específicas mas extrapolado para uso generalizado sem a devida verificação de sua aplicabilidade de forma “irrestrita”.

Os oscilogramas encontram-se no Anexo 2-4.

Apresentação dos Cálculos e Resultados

Os resultados dos cálculos mencionados encontram-se no Anexo 2 e seus subanexos.

3.2.1.(c) Conclusões

A metodologia de estudo e os critérios sugeridos pela ANEEL ilustram as limitações decorrentes da ausência de informações mais precisas para representação do arco secundário, cuja extinção dentro do tempo morto pré-estabelecido é a questão norteadora dos estudos para implementação do religamento monofásico.

O caráter conservativo, ou ainda impreciso, evidencia-se ao observarmos as recomendações quanto à utilização dos Critérios 1 e 2 sugeridos pela ANEEL. A utilização do Critério 2 está atrelada ao não atendimento do Critério 1, o que significa arcos secundários de valores a partir de 50 A. Pelo Critério 1 (Fig.3.2.(1)), correntes de arco secundário até 50 A extinguem-se dentro de um tempo morto de 500 ms – desde que os valores de tensão de restabelecimento do arco estejam também dentro dos limites da curva. Para o Critério 2 (Fig.3.2.(2)), o mesmo valor de 50 A sugere agora um tempo morto mínimo de 1250 ms !

Comparando-se os exemplos apresentados de uma linha em que o religamento monofásico é considerado ainda na concepção do feixe de condutores (LNC1) e uma linha convencionalmente projetada (LC1), em que o arco secundário é estudado

posteriormente à determinação de suas características construtivas, observa-se que embora ambas possuam 4 condutores por fase, LNC1 tem uma potência característica maior cerca de 25%, sendo ainda mais extensa cerca de 11%, o que não impede que com níveis de compensação semelhantes (LNC1 com 52% e LC1 com 54%) e mesmo reator de neutro, também seja possível o religamento monofásico. Em termos de custos unitários (por quilômetro) a implementação do religamento monofásico apresenta um custo menor para a linha mais longa, que ainda tem maior capacidade de transmissão. Num estudo mais refinado, poder-se-ia ainda apontar outras soluções.

Estudos mais precisos também devem considerar a representação da linha no domínio da frequência. A diversidade e complexidade dos fenômenos envolvidos sugere que o arco seja representado ao menos com duas constantes de tempo, sendo a menor delas da ordem de 10^{-6} segundos, o que justifica ter a linha representada para frequências até a ordem de 10^6 Hz (MHz).

Assim, o emprego de critérios e metodologias muito generalizadas distanciam o projeto de soluções otimizadas, ou ainda, pode conduzir a soluções equivocadas.

3.3. Linhas Não-Convencionais e Religamento Monofásico

Linhas projetadas com conceitos e filosofias como “Torre Compacta”, “Linha de Potência Natural Elevada (LPNE)” ou feixe expandido, “Transmissão em Meia-Onda+”, dentre outros, acabaram por incitar o surgimento de uma denominação comum a todos aqueles projetos que distam da simetria e métrica tradicional – *a LT Não-Convencional*.

Para tais projetos diferenciados, que fogem das simplificações normalmente aplicáveis aos projetos tradicionais, podemos destacar com relação ao religamento monofásico:

- ❖ Linhas com Torres Compactas: tais linhas, em função da aproximação dos condutores, possuem um maior acoplamento capacitivo entre fases, o que reflete em maiores tensões induzidas na fase aberta e corrente de

arco secundário. Como usualmente possuem compensação reativa em derivação, o uso de reator de neutro (reator de 4 pernas) é uma solução indicada.

- ❖ Linha de Potência Natural Elevada : para a LPNE, cujo feixe é expandido, é interessante acrescentar a parametrização da corrente de arco secundário na determinação da disposição do feixe de condutores, podendo inclusive se dispensar equipamentos adicionais para implementação do religamento monofásico. No caso da linha ser compensada, pode-se também otimizar a compensação em derivação, considerando uma impedância de neutro (reator, resistor, pára-raios...) como aterramento dos reatores de linha (reator de 4-pernas).
- ❖ Transmissão em Meia-Onda+ : Embora a transmissão em meia-onda+ apresente para os transitórios de manobra de linha como energização, rejeição e religamento tripolar comportamento semelhante ao de linhas curtas, no caso do religamento monofásico surgem correntes de arco secundário elevadas. Soluções envolvendo o uso de eletrônica de potência parecem ser as mais indicadas, como a apontada em [17].

O Anexo 3 versa sobre a transmissão em muito longa distância, contexto onde se inclui a Transmissão em Meia-Onda+.

3.3.1. Transmissão em Muito Longa a Distância : a Meia-Onda+ e o Religamento Monofásico

Por Transmissão em Meia-Onda entenda-se *“Transmissão de Energia por Linhas com comprimento próximo ao equivalente à meia-onda a frequência fundamental”*.

Considerando que as linhas de transmissão em corrente alternada (CA) operam, normalmente, em frequências nominais de poucas dezenas de Hertz (50 Hz ou 60 Hz), com velocidade de propagação próxima à da luz (aproximadamente 3×10^5 km/s), pode-se dizer que os comprimentos de onda associados à transmissão em CA, em primeira aproximação, ficam entre 5000 km e 6000 km. Na verdade, considerando-se os valores

reais de velocidade propagação e as eventuais pequenas variações em torno da frequência fundamental, essa faixa pode ser discretamente “alargada” por algumas centenas de quilômetros em suas extremidades. Sendo assim, meio comprimento de onda equivaleria à uma faixa entre, aproximadamente, 2400 km e 3100 km.

A chamada transmissão em meia-onda refere-se então diretamente à distância de transmissão cuja quilometragem equivale a um valor aproximadamente igual à (em torno de) metade do comprimento de onda. Para frequência industrial igual a sessenta Hertz, como no sistema brasileiro, o comprimento de onda é algo em torno de 5000 km, ou seja, para meia-onda tem-se 2500 km.

Distâncias de transmissão com tal extensão não são usuais, e por isso ainda pouco estudadas, mas pela teoria de linhas da transmissão, para grande maioria dos fenômenos mais relevantes em sistemas de transmissão, seu comportamento se assemelha ao de uma linha curta. Os resultados do exemplo apresentado a seguir, ilustram essa afirmação. Dessa forma, uma linha com comprimento elétrico com pouco mais de meia-onda não necessita dos recursos normalmente utilizados para linhas longas, como pesadas compensações em derivação ou série. A recomendação da linha não ter exatamente meio comprimento de onda se deve ao fato de, exatamente em meio comprimento de onda, haver problemas de mudança de sinal da derivada, ou seja, temos um ponto singular o que acarreta diversos transtornos detectados como problemas de convergência nos métodos de solução de circuitos tradicionalmente utilizados.

Numa análise sucinta quanto ao comportamento transitório da linha em manobras de chaveamento convencionais, como energização, rejeição de carga e religamento tripolar, fica evidente, a partir das sobretensões encontradas, o comportamento semelhante ao de linhas curtas, dispensando até mesmo a compensação em derivação das extremidades – recurso comumente adotado nas linhas de transmissão médias e longas.

Quanto ao religamento monofásico, as correntes de arco secundário costumam apresentar valores bastante elevados – fazendo-se necessário o uso da engenharia na busca de soluções.

No exemplo apresentado a seguir, de uma linha com dimensões próximas ao comprimento de meia-onda (para 60 Hz), as Tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 ilustram o mencionado quanto ao comportamento semelhante ao de linhas curtas, apresentando os resultados mais relevantes encontrados nos estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra de linha, para energização, religamento tripolar e rejeição de carga.

Oscilogramas, bem como outras informações e resultados desses estudos encontram-se no Anexo 4.

A linha hipotética faz ligação entre Porto Velho e Araraquara, valendo-se dos dados e condições de rede reais, adotados nos estudos referente aos empreendimentos de integração das Usinas do Rio Madeira [27].

Exemplo :

Linha de Transmissão

Duas LT's trifásicas, com a menor distância entre elas igual a 10 km, com 2.500 km de extensão, 12 transposições completas (mesma seqüência de rotação de fases em cada transposição), tensão de operação prevista entre 400 kV e 800 kV (variação de acordo com a necessidade do sistema : autotransformador nas extremidades para ajuste da tensão de operação consoante a carga), feixes dispostos conforme apresentado na Figura 3.3.(1).

A seguir são apresentados os parâmetros unitários e demais características elétricas básicas da linha, para frequência de 60 Hz e hipótese da linha ser considerada idealmente transposta :

Parâmetros Unitários de Seqüência Direta :

Admitância Transversal Unitária (y_d) : i 9,60878 μ S/km a 60 Hz

Impedância Longitudinal Unitária (z_d) : 0,0065997 + i 0,172479 Ω /km a 60 Hz

Parâmetros Unitários de Seqüência Homopolar :

Admitância Transversal Unitária (y_h) : i 3,9549 μ S/km a 60 Hz

Impedância Longitudinal Unitária (z_h) : 0,346714 + i 1,31066 Ω /km a 60 Hz

Impedância Característica:

$z_c = 132 \Omega$ a 60 Hz

Potência Característica :

$S_c = 4847$ MVA, a 800 kV

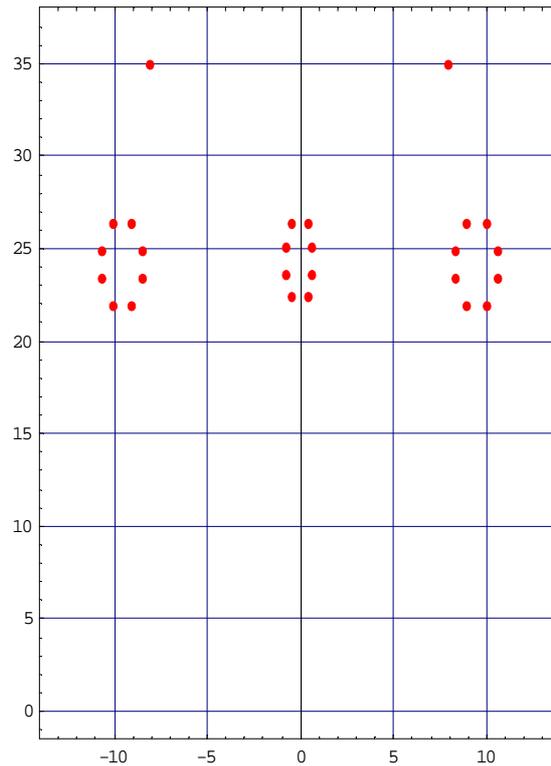


Figura 3.3.(1) – Ilustração da Disposição do Feixe de Condutores (altura média)

Salienta-se que não foram considerados quaisquer dispositivos atenuantes de sobretensões, como pára-raios (PR), resistores de pré-inserção (RPI) ou sincronizadores. A linha não possui compensação em derivação tendo, em cada um de seus terminais, um autotransformador que opera com tensão entre 400 kV e 800 kV (mais informações sobre o uso desse tipo de transformador encontram-se na sequência de informações disponibilizadas no Anexo 4).

Os resultados sintetizados nas tabelas 3.5, 3.6 e 3.7 confirmam o comportamento semelhante ao de linhas curtas, ressaltando que sequer pára-raios nas extremidades da linha estão representados, configurando-se uma situação mais severa que as condições reais.

No Anexo 4 (na transcrição do DT 412) encontram-se alguns gráficos de potência ativa, reativa, perdas e perfil de tensão relacionados as condições de operação de uma linha semelhante, operando em diversos níveis de tensão (de 400 kV a 800 kV).

Tabela 3.5 - Resultados dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Manobra de Energização de Linha

Tensão da LT		Descrição dos Casos simulados			Grandezas estatísticas	Local de Medição						
		n°	Configuração			Defeito	PV		LT64X		AR	
			Ano	Condições Operac.			V ϕ - ϕ (p.u.)	V ϕ -t(p.u.)	V ϕ - ϕ (p.u.)	V ϕ -t(p.u.)	V ϕ - ϕ (p.u.)	V ϕ -t(p.u.)
LT operando em 800 kV		1	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	sem def.	Vmed	1,55	1,85	0,56	0,65	1,60	1,91
						σ ($\times 10^{-2}$)	4,45	9,02	4,86	12,21	4,48	13,81
						Vmax	1,70	2,15	0,70	1,06	1,70	2,15
		2	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 energ; s/ PR's e RPI	sem def.	Vmed	1,40	1,58	0,59	0,66	1,64	1,99
						σ ($\times 10^{-2}$)	2,99	3,39	2,91	6,18	3,64	6,71
						Vmax		1,70	0,70	0,80	1,75	2,15
		3	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em PV	Vmed	1,46	1,50	0,66	0,58	1,54	1,43
						σ ($\times 10^{-2}$)	8,48	8,01	14,22	1,53	7,09	4,62
						Vmax	1,65	1,70	0,85	0,75	1,70	1,55
		4	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em 1/2 LT	Vmed	1,50	1,75	0,51	0,67	1,50	1,75
σ ($\times 10^{-2}$)	6,53					9,73	6,60	10,00	6,53	18,12		
Vmax	1,70					1,95	0,70	0,90	1,70	2,10		
5	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em AR	Vmed	1,50	1,75	0,50	0,67	1,54	1,76		
				σ ($\times 10^{-2}$)	6,53	9,73	6,62	10,03	6,18	18,16		
				Vmax	1,70	1,95	0,70	0,90	1,70	2,10		
LT operando em 400 kV		6	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	sem def.	Vmed	1,77	1,52	0,98	0,97	1,49	1,78
						σ ($\times 10^{-2}$)	6,83	6,56	0,11	0,12	4,00	0,11
						Vmax	1,95	1,80	1,25	1,25	1,65	2,10
		7	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em PV	Vmed	1,55	1,34	1,14	1,01	1,83	1,59
						σ ($\times 10^{-2}$)	7,81	6,79	21,85	19,23	7,22	6,50
						Vmax	1,80	1,55	1,40	1,25	2,00	1,75
		8	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em 1/2 LT	Vmed	1,49	1,49	0,87	1,16	1,69	1,81
						σ ($\times 10^{-2}$)	2,99	8,00	10,15	13,26	7,44	10,28
						Vmax	1,70	1,70	1,10	1,45	1,90	2,10
		9	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra C1; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em AR	Vmed	1,52	1,42	1,53	1,25	1,80	1,59
						σ ($\times 10^{-2}$)	7,05	6,50	9,78	6,04	8,34	7,36
						Vmax	1,75	1,60	1,70	1,65	2,05	1,75

Tabela 3.6 - Resultados dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Manobra de Religamento Tripolar

Descrição dos Casos simulados					Grandezas estatísticas	Local de Medição					
Tensão da LT	n°	Configuração		Defeito		PV		LT64X		AR	
	Ano	Condições Operac.				V ϕ - ϕ (p.u.)	V ϕ -t(p.u.)	V ϕ - ϕ (p.u.)	V ϕ -t(p.u.)	V ϕ - ϕ (p.u.)	V ϕ -t(p.u.)
LT operando em 800 kV	1	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	sem def.	Vmed	1,63	1,98	0,55	0,64	1,73	1,97
					σ ($\times 10^{-2}$)	0,50	1,83	5,39	9,87	0,93	6,55
					Vmax	1,70	2,15	0,70	0,95	1,85	2,20
	2	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 energ; s/ PR's e RPI	sem def.	Vmed	1,48	1,68	0,50	0,58	1,56	1,78
					σ ($\times 10^{-2}$)	0,50	2,30	4,80	9,22	0,85	7,00
					Vmax	1,55	1,85	0,65	0,85	1,65	2,00
	3	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em PV	Vmed	1,58	1,45	0,68	0,65	1,60	1,45
					σ ($\times 10^{-2}$)	0,78	3,55	11,66	11,04	3,43	4,70
					Vmax	1,65	1,60	0,85	0,85	1,70	1,60
	4	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em 1/2 LT	Vmed	1,54	1,73	0,52	0,70	1,58	1,88
σ ($\times 10^{-2}$)					2,83	1,90	7,15	9,99		3,68	
Vmax					1,65	1,85	0,70	0,95	1,70	2,10	
5	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em AR	Vmed	1,58	1,53	0,62	0,77	1,58	1,62	
				σ ($\times 10^{-2}$)	0,50	1,91 $\times 10^{-6}$	6,22	4,54	2,05	6,68	
				Vmax	1,65	1,55	0,75	0,90	1,70	1,80	
LT operando em 400 kV	6	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	sem def.	Vmed	1,49	1,48	1,04	1,05	1,74	1,80
					σ ($\times 10^{-2}$)	5,04	7,55	17,13	17,90	9,36	11,14
					Vmax	1,65	1,75	1,35	1,45	2,05	2,05
	7	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em PV	Vmed	1,56	1,36	1,14	1,01	1,82	1,59
					σ ($\times 10^{-2}$)	7,82	7,02	23,24	20,27	10,03	8,58
					Vmax	1,75	1,55	1,50	1,30	2,05	1,80
	8	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em 1/2 LT	Vmed	1,50	1,49	0,85	1,14	1,69	1,78
					σ ($\times 10^{-2}$)	8,29	7,25	11,60	13,79	8,48	13,43
					Vmax	1,70	1,75	1,15	1,45	1,90	2,15
	9	2012	Vpré:1.10 p.u.; manobra Ct; C2 aberto; s/ PR's e RPI	def. 1 ϕ em AR	Vmed	1,51	1,43	1,53	1,47	1,77	1,54
					σ ($\times 10^{-2}$)	7,75	5,07	9,89	6,56	10,87	9,44
					Vmax	1,70	1,60	1,70	1,65	2,10	1,80

Tabela 3.7 - Resultados dos Estudos de Transitórios Eletromagnéticos para Manobra de Rejeição de Carga

Descrição dos Casos		Grandeza (kVeficaz)	LOCAL						
			PV	LT24X	LT44X	LT64X	LT84X	LT104	AR
Caso 1	RJ simples em AR, sem defeito	$V_{\phi-t}$	0,77	1,28	0,89	0,58	1,33	1,35	1,27
		$V_{\phi-\phi}$	1,18	1,18	0,81	0,57	1,00	1,44	1,51
Caso 2	Defeito 1 ϕ seguido de RJ simples em AR	$V_{\phi-t}$	1,00	0,91	0,70	0,58	0,73	0,92	0,96
		$V_{\phi-\phi}$	1,31	1,43	1,38	1,75	1,80	1,67	1,69
Caso 3	RJ simples, seguida de defeito 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow V = 0$) em AR	$V_{\phi-t}$	1,32	1,87	1,70	2,27	2,14	2,09	0,79
		$V_{\phi-\phi}$	1,32	1,52	1,21	1,73	1,90	1,59	1,64
Caso 4	RJ simples, seguida de defeito 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow V = V_{max}$) em AR	$V_{\phi-t}$	1,39	1,78	1,69	2,10	2,27	1,88	2,21
		$V_{\phi-\phi}$	1,31	1,44	1,26	1,67	1,66	1,51	1,58
Caso 5	Defeito 1 ϕ em PV seguido de RJ simples em AR	$V_{\phi-t}$	1,18	1,58	1,37	1,21	1,40	1,56	1,91
		$V_{\phi-\phi}$	1,23	1,30	1,40	1,13	1,56	1,69	1,84
Caso 6	RJ simples em AR, seguida de defeito 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow V = 0$) em PV	$V_{\phi-t}$	1,22	1,51	1,46	1,09	1,39	1,35	1,80
		$V_{\phi-\phi}$	1,20	1,20	1,21	1,10	1,08	1,43	1,51
Caso 7	RJ simples em AR, seguida de def. 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow V = V_{max}$) em	$V_{\phi-t}$	1,25	1,44	1,40	1,22	1,33	1,35	1,84
		$V_{\phi-\phi}$	1,18	1,19	1,12	0,97	1,00	1,44	0,63
Caso 8	RJ simples em AR, seguida de def. 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow$ aleatório) em	$V_{\phi-t}$	1,40	1,64	1,26	0,81	1,51	1,67	2,04
		$V_{\phi-\phi}$	1,37	1,42	1,02	0,64	1,11	1,67	1,88
Caso 9	RJ simples em AR, seguida de def. 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow V=0$) em 1/2 LT	$V_{\phi-t}$	0,78	1,36	1,26	0,90	0,92	1,35	1,67
		$V_{\phi-\phi}$	1,18	1,16	0,82	0,58	0,99	1,32	1,52
Caso 10	RJ simples em AR, seguida de def. 1 ϕ ($t_{falta} \Rightarrow V=V_{max}$) em 1/2	$V_{\phi-t}$	1,54	1,55	1,17	0,64	1,42	1,72	2,27
		$V_{\phi-\phi}$	1,56	1,45	1,05	0,64	1,13	1,69	1,88
Caso 11	Defeito 1 ϕ em 1/2 da LT seguido de RJ simples em AR	$V_{\phi-t}$	0,78	1,33	1,26	0,90	0,92	1,35	1,67
		$V_{\phi-\phi}$	1,18	1,16	0,82	0,58	0,99	1,32	1,52
Caso 12	RJ dupla em AR, sem defeito	$V_{\phi-t}$	1,55	1,61	1,20	0,75	1,29	1,36	1,85
		$V_{\phi-\phi}$	1,39	1,47	1,12	0,57	1,01	1,42	1,62
Caso 13	RJ dupla, seguida de defeito 1f ($t_{falta} \Rightarrow V = 0$) em AR	$V_{\phi-t}$	1,58	1,77	1,98	2,38	2,29	2,31	2,30
		$V_{\phi-\phi}$	1,48	1,49	1,40	1,68	1,80	1,62	1,60
Caso 14	RJ dupla em AR, seguida de def. 1f ($t_{falta} \Rightarrow V=V_{max}$) em 1/2	$V_{\phi-t}$	1,42	1,64	1,24	0,83	1,29	1,36	1,87
		$V_{\phi-\phi}$	1,38	1,45	1,15	0,57	1,01	1,44	1,66
Caso 15	RJ dupla em AR, seguida de def. 1f ($t_{falta} \Rightarrow V = 0$) em 1/2 LT	$V_{\phi-t}$	1,44	1,63	1,18	0,80	1,40	1,36	1,85
		$V_{\phi-\phi}$	1,34	1,48	1,11	0,57	0,97	1,44	1,63

Obs :

Em todos os casos considerou-se :

- Sistema representado com a configuração base de 2016.
- LT operando em 800 kV
- Tensão pré-manobra de 1,055 p.u.
- Fluxo em cada LT de 2974 MW
- Pára-raios não representados

As tabelas 3.8 e 3.9 sintetizam os piores resultados dos cálculos de tensão induzida na fase aberta durante a manobra monofásica, na ausência e na presença do arco secundário, respectivamente. Na tabela 3.9 também encontram-se os valores de corrente de arco secundário para diversos pontos de defeito ao longo da linha. A partir desses resultados, observa-se que o pior ponto de defeito, para a configuração estudada, é junto ao terminal receptor (Araraquara (AR)).

Tabela 3.8 – *Tensão Induzida na Fase Aberta – Sem Defeito (ausência de arco)*

Tensão Induzida na Fase Aberta (Valor Eficaz) - Abertura Monofásica, sem defeito													
Dois Circuitos Operando em 800kV													
Distância em Quilômetros a partir do Terminal de Porto Velho (PV)													
	PV												AR
	0	208	416	624	832	1040	1248	1456	1664	1872	2080	2288	2500 (km)
Vind (kV)	376	541	474	380	262	131	6	138	264	373	462	523	554

Tabela 3.9 – *Tensão Induzida na Fase Aberta e Corrente de Arco Secundário – Defeito em Locais Diferentes ao longo da linha (presença de arco secundário)*

Tensão Induzida na Fase Aberta (Valor Eficaz) e Corrente de Arco Secundário (Valor Eficaz)													
Dois Circuitos Operando em 800kV													
Distância em Quilômetros a partir do Terminal de Porto Velho (PV)													
	PV												AR
	0	208	416	624	832	1040	1248	1456	1664	1872	2080	2288	2500 (km)
Vind (kV)	158	105	183	235	279	352	569	337	499	229	186	124	145
Iarco (A)	849	648	563	566	675	977	155	1021	677	558	552	633	1214

Fica evidenciado pelo valor elevado das correntes de arco secundário observadas, que para a transmissão em meia-onda são necessárias soluções de engenharia para que se promova a extinção do arco secundário, onde a eletrônica de potência mostra-se uma área promissora para tal exploração. Em [17,19] esse tema é abordado, com a apresentação de soluções envolvendo dispositivo FACTS.

Ressalta-se que a pesada utilização de compensação reativa, como tradicionalmente adotada em linhas de algumas centenas de quilômetros, não deve ser aplicada a esse tipo de linha, uma vez que, de um modo geral, seu desempenho, tanto em regime permanente quanto em regime transitório, não justifica tal utilização, sendo inclusive não recomendada, por riscos desnecessários de condições ressonantes. Logo, soluções tradicionais, como aterramento dos reatores de linha através de reatores de neutro ou pára-raios não são aplicáveis.

O emprego de chaves de aterramento rápido exige uma avaliação criteriosa e a determinação de requisitos especiais, envolvendo, inclusive, um certo grau de risco sua aplicabilidade, em função dos dispositivos atualmente disponíveis.

Por apresentarem correntes de arco secundário de valores muito elevados, medidas para atenuar esses valores pelo aumento da impedância de sequência zero não têm a mesma eficiência que soluções elaboradas basicamente com o intuito de se levar o arco secundário à instabilidade (Fig. 3.3.(2)), ou ainda, através da injeção de corrente na fase defeituosa, tal que se prolongue o tempo com valor de baixa corrente de condução elétrica (passagem pelo zero alongada) (Fig.3.3.(3)).

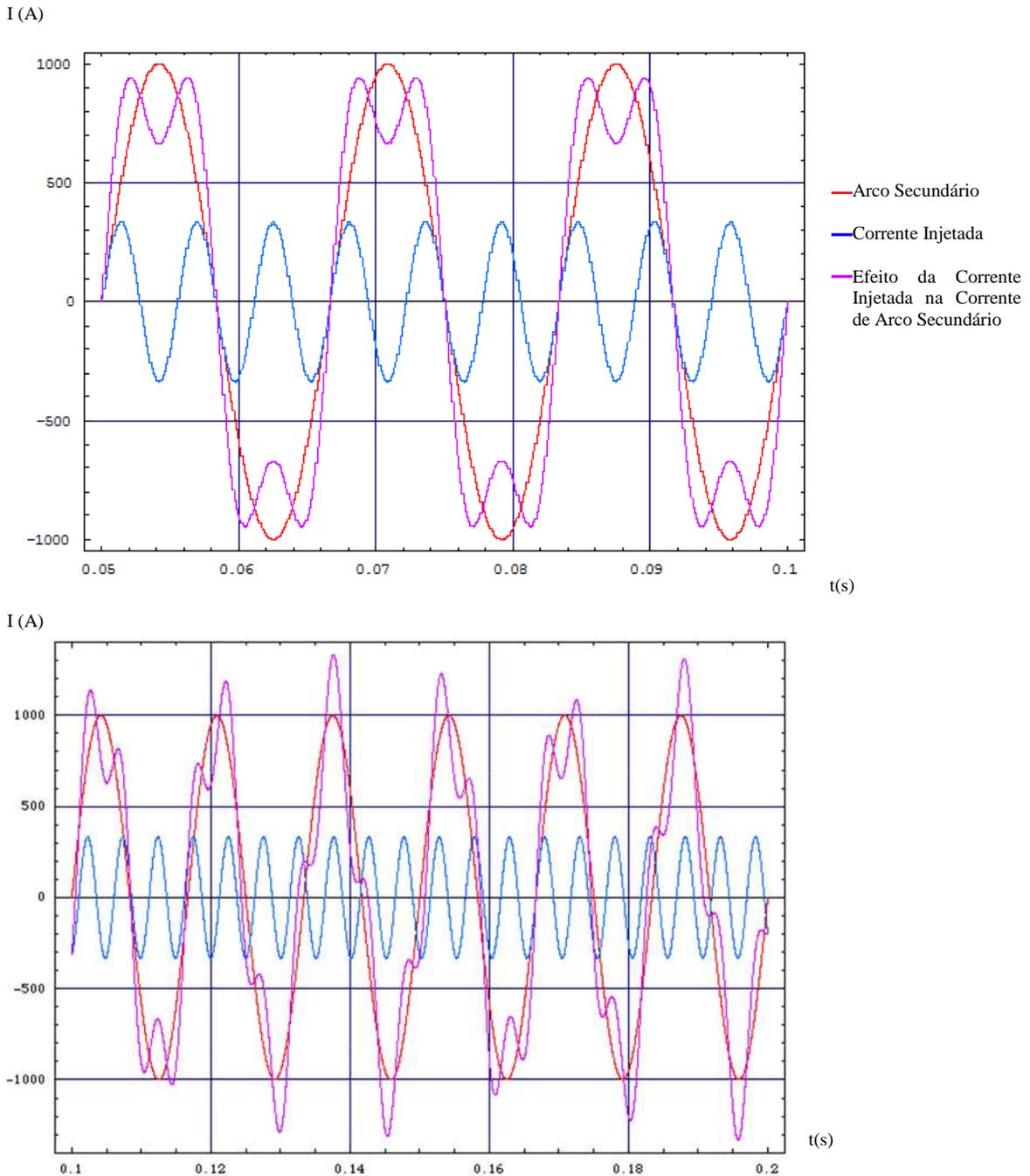


Figura 3.3.(2) – Ilustração do Efeito da Injeção de Sinais de Corrente para promover a instabilidade (e extinção) do Arco Secundário

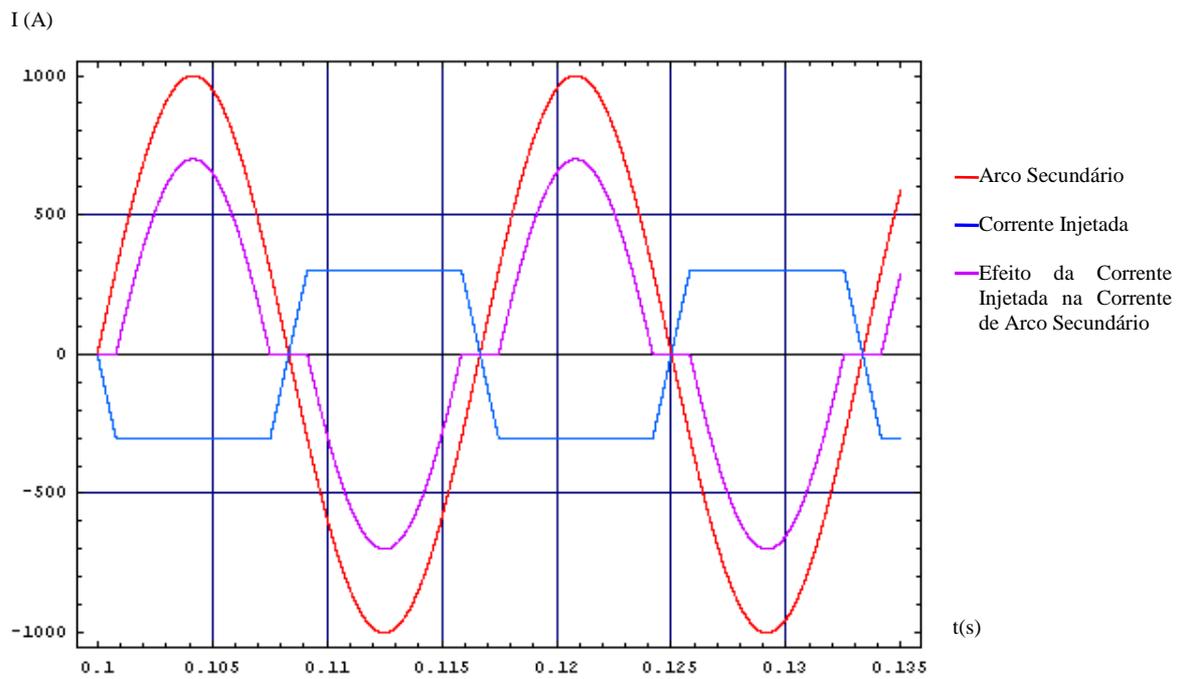


Figura 3.3.(3) – *Ilustração do efeito da Injeção de Sinal de Corrente para promover a Extinção do Arco Secundário*

CAPÍTULO 4

Modelagem do Arco Elétrico

O arco elétrico está presente em uma grande parte de temas relacionados à coordenação de isolamento que determinam condições limítrofes na Engenharia Elétrica, seja para o dimensionamento de equipamentos, seja para operação de sistemas elétricos de transmissão.

Até alguns anos atrás, a quase totalidade das publicações disponíveis tinha como foco de interesse a modelagem do arco elétrico para estudos relacionados a dimensionamento de equipamentos, como disjuntores e chaves de aterramento. Nos últimos anos, entretanto, observa-se um interesse crescente na modelagem do arco elétrico em linhas de transmissão estreitamente associado ao emprego do religamento monofásico – manobra que comprovadamente melhora o desempenho dos sistemas elétricos, indicada, principalmente, para sistemas radiais, com linhas longas.

Em linhas gerais, observa-se que os instrumentos e metodologias comumente disponíveis na literatura quanto à modelagem do arco elétrico para estudos de religamento monofásico possuem dois tipos de abordagem, quais sejam, critérios de extinção associados a um “gap” ou modelos físicos matemáticos.

Pela dificuldade de se caracterizar adequadamente o arco, os critérios tradicionais tendem a ser conservativos e com isso têm seu uso comprometido para situações em que as condições de arco (corrente e tensão) se aproximam ou mesmo extrapolam as condições previstas em tais critérios. Ressalta-se ainda a importância da interação arco-rede, muitas vezes negligenciada.

4.1. Principais Modelos de Representação do Arco

Em [2] comenta-se que o desenvolvimento de modelos de arco elétrico é, na grande maioria da literatura disponível, associado à ocorrência do fenômeno em disjuntores. Em [2, 22] é apresentada uma revisão sobre os principais modelos de arco elétrico, agrupando-os em três famílias, segundo classificação do CIGRÈ, e discutindo as suas formas de aplicação:

- (b) **Modelos caixa-preta (black box models)** adotam formulações matemáticas e funções de transferência para relacionar tensão e corrente do arco elétrico. Enfoca-se exclusivamente o comportamento elétrico do arco, sem preocupação com o processo físico envolvido. Assim, tem-se uma representação global externa do arco, não sendo observado o detalhamento do fenômeno físico interno. Conhecidos também como modelos P- Θ (potência e constante de tempo).
- (c) **Modelos físicos do arco** retratam explicitamente os seus processos físicos. Calculam o comportamento global do arco a partir das leis de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia (troca de calor por condução, por turbulência, por convecção e até por radiação) e as propriedades dos gases e plasmas com relativo detalhe. Consideram os parâmetros básicos de condutância elétrica, condutividade térmica e outros em função da temperatura. Observa-se ainda na formulação de tais modelos, a consideração da influência da pressão do sopro de gás aplicada, bem como o projeto da câmara de extinção, no caso específico de disjuntores, ao qual estes modelos normalmente se reportam.
- (d) **Modelos Empíricos**, com diagramas e fórmulas que indicam a dependência dos parâmetros e as leis de crescimento com os parâmetros e variáveis independentes. Estes diagramas e fórmulas podem ser obtidos diretamente de testes ou também em combinação de simulação da rede com os modelos de arco tipo caixa-preta, caixa-cinza ou físicos, para casos especiais. Como exemplo de aplicação de tais modelos, pode-se citar, para análise de disjuntores, a definição de curvas-limite para falta quilométrica, lei de crescimento da corrente de "chopping" com a capacitância paralela e o número de câmaras de extinção em série, etc. Um artifício bastante utilizado na análise dos problemas de interrupção de arcos elétricos é o emprego de formulações gráficas (diagramas / fórmulas), geralmente empíricas, das características do arco.

Embora represente uma ferramenta de análise prática relativamente difundida para o estudo de disjuntores, o emprego de tais filosofias de "modelos" na análise da extinção do arco secundário pode levar à utilização de critérios equivocados de análise. Devido às particularidades do fenômeno de extinção do arco secundário, a generalização de determinados resultados é uma prática que pode induzir a conclusões equivocadas, uma vez que as condições em que tais características foram obtidas podem ser bastante distintas das inerentes à aplicação em questão.

Há ainda modelos que não se restringem à classificação mencionada acima, conhecidos como tipo "*Caixa-Cinzenta*", que associam características dos modelos caixa-preta a fenômenos físicos e/ou características empíricas, ou ainda, consideram determinados parâmetros originalmente constantes como variáveis. Tais modelos representam uma evolução dos apresentados acima, estando melhores descritos no item que segue, uma vez que, representam o tipo de modelo adotado como ferramenta de análise.

4.2. Apresentação do Modelo de Arco Elétrico

Analísado

4.2.1. Modelo "Caixa-Cinzenta"

Em [2] cita-se que sob o ponto de vista histórico, muitos consideram os modelos apresentados por Cassie [23] e Mayr [24] como representantes dos modelos caixa-preta.

Entretanto, se considerarmos que seus modelos de arco representam satisfatoriamente o arco sob condições específicas, ou seja, respeitadas as limitações de aplicação impostas na própria definição de tais modelos, eles podem ser considerados como os primeiros modelos do tipo "Caixa - Cinzenta".

Ambas formulações (*Cassie* e *Mayr*) são semelhantes, pois relacionam a tensão entre os terminais do arco ($u(t)$)^(*) e a corrente de arco ($i(t)$) com a sua condutância ($g(t)$) e uma constante de tempo (θ).

Cassie considera o arco confinado num canal com temperatura, densidade da corrente e intensidade de campo elétrico constantes, sendo o mecanismo de perda de energia exclusivamente devido à convecção. Para tanto são definidos dois parâmetros associados ao arco: a tensão de arco estacionária u_0 e uma constante de tempo θ , que representa a inércia térmica do arco.

O modelo de *Cassie* pode ser apresentado pela equação:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{|u|}{|u_0|} - 1 \right) \quad (4.1)$$

onde u_0 e θ são constantes.

Nota : ^(*) Doravante, a tensão entre os terminais do arco será denominada "tensão de arco".

Mayr assumiu que o arco é resfriado exclusivamente pelo ar, ou seja, a radiação não é considerada explicitamente, e que a troca de calor ocorre por condução térmica. A dependência entre a temperatura e condutividade elétrica foi linearizada por trechos obtendo-se uma equação com dois parâmetros: a perda de potência \mathbf{P} e a constante de tempo do arco θ . O modelo de *Mayr* pode ser representado pela equação:

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta} \left(\frac{(u \cdot i)}{|P_0|} - 1 \right) \quad 4.2)$$

onde \mathbf{P}_0 e θ são constantes.

A equação de *Cassie* corresponde, aproximadamente, a supor que o campo elétrico longitudinal na região do arco é constante e que a alteração da condutância do arco está associada à uma alteração proporcional da respectiva seção transversal. Esta equação é, por vezes, razoavelmente aproximada, para corrente no arco elevada. Já a equação de *Mayr* expressa melhor o comportamento do arco nos intervalos em que a corrente é reduzida.

Ambos os modelos foram modificados gerando novas formulações [2, 3, 9, 22] que assumem os parâmetros originalmente constantes como dependentes da corrente e da própria condutância no tempo, além da inclusão de uma ou mais constantes de tempo, sendo tais modelos explicitamente reconhecidos como modelos “*Caixa-cinzena*” .

4.2.2. Modelo Utilizado

Para determinação do modelo de arco a ser adotado deve se considerar critérios com consistência física, nomeadamente parâmetros do arco independentes da amplitude e forma de pequenos distúrbios, e modelo dinâmico que satisfaça à característica estática.

Deve ser enfatizado que, para um ponto de operação em particular, muitos dos modelos largamente utilizados são, de fato, equivalentes, a partir de um ajuste das respectivas constantes envolvidas, e é inútil tentar escolher um modelo caracterizado como do tipo “caixa-preta”, dentro das limitações dos dados experimentais. A melhor atitude é adotar uma abordagem de um modelo tipo “caixa-cinzena”, procurando

modelos consistentes com os fenômenos físicos dominantes, com um mínimo de parâmetros independentes, evitando parâmetros com forte dependência do ponto de operação, e com o uso de resultados experimentais cobrindo uma grande faixa de distúrbios.

Na vizinhança de um ponto de operação, a restrição básica na adoção de um dos modelos caixa-preta está associada ao fato de considerarem apenas uma constante de tempo para o comportamento dinâmico. Tanto ensaios de tipo em laboratórios, como análises detalhadas de testes de disjuntores de diferentes fabricantes, sob condições distintas de manobra, apontam para a existência de pelo menos duas constantes de tempo, com ordens de grandeza diferentes. Um modelo apresentado em [3, 9] e descrito a seguir, representa uma tentativa de, a partir da associação de dois “sub-arcos” com constantes de tempo distintas, representar um arco “equivalente” com duas constantes de tempo.

Fisicamente, a representação de dois sub-arcos ligados em série ou paralelo visa descrever basicamente os seguintes comportamentos :

- As regiões anódicas e catódicas são afetadas por diversos fenômenos que diferem bastante do comportamento dominante observado na região central do canal do arco.
- O canal do arco pode ser dividido em duas regiões bastante distintas, uma central, com temperatura elevada e pequena inércia térmica, e uma externa, com temperaturas mais baixas e inércia térmica mais elevada.

Em [2, 3] pondera-se a validação do modelo com duas constantes de tempo, e [3] justifica sua adoção, fazendo alusão às aplicações em disjuntores. De acordo com o modelo proposto, o arco pode ser representado por dois sub-arcos, que podem ser do tipo Thiel, por exemplo, cada um com seus respectivos parâmetros, além de um termo que representa a interação entre eles. A associação dos sub-arcos pode ser série ou paralela, sendo equivalentes, conforme o ajuste das variáveis envolvidas.

4.2.2.(a) Característica Estacionária

Para definição das características estacionárias do arco, utilizou-se uma curva citada na referência [5] proveniente de ensaios para arcos no ar, transcrita no Anexo 5.

A região de correntes menos intensas corresponde ao comportamento caracterizado basicamente por *Mayr*, enquanto a região de correntes mais elevadas por *Cassie* conforme ilustrado na Fig.4.2.(1).

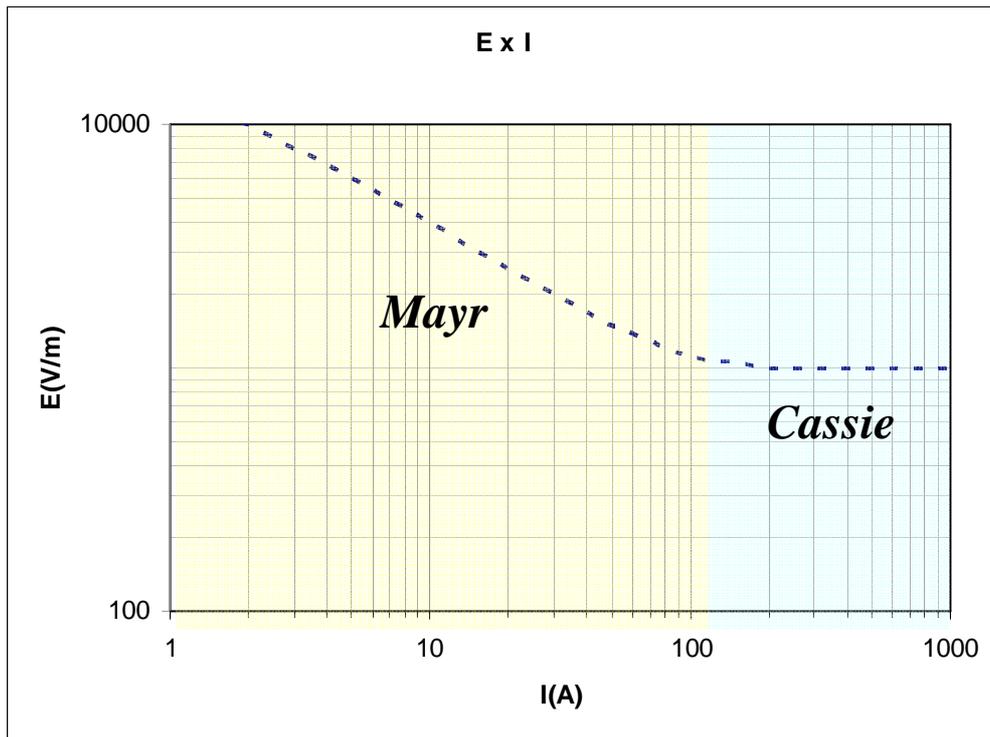


Figura 4.2.(1) – Característica Estacionária para Arco no Ar (E (campo elétrico) , I (corrente) – Regiões de Cassie e Mayr

Para análise do arco secundário, na maioria das vezes, a região de interesse pode ser considerada como aproximadamente uma reta (em escala logarítmica), por se tratar do trecho da curva de correntes mais baixas, definindo-se então a tensão (\mathbf{u}_{0e}) em função da corrente de equilíbrio (\mathbf{i}_{0e}). Assim, para um dado \mathbf{i}_0 , obtido a partir das condições de simulação, imposto pela rede, é possível calcular \mathbf{u}_0 , e conseqüentemente, a potência de equilíbrio ($\mathbf{P}_0 = \mathbf{u}_0 \cdot \mathbf{i}_0$) e a condutância inicial do arco ($\mathbf{g}_0 = \mathbf{i}_0/\mathbf{u}_0$).

A partir do estabelecimento de $\mathbf{u}_{0e} = \mathbf{f}[\mathbf{i}_{0e}]$, ou seja, das características estacionárias do arco, é possível fazer uma análise de sua estabilidade, em bases incrementais, ou ainda, iniciar o processo de avaliação do seu comportamento dinâmico, em bases transitórias.

4.2.2.(b) *Comportamento Incremental do Arco*

Seja na vizinhança de um ponto de operação, com tensão \mathbf{U}_0 e corrente \mathbf{I}_0 , onde:

$$\mathbf{Y}_0 = \mathbf{I}_0 / \mathbf{U}_0 \quad (4.3)$$

ou

$$\mathbf{Z}_0 = \mathbf{U}_0 / \mathbf{I}_0 \quad (4.4),$$

e fazendo

$$\mathbf{i} = \mathbf{I}_0 + \delta(\mathbf{i}) \quad (4.5),$$

$$\delta(\mathbf{i}) = \nabla (\Delta \mathbf{I} \cdot e^{pt}) \quad (4.6),$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_0 + \delta(\mathbf{u}) \quad (4.7),$$

$$\delta(\mathbf{u}) = \nabla (\Delta \mathbf{U} \cdot e^{pt}) \quad (4.8),$$

tal que,

$$|\Delta \mathbf{I}| \ll \mathbf{I}_0 \quad (4.9)$$

e

$$|\Delta \mathbf{U}| \ll \mathbf{U}_0 \quad (4.10)$$

definindo a admitância incremental do arco por:

$$\mathbf{Y} = \Delta \mathbf{U} / \Delta \mathbf{I} \quad (4.11)$$

e da mesma forma sua impedância incremental por:

$$\mathbf{Z} = \Delta \mathbf{I} / \Delta \mathbf{U} \quad (4.12).$$

A representação do arco em termos incrementais é particularmente útil quando associada ao emprego de técnicas de transformação de Fourier, Laplace e similares, seja para análise de estabilidade, utilizando métodos como o de Nyquist, Bode, Routh-Hurwitz, seja para análise no domínio da frequência do comportamento transitório (domínio híbrido frequência-tempo).

No **Anexo 6** é apresentada uma tabela, extraída de [9], com as impedâncias incrementais para diversos modelos de arco .

4.2.2.(c) *Comportamento Dinâmico do Arco*

Para representação do comportamento dinâmico do arco secundário, adotou-se o modelo com duas constantes de tempo proposto em [3].

Considerando como exemplo dois sub-arcos do tipo Thiel, conforme Fig. 4.2.(2), o arco pode ter seu comportamento representado por:

$$-\frac{d(\text{Log } r_1)}{dt} = \frac{d(\text{Log } g_1)}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \left(\frac{p_1 + J \text{Log} \left(\frac{g_2^\varepsilon}{g_1} \right)}{\xi P_0} - 1 \right) \quad (4.13)$$

$$-\frac{d(\text{Log } r_2)}{dt} = \frac{d(\text{Log } g_2)}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \left(\frac{p_2 - J \text{Log} \left(\frac{g_2^\varepsilon}{g_1} \right)}{\eta P_0} - 1 \right) \quad (4.14)$$

onde

$$\eta = 1 - \xi, \quad \varepsilon = \xi / \eta, \quad p_1 = u_1 \cdot i_1, \quad \theta_1 = A_1 \cdot g^\alpha, \quad \theta_2 = A_2 \cdot g^\alpha, \quad p = p_1 + p_2, \\ P_0 = B \cdot g^\beta, \quad J_r = J / P_0 = \text{constante}, \quad p_2 = u_2 \cdot i_2, \quad r_1 = 1 / g_1 = u_1 / i_1, \\ r_2 = 1 / g_2 = u_2 / i_2.$$

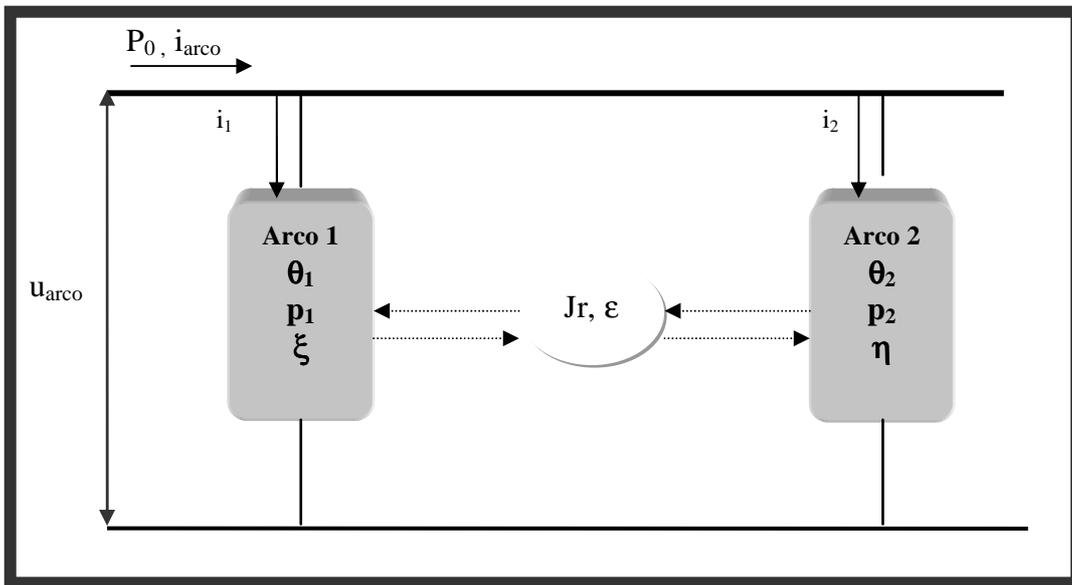


Figura 4.2.(2) – Representação esquemática do modelo de arco elétrico com dois sub-arcos de Thiel acoplados em paralelo

Para arcos em série, $u = u_1 + u_2$, $i = i_1 = i_2$, $r = 1 / g = r_1 + r_2$, $p_1 = (g_1 / g_1 + g_2) \cdot p$, $p_2 = (g_2 / g_1 + g_2) \cdot p$, e, para arcos em paralelo, $u = u_1 = u_2$, $i = i_1 + i_2$, $g = g_1 + g_2$, $r = 1 / g$, $p_1 = (r_1 / r_1 + r_2) \cdot p$, $p_2 = (r_2 / r_1 + r_2) \cdot p$.

Os parâmetros B e β ($P_0 = B \cdot g^\beta$) são calculados a partir da característica estática do arco. No **Anexo 5** é apresentada a curva de característica estacionária para arcos no ar utilizada, retirada da referência [9]. Esta curva relaciona campo elétrico e corrente de arco, portanto, para se contabilizar o valor de u deve ser considerado o comprimento da distância de isolamento.

A referência [3] indicou, a partir de resultados de ensaios para arcos no ar, valores aproximados, que fornecem uma estimativa razoável da ordem de grandeza das seguintes constantes: $\alpha \sim 0,1$, $\beta \sim 0,2$, $\xi \sim 0,4$, $J_r \sim 0,05$.

O presente trabalho apresenta ainda, no Capítulo 5, uma estimativa do ajuste dos demais parâmetros do modelo, ressaltando a questão fundamental das constantes de tempo, uma vez que estão diretamente associados ao tempo de extinção do arco.

Os cálculos do referido ajuste têm por base resultados experimentais de ensaios desenvolvidos no âmbito da pesquisa “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico”, integrante da carteira de projetos de pesquisa e desenvolvimento de FURNAS, com desenvolvimento teórico de responsabilidade da COPPE(UFRJ)/UNICAMP e parte experimental do CEPEL, cujos objetivos podem ser então sintetizados como:

1. Obter um modelo de comportamento dinâmico de arcos no ar, adequado para representar a interação com a rede, e determinar a ocorrência, ou não, da extinção do arco secundário.
2. Identificar e caracterizar quantitativamente os parâmetros significativos do arco, na gama de condições a considerar, cobrindo o objetivo do projeto
3. Validar o modelo obtido.

CAPÍTULO 5

Ajuste e Validação do Modelo de Arco Elétrico com Duas Constantes de Tempo

5.1. Utilização de dados experimentais: pesquisa “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico”

O arco elétrico é importante elemento dos transitórios de manobra em sistemas de potência. Observa-se um grande número de tentativas de modelá-lo para fins de engenharia, havendo muitos trabalhos direcionados principalmente para aplicação em disjuntores mas, no entanto, ainda não se chegou a um modelo único que atenda aos requisitos de um processo de chaveamento genérico.

A utilização de dados experimentais é ferramenta essencial não só para ajuste como para validação de qualquer modelo que pretenda ser considerado fisicamente robusto.

Dessa forma, em 2003 deu-se início a um projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico”, detalhado a seguir.

A pesquisa “Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico” tem como parceiros tecnológicos FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., da qual a pesquisa integra a carteira de P&D no segmento geração, COPPE/UFRJ - através da Fundação COPPETEC – atuante no desenvolvimento teórico e suporte técnico em parceria com a UNICAMP, e o CEPTEL, responsável pela execução da parte experimental, que vem sendo realizada em instalações especialmente construídas para essa pesquisa na unidade de Adrianópolis (Figs. 5.1.(1) a 5.1.(3)).

O objetivo principal do projeto é desenvolver uma modelagem confiável do arco elétrico para fins de estudo de religamento monofásico, uma vez que, embora a adoção de religamento monofásico esteja evoluindo para uma prática comum, sendo inclusive uma exigência da ANEEL para novos empreendimentos desde 2003, as metodologias

de estudo e análise para definição das condições de operação e características elétricas dos elementos (LT's e equipamentos) associados não acompanharam satisfatoriamente tal evolução, se mostrando ainda pouco eficientes, levando a soluções não otimizadas ou até mesmo equivocadas.

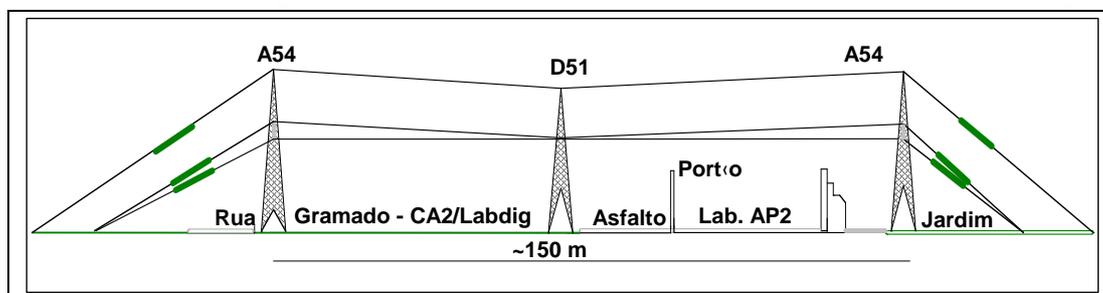
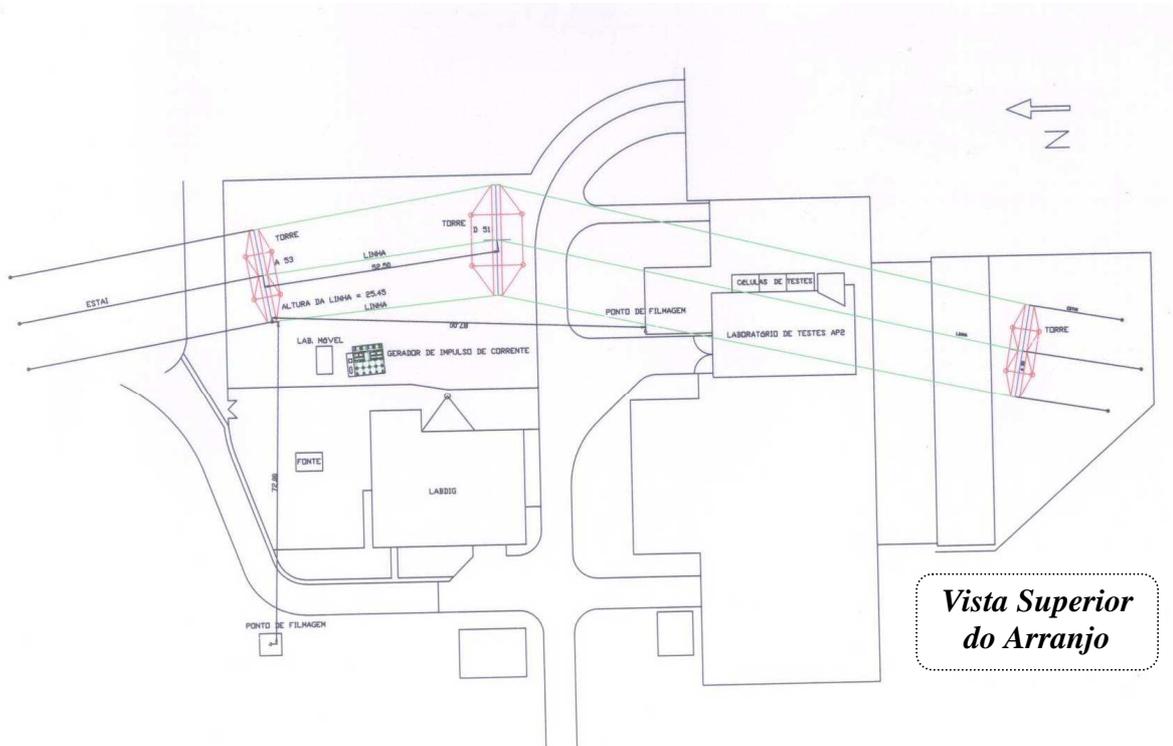


Figura 5.1.(1) – Apresentação simplificada do arranjo montado para os ensaios

Nos ensaios deseja-se reproduzir um número significativo de arcos elétricos, envolvendo uma grande gama de correntes de polaridade e amplitude distintas, dentre outras variáveis, para estudo e desenvolvimento do modelo de arco elétrico no ar que retrate diversas condições relacionadas a LT's de 500 kV , mas cobrindo também, de forma robusta, os aspectos físicos gerais de linhas de transmissão, o que permita a extrapolação dos resultados para outros níveis de tensão e para concepções não convencionais de LT's, incluindo soluções provavelmente adequadas para a evolução futura da rede elétrica brasileira. Espera-se estabelecer um modelo de arco elétrico

robusto e confiável. Nos ensaios foram utilizados fonte de tensão de 60 Hz mais gerador de impulsos de corrente. A Fig.5.1.(4) ilustra um dos ensaios para cadeia em “T”.

Parte do arranjo experimental destinado ao projeto (Fig. 5.1.(1)), compõe-se basicamente por três torres, cabos fase e pára-raios, cadeias de isoladores e demais equipamentos necessários para formar um trecho de linha de transmissão característico do sistema classe 500 kV de FURNAS.

A montagem dos vãos experimentais foi realizada por FURNAS.

Outras partes utilizadas no arranjo pertencem à infra-estrutura laboratorial do CEPEL, sendo que o gerador de impulsos de corrente foi especialmente construído no local, tendo inclusive sofrido diversas modificações ao longo do desenvolvimento do projeto. Os sistemas de medição de corrente e tensão elétrica em corrente alternada e de impulso que foram instalados demandaram condições inéditas para aplicação externa em meio a campos eletromagnéticos intensos, com altas taxas de variação no tempo.



Figura 5.1.(2) – Conclusão das montagens do primeiro vão

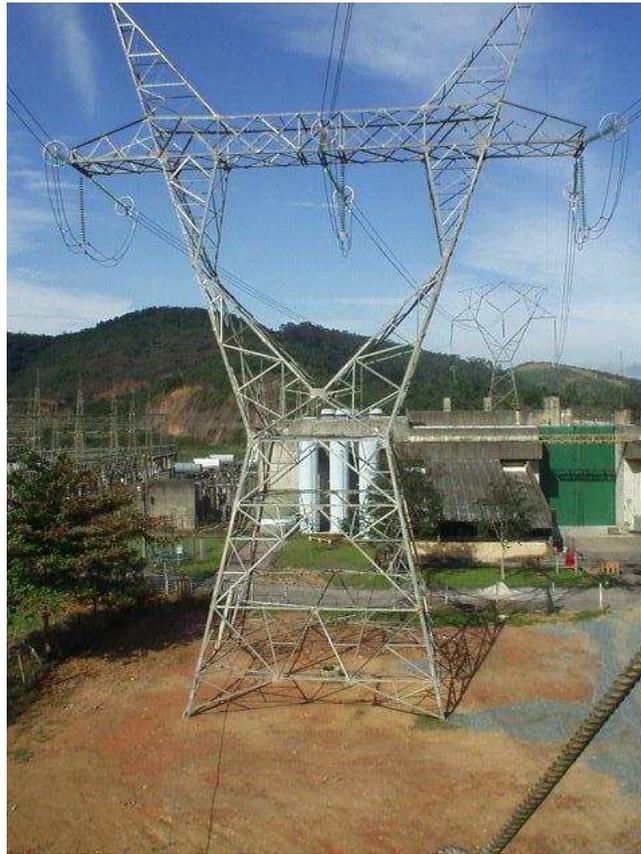


Figura 5.1.(3) – Segundo vão de linha em destaque.

Desde as primeiras experiências laboratoriais realizadas, muitas dificuldades técnicas, sobretudo relacionadas com as instalações laboratoriais e os recursos dos sistemas de medição requeridos para o objetivo do projeto, foram superadas. CEPEL, COPPE/UNICAMP e FURNAS trabalharam em conjunto na busca de soluções e formas de contornar tais dificuldades de forma a atender aos propósitos do projeto.



Figura 5.1.(4) – Ensaio em cadeia em “I”.

5.1.1. Condicionamentos básicos dos aspectos laboratoriais do projeto

Aspectos essenciais relacionados ao comportamento físico do fenômeno sob estudo imprimem condicionamentos importantes, que acabam por determinar as condições a serem ensaiadas além de nortear também a própria forma de análise dos resultados. Sendo assim, podemos destacar entre tais condicionamentos :

❖ Com relação ao meio (plasma e ar) :

- Fenômenos físicos básicos que condicionam o plasma.
- Comportamento não-linear.
- Parâmetros função de grandezas de estado do plasma, de grandezas elétricas afetadas pela interação arco-rede, do comportamento do ar.
- “Constantes de tempo” na gama de 0,1 μ s a 1s.
- Gama de frequência de 1 Hz a 10 MHz.
- Distribuição tridimensional da velocidade do ar, incluindo aspectos macroscópicos externos, distribuições estatísticas, variações “lentas” na gama de 1 ms a 1 s, turbulência na gama de 10 Hz a 10 kHz, convecção térmica.
- Localização do arco e geometria da linha na vizinhança do arco.

❖ Com relação a rede, vista dos terminais do arco :

- Sequência de condições associada ao arco (estágios da operação de manobra).
- $Z(f)$ na gama de frequência de 1 Hz a 10 Mhz.
- Tensão entre terminais com corrente nula, ou corrente entre terminais com tensão nula, na sequência de condições associada ao arco.

❖ Com relação a linha de transmissão :

- Necessidade da modelagem correta da linha na gama de frequência de 1 Hz a 10 MHz.

5.1.1.(a) Descrição dos Ensaios

Foram determinadas quatro “condições de ensaios”, a saber (Fig. 5.1.(5)) :

- arcos na vizinhança da cadeia de suspensão em “I”
- arcos na vizinhança da cadeia de suspensão em “V”
- arcos na vizinhança da cadeia de ancoragem
- arcos entre cabo pára-raios e cabo de fase.

Em cada ensaio, a corrente de arco é obtida por sobreposição de uma corrente “sustentada” (i_s) e impulsos de corrente (i_i).

A corrente “sustentada” (i_s) é aproximadamente sinusoidal e de amplitude constante, com duração de 1 s. Para arcos na vizinhança de cadeias de suspensão em I, cadeias de ancoragem e entre cabo pára-raios e cabo de fase, determinou-se a execução de ensaios para onze valores de i_s , na faixa de 10 A a 10 kA. Para arcos na vizinhança de cadeias de suspensão em V, são seis valores de i_s , na mesma faixa de corrente (10 A a 10 kA).

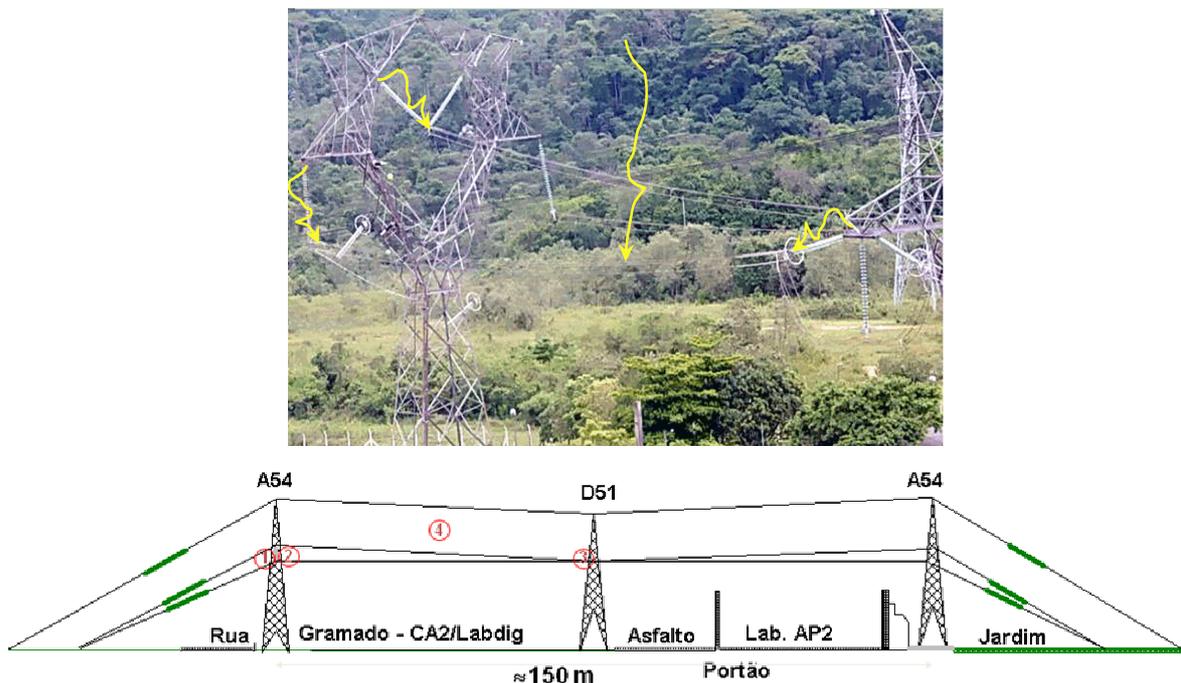


Figura 5.1.(5) – Localização dos Ensaios

Para o estabelecimento do arco (corrente sustentada) utiliza-se um fio de prova (fio fusível) que se desintegra nas primeiras centenas de microssegundos. Assim, os impulsos são aplicados após 0,5 s do início do ensaio, tempo que se mostrou suficiente para se garantir a ausência de tal fio.

Para cada condição de ensaio e corrente sinusoidal são injetados em sequência cinco impulsos de corrente (i_i), com polaridade, amplitude e tempo de frente definidos. O desejável seria a injeção dos impulsos em instantes pré-determinados dentro do período da componente sustentada. Entretanto, devido a dificuldade de se executar com precisão o instante exato da aplicação dos impulsos, aumentou-se o número de ensaios a fim de cobrir o pretendido, dando ainda volume de informação para tratamento estatístico dos dados .

Para os impulsos, considera-se:

- Três amplitudes de impulso de corrente, equivalentes a cerca de 0,05 , 0,1 e 0,2 vezes a amplitude da corrente sustentada “sinusoidal” (valor de crista).
- Polaridades positiva e negativa.
- Três tempos de frente, desde cerca de 0,1 μ s até cerca de 10 μ s.

Nos ensaios são registrados :

- Grandezas elétricas (taxa de amostragem ≤ 100 ns; janela de tempo: 1s):
 - Tensão entre os terminais do arco, ou tensão do arco (tensão medida entre os terminais da cadeia - lado fase e lado terra).
 - Corrente a 60 Hz.
 - Impulso de corrente (a Fig. 5.1.(6) ilustra o circuito gerador).
- Medição do vento (amplitude, direção e sentido, com taxa de amostragem ≤ 1 s).
- Filmagem (com duas câmeras posicionadas conforme Fig. 5.1.(7), com taxa de registro ≥ 1000 frames/s).
- Medição do espectro de frequência de impedância do circuito ($Z(f)$) até 10 MHz.
- Fotos (acompanhamento do estado da cadeia de isoladores).

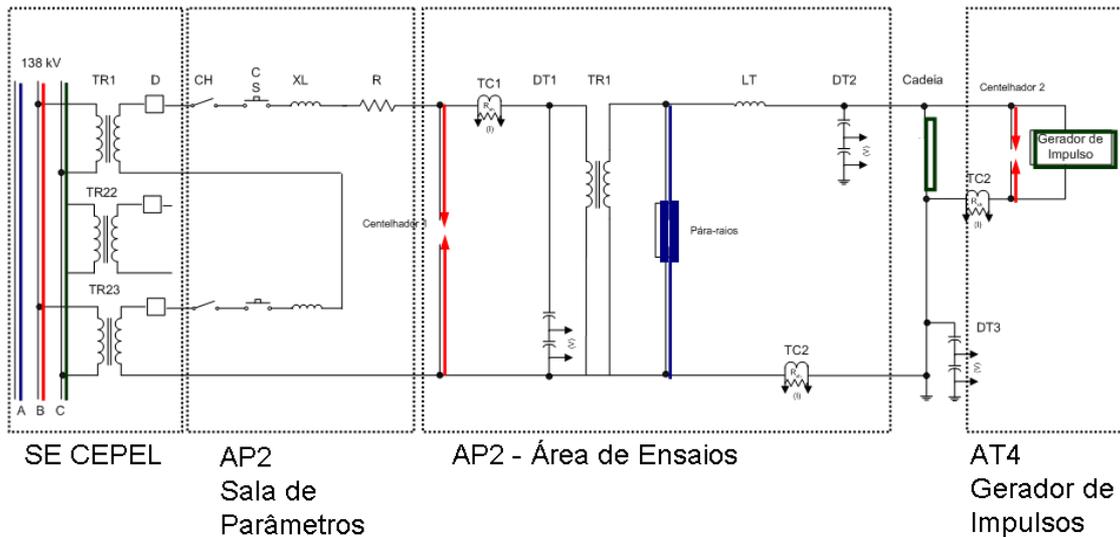


Figura 5.1.(6) – Diagrama do Circuito gerador de arco e correntes de impulso

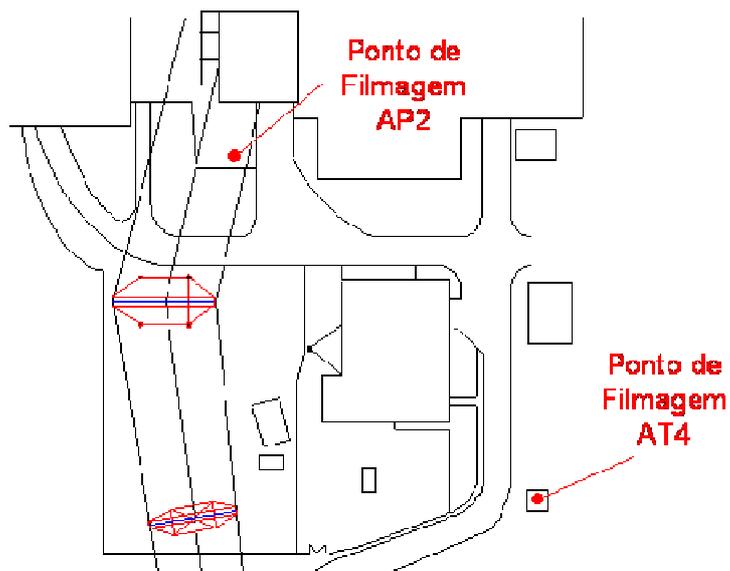


Figura 5.1.(7) – Alocação das Câmeras

Destacam-se alguns aspectos críticos de execução dos ensaios, tais como : distância da fonte ao local do arco, altura das cadeias e vãos (> 25 m), ignição do arco (fio fusível), arcos entre cabo fase e cabo Pára-raios, geração e injeção dos impulsos, distribuição dos impulsos, Medição, Vento e Filmagem.

5.2. Análise do Comportamento do Arco Elétrico a partir de dados experimentais

5.2.1 Comportamento Quasi-Estacionário

5.2.1.(a) Alongamento do Arco

A variação do comprimento do arco, fenômeno relativamente lento e passível de visualização, tem seu comportamento intrinsecamente relacionado ao processo de extinção do arco, uma vez que reflete a influência de diversos fatores ambientais macroscópicos como vento, umidade do ar, pressão e etc, nos processos de ionização e recombinação das moléculas do plasma que compõe o arco, sendo por isso uma forma, ainda que indireta e aproximada, de se registrar tais influências na dinâmica do comportamento do arco.

Ter a informação da variação do comprimento do arco ao longo do tempo é de extrema valia tanto nos processos de análise da resposta dinâmica como transitória do arco, como será visto nos cálculos apresentados, uma vez que nos permite trabalhar com determinadas simplificações, ou aproximações, coerentes com o modelo adotado em cálculos com variação incremental, seja da condutância do arco, seja da corrente e tensão entre seus terminais, ou ainda, campo elétrico.

A partir das medições de tensão e corrente de arco, pode se estimar uma função ao longo do tempo do alongamento do arco ($\ell(t)$).

Outros dados importantes para assessorar tal análise encontram-se nas filmagens e medições de vento.

Como para as grandezas elétricas (tensão e corrente de arco) medidas observou-se um nível elevado de ruído, e o fenômeno em causa é de origem lenta, não associado ao impulso mas apenas às grandezas de origem sustentada, tal problema foi contornado pela utilização direta de suas “pseudo” primeiro-harmônicas. O termo “pseudo” se refere ao fato da tensão entre os terminais do arco e sua corrente não serem exatamente funções periódicas de $-\infty < t < \infty$ (Fig. 5.2.1.(1)).

As filmagens disponíveis foram geradas por duas câmeras posicionadas em locais distintos (Fig.5.2.1.(2)), fornecendo assim dois ângulos para visualização do arco.

Embora não se tenha, apenas com essas duas câmeras, visão de 360° do arco elétrico, as imagens disponíveis colaboram significativamente na verificação do comportamento estimado do arco quanto à sua variação de comprimento a partir das grandezas elétricas de tensão entre seus terminais e corrente. No Anexo 7 são apresentadas as imagens das duas câmeras para o ensaio 971 (com corrente de, aproximadamente, 100 Aef).

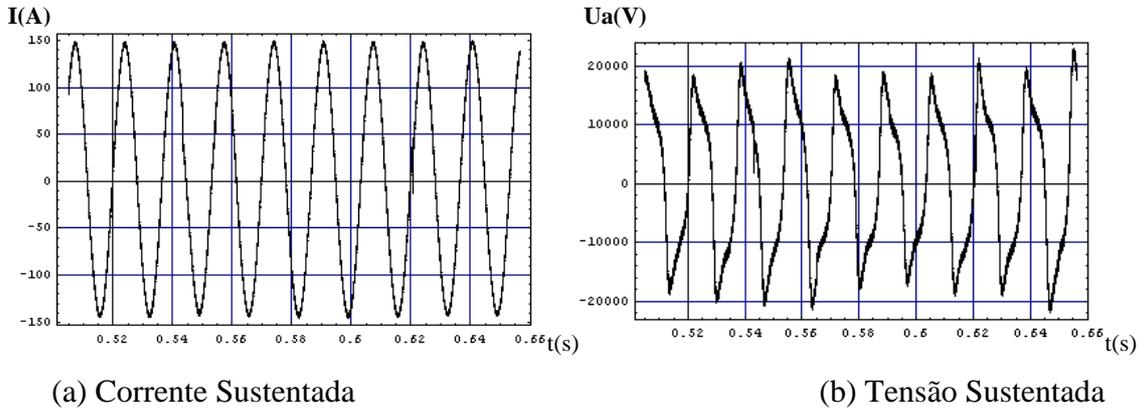


Figura 5.2.1.(1) – Corrente e Tensão Sustentadas referentes ao Ensaio 971.

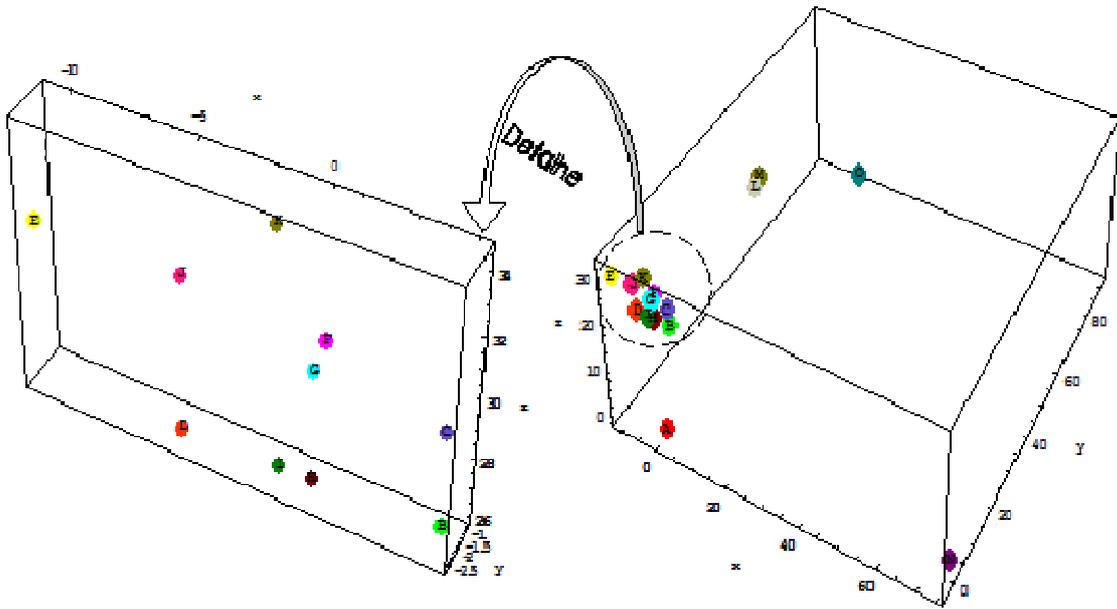


Figura 5.2.1.(2) – Localização de: (A) ponto de aterramento no pé da torre de transmissão A 53, com coordenadas $\{0,0,0\}$; (B) e (C) pontos de contato da cadeia de suspensão em “I” com o condutor e a torre A53; (D) e (E) medidores de velocidade de vento 1 e 2; (F) , (G) , (H) e (I) pontos de conexão dos divisores (medidores) de tensão; (J) e (K) pontos de contato da cadeia de suspensão em “V” com o cabo condutor e a torre A53; (L) e (M) pontos de contato entre a cadeia de ancoragem com o cabo condutor e a torre D51; (N) **posição de filmagem AT 04**, com coordenadas: $\{74,5 , 2,5 , 1,3\}$ e (O) **posição de filmagem AP 02**, com coordenadas: $\{2,5 , 92 , 1,3\}$. Dimensões dadas em metros.

Na determinação de um comprimento de referência (ℓ_{ref}), a partir do qual possa se estabelecer a variação absoluta ou relativa do arco promovida pelos diversos sub-arcos e “loops” que se formam a partir do canal principal, deve se levar em conta não só o comprimento da cadeia mas as demais distâncias para fixação do fio de prova às ferragens (ganchos) auxiliares, especialmente confeccionados para sua instalação, além de um eventual deslocamento do próprio arco.

5.2.1.(b) Procedimentos para cálculo do alongamento do arco

Para definição das características estacionárias do arco, utilizou-se uma curva citada em [5] proveniente de ensaios para arcos no ar, transcrita no Anexo 5.

Da observação da referida curva, podemos aproximar a relação entre campo elétrico (e_a) e corrente (i_a), para cada região de corrente por uma função do tipo :

$$e_a = k i_a^{-\alpha} \quad (5.1),$$

onde k e α são constantes a serem determinadas de acordo com a região de interesse da corrente que se deseja avaliar. A Fig.5.2(3) ilustra a aproximação sugerida pela equação (5.1), destacando também as regiões onde se observa características que melhor se aproximam dos modelos de arco conhecidos de Mayr e Cassie, como mencionado no Cap.4.

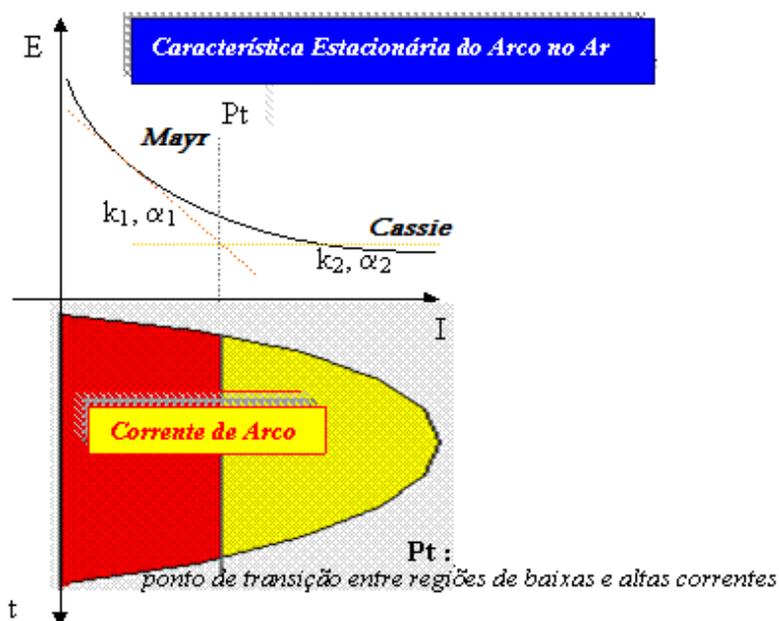


Figura 5.2.1.(3) – Aproximação da Característica Estacionária do Arco Elétrico

No caso de correntes sustentadas cujo valor máximo se situa no entorno da região de transição baixa/alta corrente, é razoável trabalhar com apenas um valor aproximado para k e α . Por exemplo, para uma corrente em torno de 150 A, característica estacionária em escala logarítmica pode ser aproximada por uma reta, conforme apresentado na Fig. 5.2.1.(4).

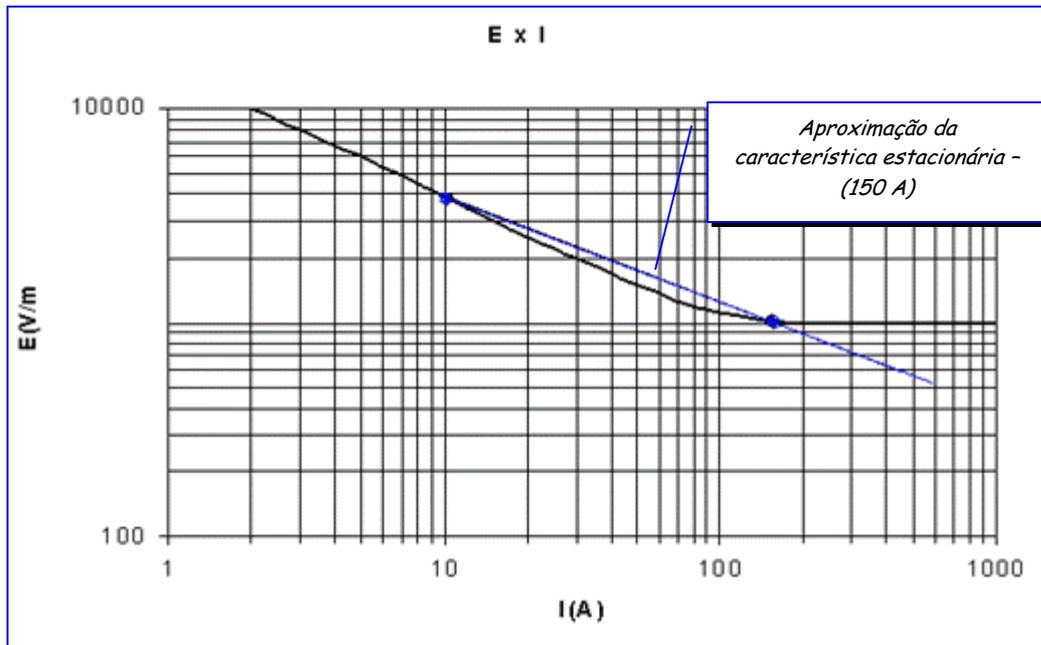


Figura 5.2.1.(4) – Característica Estacionária do Arco Elétrico – aproximação para corrente de 150 A

Da mesma forma, para correntes muito elevadas pode se trabalhar considerando ainda um terceiro valor para k e α , refinando a representação da característica estacionária, considerando então uma tangente à curva na região de baixas correntes, uma referente à região de transição baixa/alta corrente e uma na região de altas correntes.

$$\text{Sendo} \quad u_a(t) = e_a(t) \times \ell(t) \quad (5.2),$$

onde $\ell(t)$ é o comprimento do arco ao longo do tempo e $u_a(t)$ a tensão de arco, para condições de referência :

$$u_{ref} = e_{ref} \times \ell_{ref} \quad (5.2.2).$$

Dividindo a equação (5.2) por (5.2.2) :

$$u_a(t) / u_{ref} = (e_a(t) / e_{ref}) \times (\ell(t) / \ell_{ref}) \quad (5.4),$$

e aplicando (5.1) em (5.4)

$$l(t) / l_{ref} = (u_a(t) / u_{ref}) \times (i_a(t) / i_{ref})^\alpha \quad (5.5),$$

ou ainda ,

$$l(t) = l_{ref} \times (u_a(t) / u_{ref}) \times (i_a(t) / i_{ref})^\alpha \quad (5.6).$$

Quanto à determinação das condições de referência, uma vez estimado o comprimento de referência l_{ref} , as grandezas u_{ref} e i_{ref} são coletadas das medições de tensão e corrente sustentadas no instante em que se tem efetivamente l_{ref} , ressaltando que se observou que as condições de referência não estão associadas às “condições iniciais” de arco estabelecidas nos ensaios.

Condições inicialmente consideradas anômalas no comportamento de $l(t)$ nos instantes iniciais do arco se confirmaram na observação das filmagens – quando da ignição do arco propriamente dita observa-se uma aproximação tal do arco à cadeia de isoladores que o contato, ou a extrema proximidade com sua superfície, parece arrefecê-lo (Fig. 5.2.1.(5)). O comprimento de referência considerado refere-se ao arco estabelecido após seu descolamento da superfície da cadeia de isoladores.



Figura 5.2.1.(5) – Instantes iniciais do arco (arco tangenciando e se afastando, em seguida, da cadeia)

Conforme mencionado anteriormente, para a definição do comprimento de referência deve se considerar, além do comprimento da cadeia de isoladores, distâncias adicionais referentes aos pontos de fixação do fio de prova à cadeia em si, mais um certo deslocamento do arco que pode ser identificado pelas imagens do filme como, aproximadamente, o próprio raio inicial do canal principal (Fig. 5.2.1.(6)).



Figura 5.2.1.(6) – Arco em seu comprimento de referência

Para relacionar o comportamento do alongamento ($\ell(t)$) com tensão e corrente de arco optou-se por trabalhar com a primeira pseudo-harmônica de ambas as grandezas (Figs. 5.2.1.(7) e 5.2.1.(8)), por ser o alongamento um fenômeno “lento”. Dessa forma, os resultados foram pouco afetados pelos ruídos inerentes as medições das grandezas envolvidas.

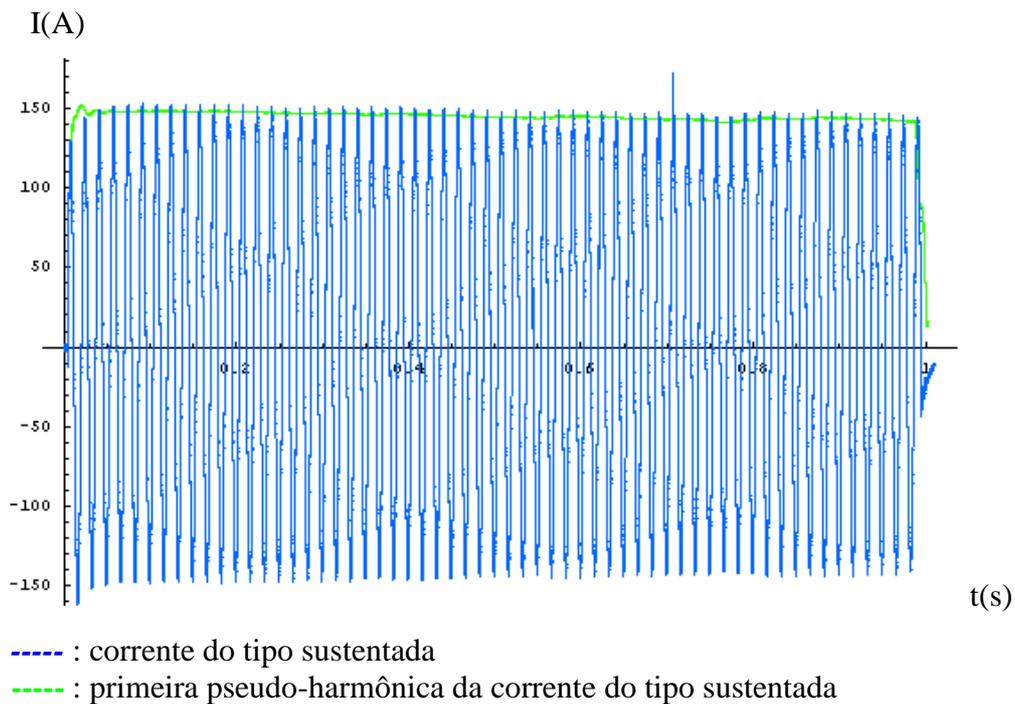
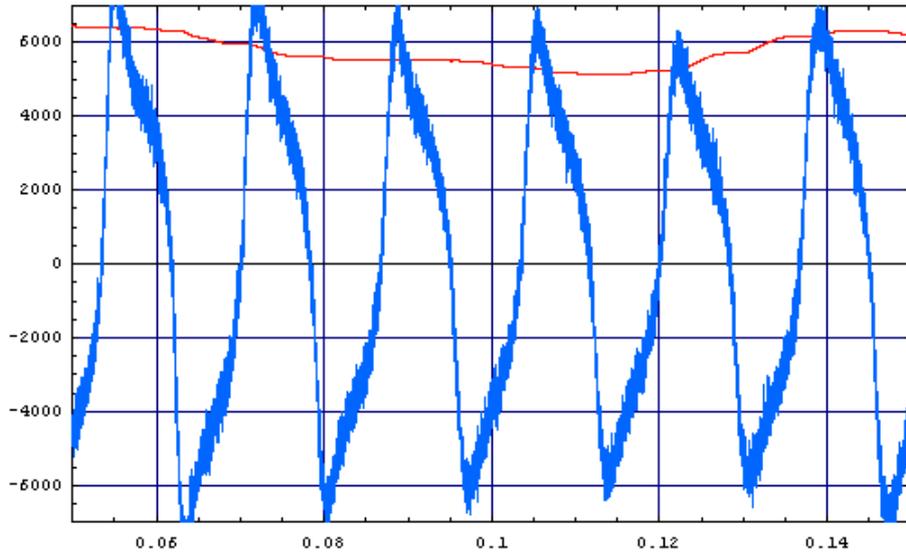


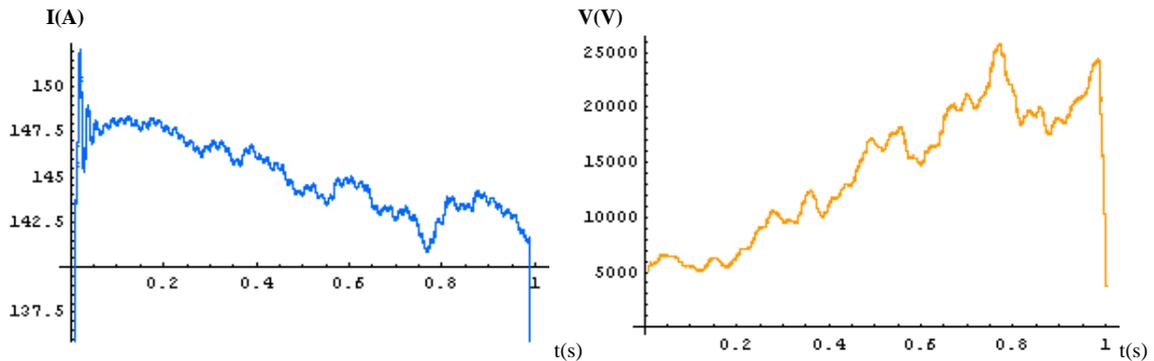
Figura 5.2.1.(7) – Corrente de frequência industrial e sua pseudo primeira-harmônica (ensaio 971)



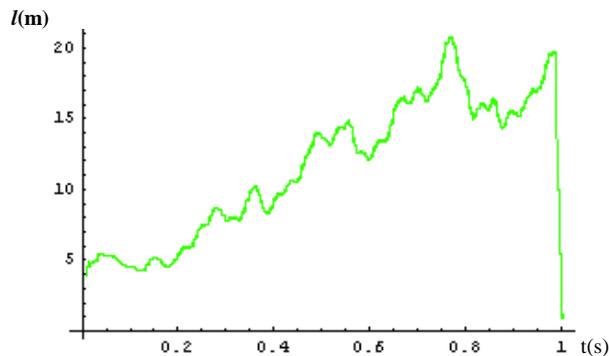
- - - : tensão do tipo sustentada
 - - - : primeira pseudo-harmônica da tensão sustentada

Figura 5.2.1.(8) – Tensão de arco e sua pseudo primeira-harmônica (ensaio 971)

A Fig. 5.2.1.(9) mostra as variações de corrente e tensão de pseudo-primeira harmônica ao longo do tempo, bem como o alongamento relativo associado.



(a) Primeira pseudo-harmônica de corrente (b) Primeira pseudo-harmônica de tensão



(c) Alongamento do Arco

Figura 5.2.1.(9) – Comportamento das pseudo-primeira-harmônicas de corrente e tensão e da variação do comprimento do arco (ensaio 971)

Como pode ser observado no exemplo apresentado na Fig. 5.2.1.(10), o comprimento de referência (l_{ref}) só é observado alguns milissegundos após o início do arco, nesse caso, aos 0,122316 s do início do ensaio. Isso se deve a um processo de contaminação inicial decorrente da desintegração do próprio fio de prova, seguida, em grande parte dos casos, por uma proximidade do arco com a cadeia, que acaba por aparentemente arrefecê-lo. Observou-se que quanto maior o nível de corrente de frequência fundamental, mais pronunciado se torna esse efeito do fenômeno de aproximação/afastamento entre o arco e a cadeia de isoladores.

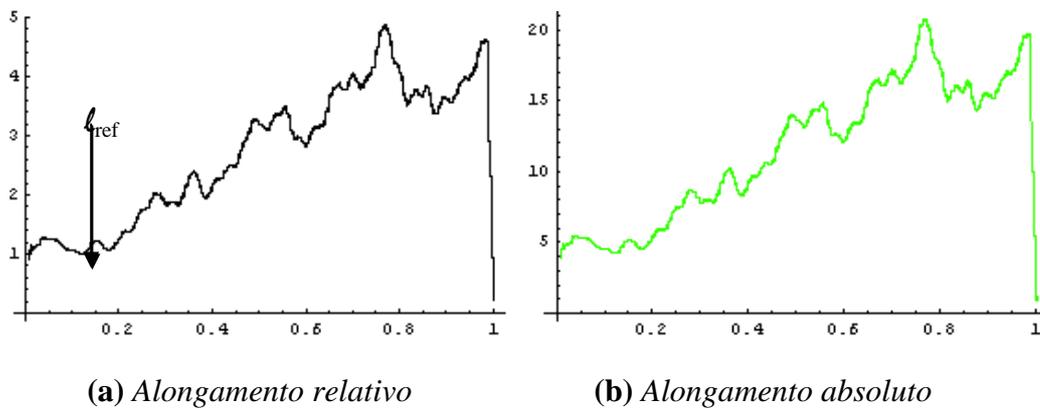


Figura 5.2.1.(10) – Alongamento do Arco ao longo do ensaio 971

5.2.1.(c). Definição da Característica Estática

A partir do estabelecimento da relação entre tensão e corrente de arco em termos estacionários ($u_{0e} = f[i_{0e}]$), ou seja, da característica estática do arco, é possível fazer uma análise de sua estabilidade [2], em bases incrementais, ou ainda, iniciar o processo de avaliação do seu comportamento dinâmico, em bases transitórias.

Os gráficos a seguir apresentam as relações $u_{0e} = f[i_{0e}]$ observadas tendo como exemplo os resultados do ensaio 971.

A título de ilustração, na Fig. 5.2.1.(11) é apresentada o que seria a “característica estática” sem qualquer tratamento das grandezas medidas, para o ensaio 971, ou seja, as relações instantâneas entre tensão e corrente tal qual são medidas .

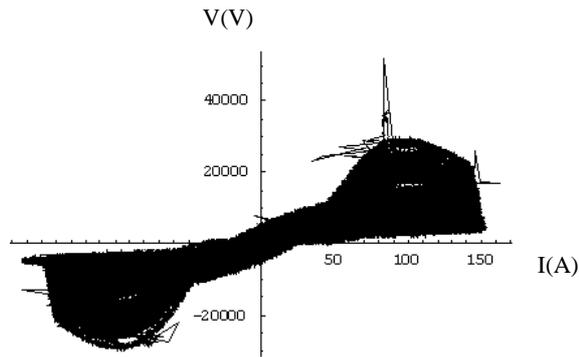


Figura 5.2.1.(11) – $U_a \times I_{60\text{Hz}}$, *sem filtragem das medidas*

Ainda que esteja definida em seu contorno externo, a apresentação da “característica estática” determinada diretamente a partir das medições evidencia a necessidade de tratamento dos dados medidos, seja pela utilização de filtros, seja pela melhor caracterização das grandezas envolvidas.

Pela melhor caracterização das grandezas envolvidas entenda-se a separação, dentre as medições, daquilo que efetivamente se relaciona com o tipo de fenômeno sob avaliação.

No caso da corrente sustentada, além dos filtros para atenuação dos ruídos, deve se obter a corrente efetiva de condução, o que implica na subtração das parcelas da corrente referentes à componente unidirecional, corrente de deslocamento e residual, como apresentado a seguir:

$$i(t) = g(t) \times u(t) + c(t) \frac{du(t)}{dt} + ir(t) \quad (5.7),$$

onde

$g(t) \times u(t)$: parcela referente à corrente de condução propriamente dita

$c(t) du(t)/dt$: parcela referente à corrente de deslocamento

$ir(t)$: parcela referente a uma “corrente residual” resultante de ajustes dos sistemas de medição, dentre outros .

Vale ressaltar que a capacitância ($c(t)$) da parcela referente à corrente de deslocamento (Figs. 5.2.1.(12) a 5.2.1.(14)) refere-se à polarização observada entre as extremidades da cadeia de isoladores, inerente ao efeito capacitivo do plasma. A condutância, grandeza efetivamente modelada, equivale às partículas ionizadas que se deslocam em um campo elétrico; o efeito da polarização, que não é considerado no modelo, está sendo corrigido ao se calcular e subtrair da corrente considerada a parcela referente à capacitância incremental média flutuante ($c(t) du(t)/dt$). Essa “simplificação”

é, aproximadamente, adequada dado que os cálculos efetuados têm por base grandezas unitárias (por unidade de comprimento), fazendo uso, por exemplo, do próprio campo elétrico ao invés da tensão entre terminis do arco, nota-se que a suposição de relação entre capacitância e comprimento implica em aproximações porventura traduzindo desvios significativos da realidade.

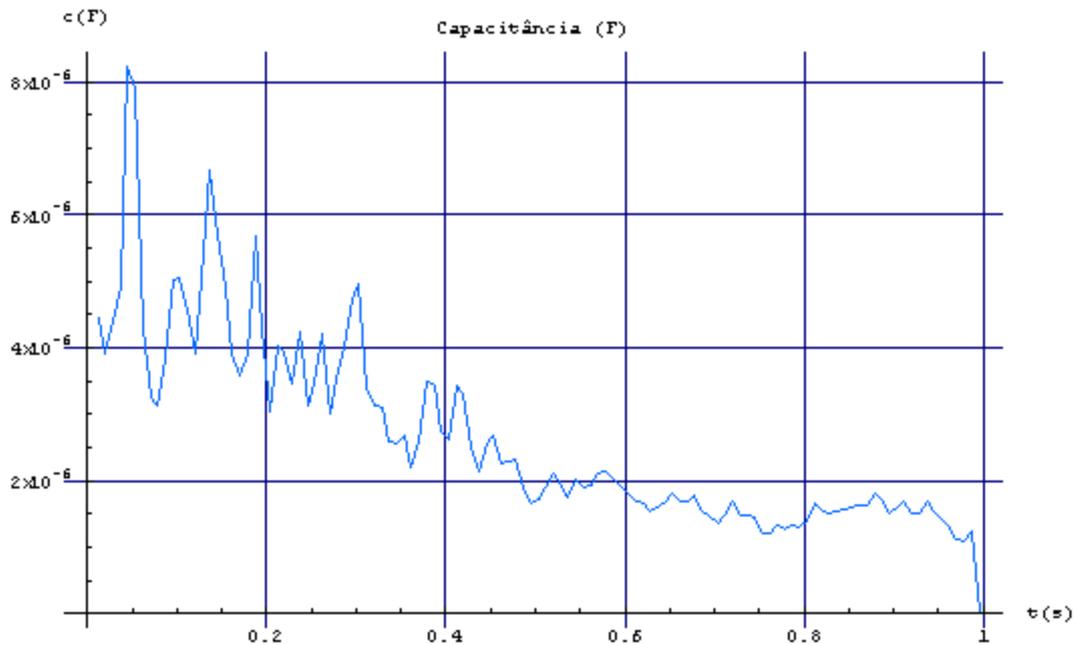


Figura 5.2.1.(12) – Capacitância incremental média, em Farad, calculada para o ensaio 971

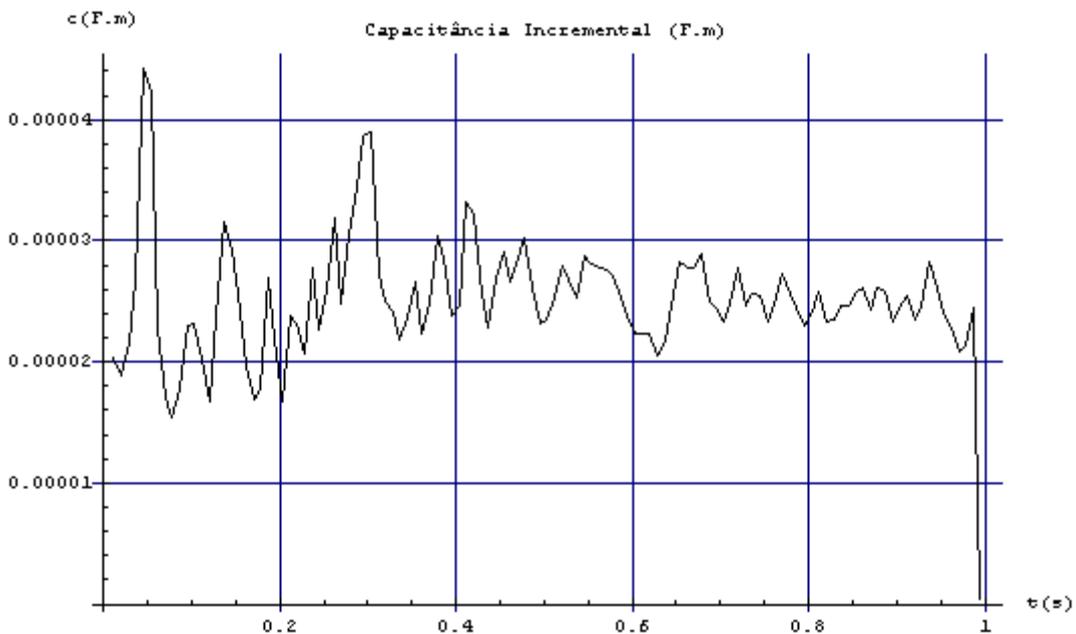


Figura 5.2.1.(13) – Capacitância incremental Média Unitária (F.m), calculada para o ensaio 971

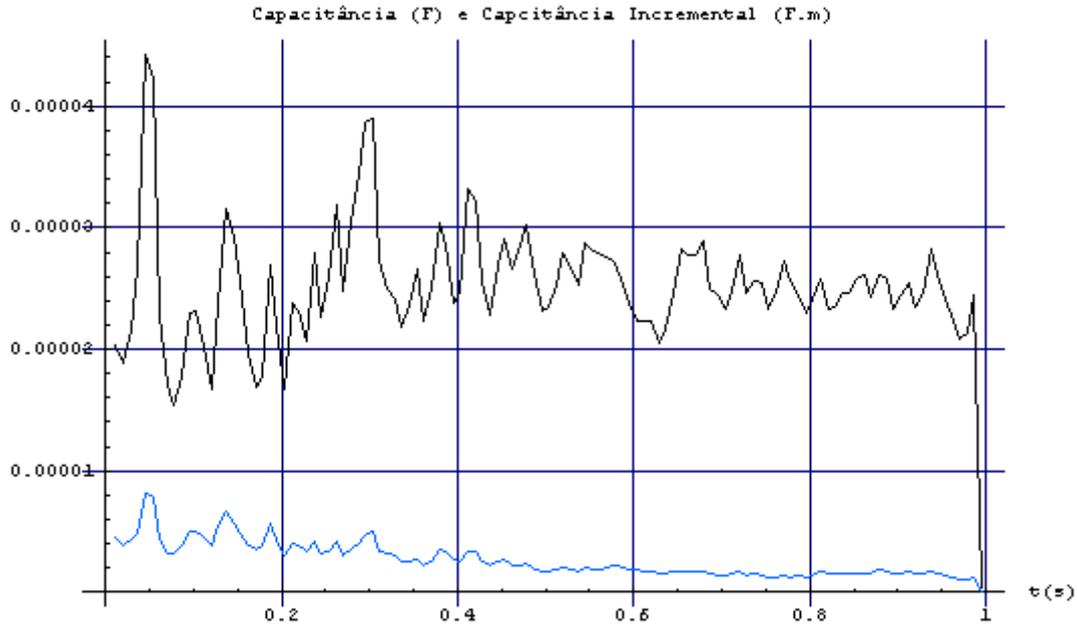


Figura 5.2.1.(14) – Capacitâncias incrementais Total (F) e Unitária (F.m) Médias, calculadas para o ensaio 971

Dessa forma, uma vez filtrada grande parte dos ruídos de alta frequência (Fig.5.2.1.(15)), subtraídas as parcelas referentes à pseudo-harmônica de ordem zero da corrente sustentada e a corrente de deslocamento, a característica estática do arco se apresenta na forma das figuras 5.2.1.(16) a 5.2.1.(18).

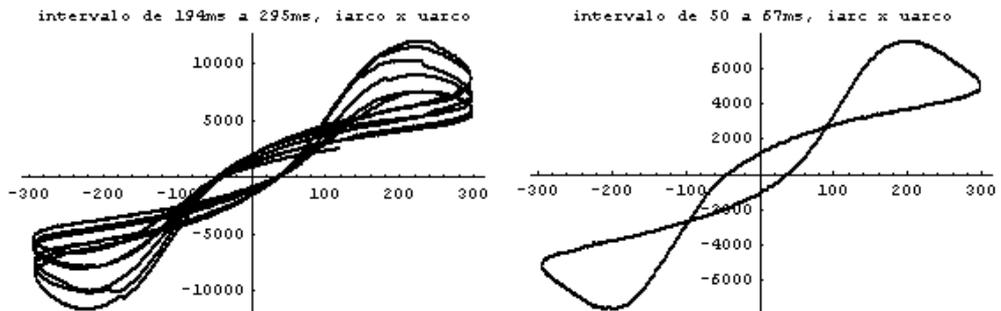


Figura 5.2.1.(15) – $U_a \times I_{60Hz}$, apenas com filtragem dos ruídos das medidas

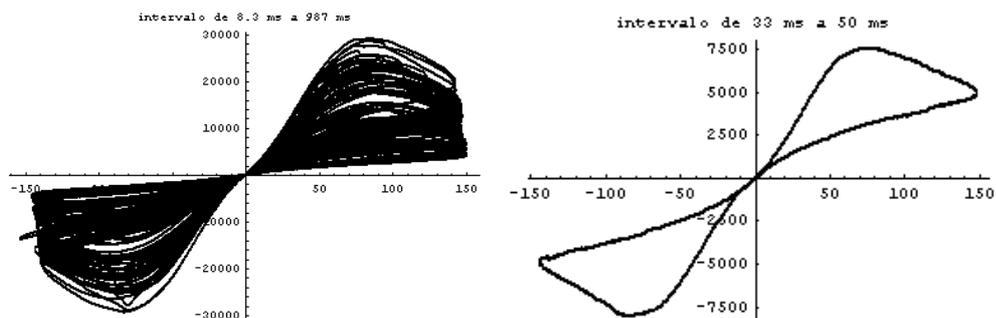


Figura 5.2.1.(16) – $u_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$)

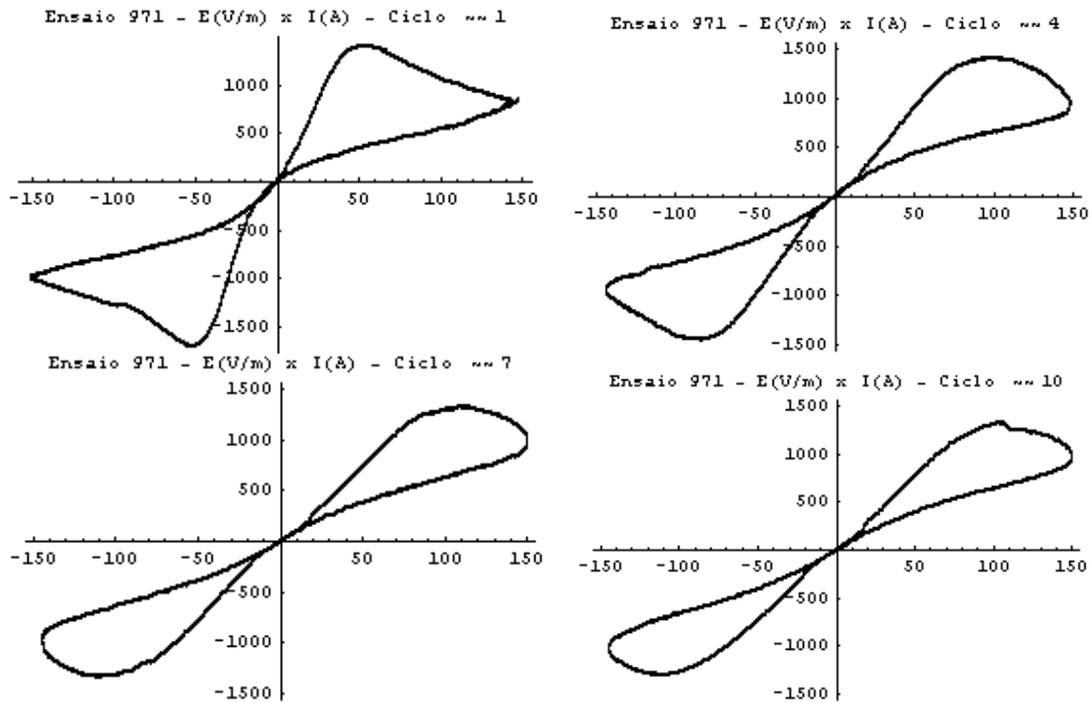


Figura 5.2.1.(17) – $e_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$) – Evolução da característica estática nos ciclos iniciais do arco elétrico

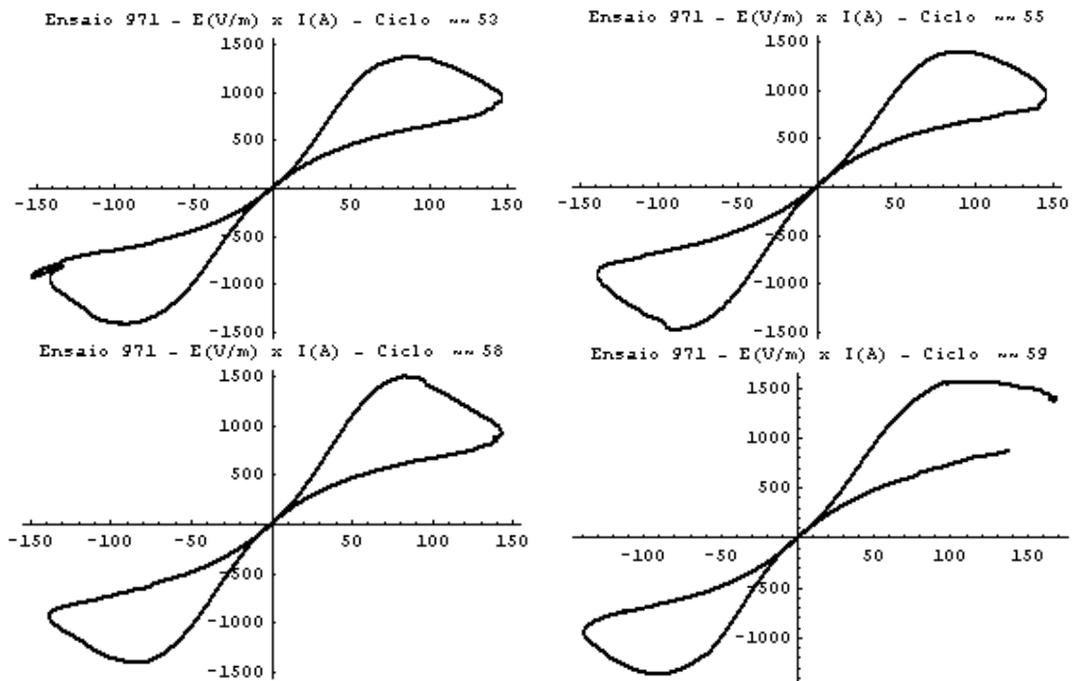


Figura 5.2.1.(18) – $e_a \times i_a$ ($i_a = g(t) \times u(t)$) – Evolução da característica estática nos últimos ciclos do arco elétrico

5.2.2. Comportamento Dinâmico do Arco Elétrico

Embora a avaliação do comportamento “lento” do arco seja de suma importância, é no estudo do comportamento dinâmico que se pode verificar a questão do seu tempo de extinção, informação essencial para implementação do Religamento Monofásico.

A fim de se avaliar o comportamento dinâmico do arco, ou seja, sua resposta transitória, foram previstas injeções de impulsos de corrente de amplitude, polaridade e frente de onda variadas, de forma a permitir a determinação, ou melhor, a estimativa dos parâmetros do modelo do arco analisado, dentre eles as principais constantes de tempo que caracterizam sua resposta.

Como exemplo, as Figs. 5.2.2.(1) a 5.2.2.(3) ilustram a corrente total, sustentada e dois dos impulsos aplicados no ensaio 971, respectivamente.

O modelo estudado, apresentado no Capítulo 4, considera o arco representado por dois sub-arcos em paralelo, caracterizando assim a presença de duas constantes de tempo distintas, com um termo mútuo que traduz o balanço energético entre essas duas “regiões” principais do arco representadas.

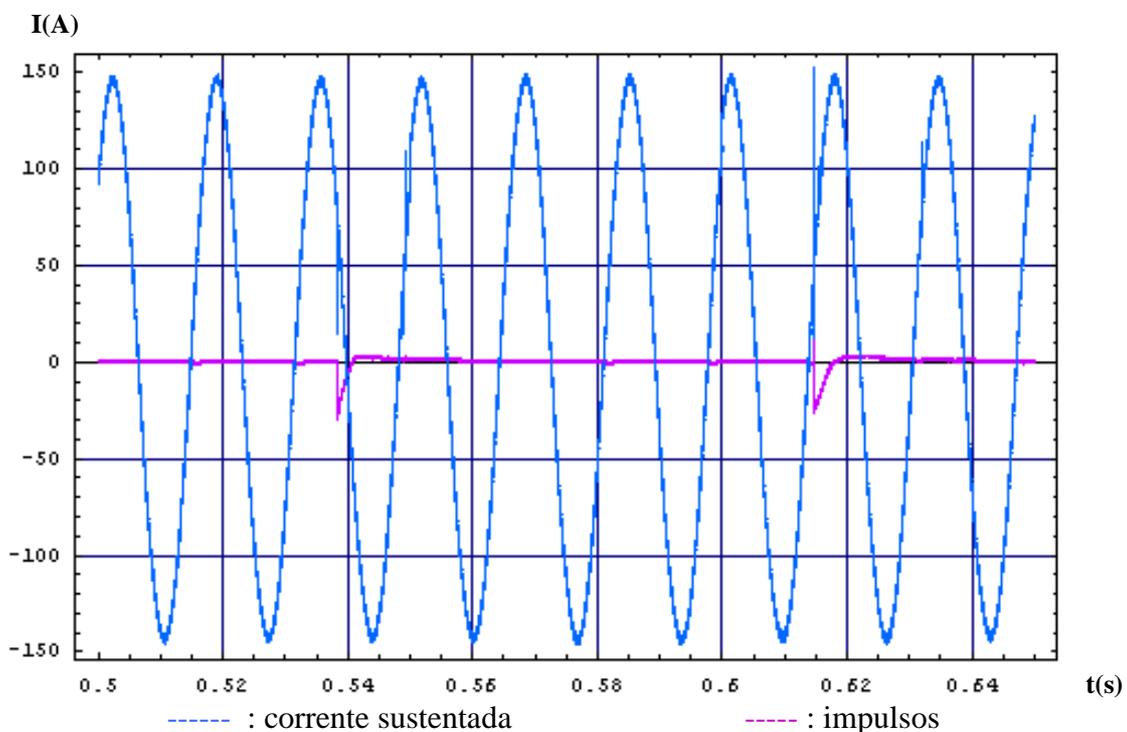


Figura 5.2.2.(1) – Corrente Sustentada e de Impulso ao longo do intervalo de tempo referente aos dois primeiros impulsos aplicados no Ensaio 971

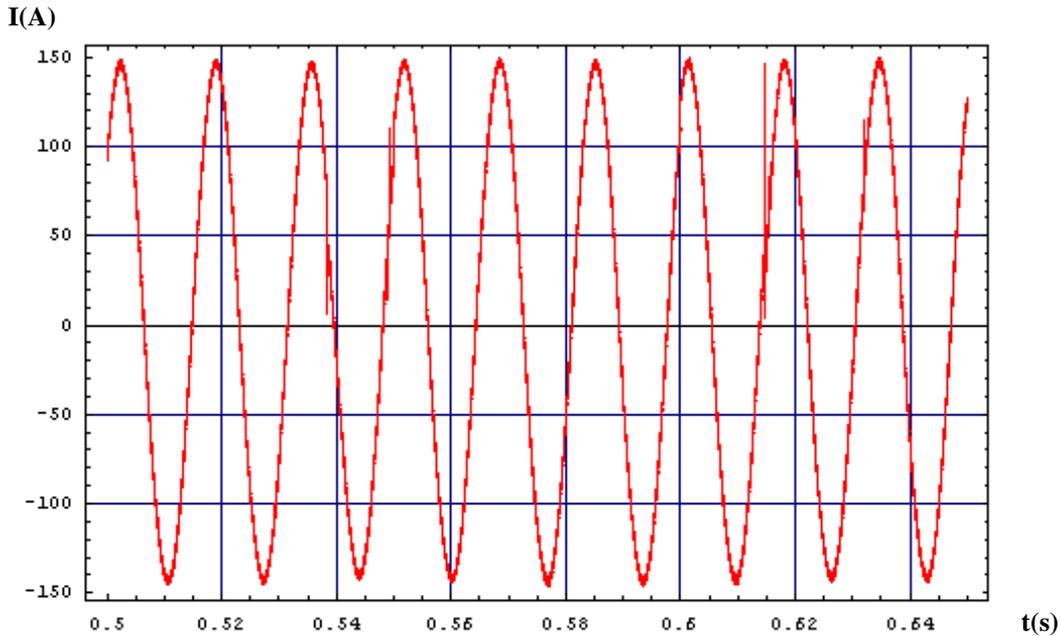


Figura 5.2.2.(2) – Corrente de Arco no intervalo de tempo referente aos dois primeiros impulsos aplicados no Ensaio 971

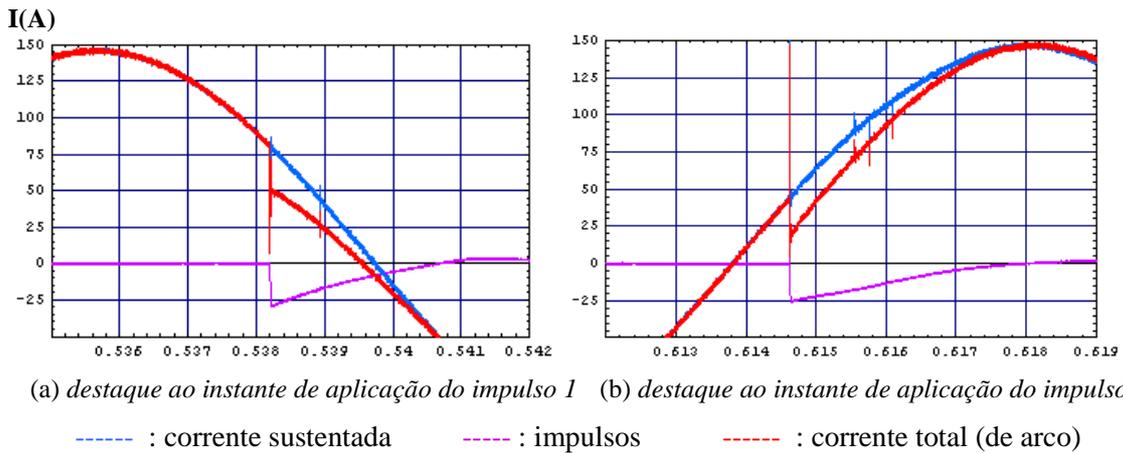


Figura 5.2.2.(3) – Destaque aos instantes de aplicação dos dois primeiros impulsos do Ensaio 971

Uma vez tendo sido calculada a variação do comprimento do arco ao longo do tempo, considerando ainda que os arcos relacionados à linhas de transmissão são relativamente longos, as equações que caracterizam o comportamento dinâmico do arco apresentadas no capítulo anterior (eqs (4.13) e (4.14)) podem ser simplificadas para grandezas unitárias (por unidade de comprimento) como apresentado a seguir :

$$\frac{1}{g_1(t)} \frac{d(g_1(t))}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \left(\frac{p_1}{\xi P_0} + \frac{J_r}{\xi} \left(\frac{\epsilon^* g_2}{g_1} - 1 \right) - 1 \right) \quad (5.8),$$

$$\frac{1}{g_2(t)} \frac{d(g_2(t))}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \left(\frac{p_2}{\eta P_0} + \frac{J_r}{\eta} \left(\frac{g_2}{\varepsilon * g_1} - 1 \right) - 1 \right) \quad (5.9),$$

onde $\eta = 1 - \xi$, $\varepsilon = \xi / \eta$, $p_1 = u_1 \cdot i_1$, $\theta_1 = A_1 \cdot g^\alpha$, $\theta_2 = A_2 \cdot g^\alpha$,
 $P_0 = B \cdot g^\beta$, $J_r = J / P_0 = \text{constante}$, $p_2 = u_2 \cdot i_2$, $r_1 = 1 / g_1 = u_1 / i_1$, $r_2 = 1 / g_2 = u_2 / i_2$
para arcos em paralelo,

$$u = u_1 = u_2, \quad i = i_1 + i_2, \quad g = g_1 + g_2, \quad r = 1 / g, \quad p_1 = (r_1 / (r_1 + r_2)) \cdot p, \quad p_2 = (r_2 / (r_1 + r_2)) \cdot p.$$

No presente caso adotou-se o modelo com dois sub-arcos em paralelo, por tratar-se de um arco longo, em que a influência da região anódica/catódica não é tão significativa. Assim, valoriza-se mais o comportamento da coluna de plasma que forma o arco propriamente dito, ressaltando-se a interação entre a coluna central, mais quente, e a externa, mais fria.

A condutância do arco em função do tempo ($g(t)$), determinada a partir da equação (5.7) ($i(t) = g(t) \times u(t) + c(t) \frac{du(t)}{dt} + ir(t)$) para o ensaio 971 pode ser visualizada na Fig. 5.2.2.(4). Ressalta-se que na sequência de cálculo, primeiro, a partir das medições de $i(t)$ e $u(t)$ filtradas são determinadas as parcelas referentes às correntes residual ($ir(t)$) e de deslocamento ($ic(t) \frac{du(t)}{dt}$), conforme apresentado no item 5.2.3.

Utilizando $l(t)$ (variação do comprimento do arco) calculado com a equação (5.6), temos a função $g(t) \times l(t)$, também apresentada na Fig.5.2.2.(4). O cálculo de $g(t) \times l(t)$ está associado ao fato de se proceder com os cálculos em torno de um ponto, ou ainda, uma pequena fração do arco em função do campo elétrico, o que pode ser traduzido, no caso de $g(t)$ por:

$$g(t) = i(t) / u(t) = i(t) / (e(t) \times l(t)) \Rightarrow g(t) \times l(t) = i(t) / e(t).$$

Doravante, a função que representa $g(t) \times l(t)$ será chamada $g_u(t)$.

Considerando o intervalo de tempo de aplicação de um determinado impulso, a função $g_u(t)$ pode ser representada por uma função do tipo :

$$g_u(t) = g_u(t_0) + A \cdot e^{-t/\theta_1} + B \cdot e^{-t/\theta_2} + C \cdot e^{-t/\theta_3} + D \cdot e^{-t/\theta_4} + E \times \text{Re}[e^{-i\omega t}] \quad (5.10),$$

onde

$g_u(t_0)$: valor da condutância de referência (t_0 : *instante onde se estabelece o comprimento de referência*),

$A \cdot e^{-t/\theta_1}$: parcela referente a menor constante de tempo do arco (θ_1),

$B \cdot e^{-t/\theta_2}$: parcela referente a maior constante de tempo do arco (θ_2),

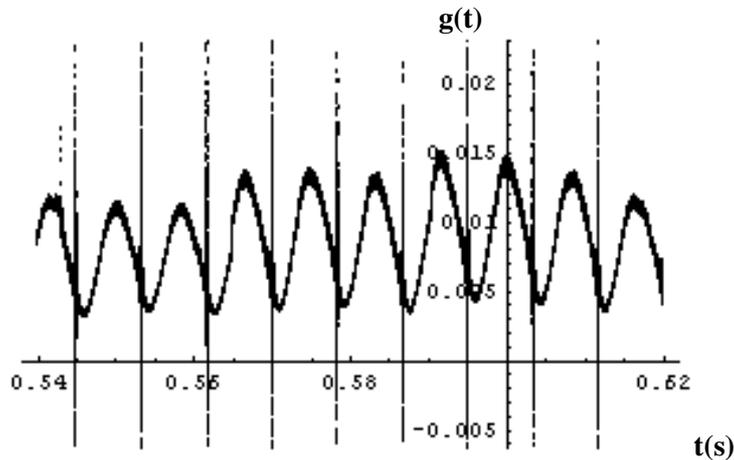
$C.e^{-t/\theta_3}$: parcela referente a menor constante de tempo do impulso (frente de onda)

(θ_3),

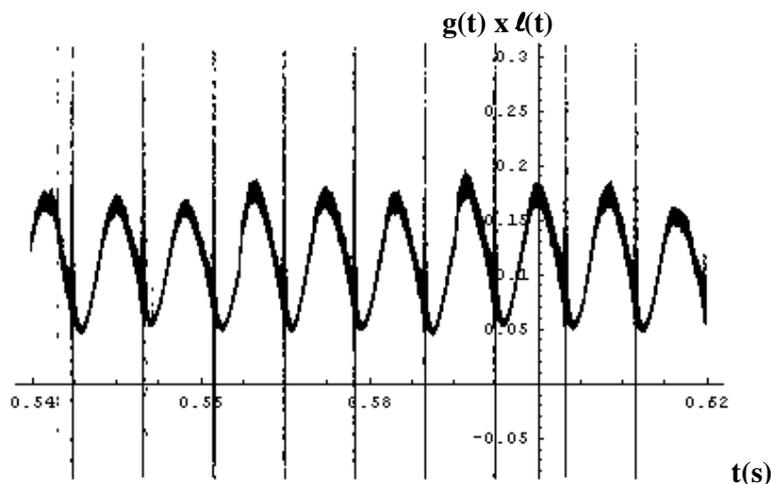
$D.e^{-t/\theta_4}$: parcela referente a maior constante de tempo do impulso (cauda do impulso)

(θ_4),

$E. \text{Re}[e^{-i\alpha}]$: parcela referente a componente sustentada.



(a) $g(t)$ ao longo do impulso 1



(b) $g(t) \times l(t)$ ao longo do impulso 1

Figura 5.2.2.(4) – $g(t)$ e $g(t) \times l(t)$ para o intervalo equivalente ao 1º impulso do ensaio 971

Uma vez que θ_3 e θ_4 podem ser estimados, numa primeira aproximação, por inspeção gráfica das correntes de impulso, e a parcela referente a componente sustentada pode ser medida, para cada conjunto de impulsos/ensaio é possível definir uma gama de valores possíveis para os coeficientes A, B, C e D. Ainda que possam ter suas ordens de grandeza estimadas, as constantes de tempo θ_1 e θ_2 , bem como os demais parâmetros que definem os dois sub-arcs que compõem o modelo analisado, podem ser melhor definidas a partir de um sistema de equações que envolva, além da

equação (5.10) as equações que sintetizam as relações entre grandezas dos sub-arcos (eqs. 5.8 e 5.9).

Como exemplo, tomemos os cálculos acima mencionados para o primeiro impulso do ensaio 971, cujas grandezas medidas encontram-se ilustradas nas Figs. 5.2.2.(6) a 5.2.2.(10).

Exemplo :

❖ **Dados Gerais do Ensaio 971:**

- **Corrente Sustentada :** 100 A, valor eficaz

- **Impulsos :**

- Quantidade : 05
- Amplitude : entre 18 A e 30 A
- Polaridade : Negativa
- Frente de Onda : 5 μ s

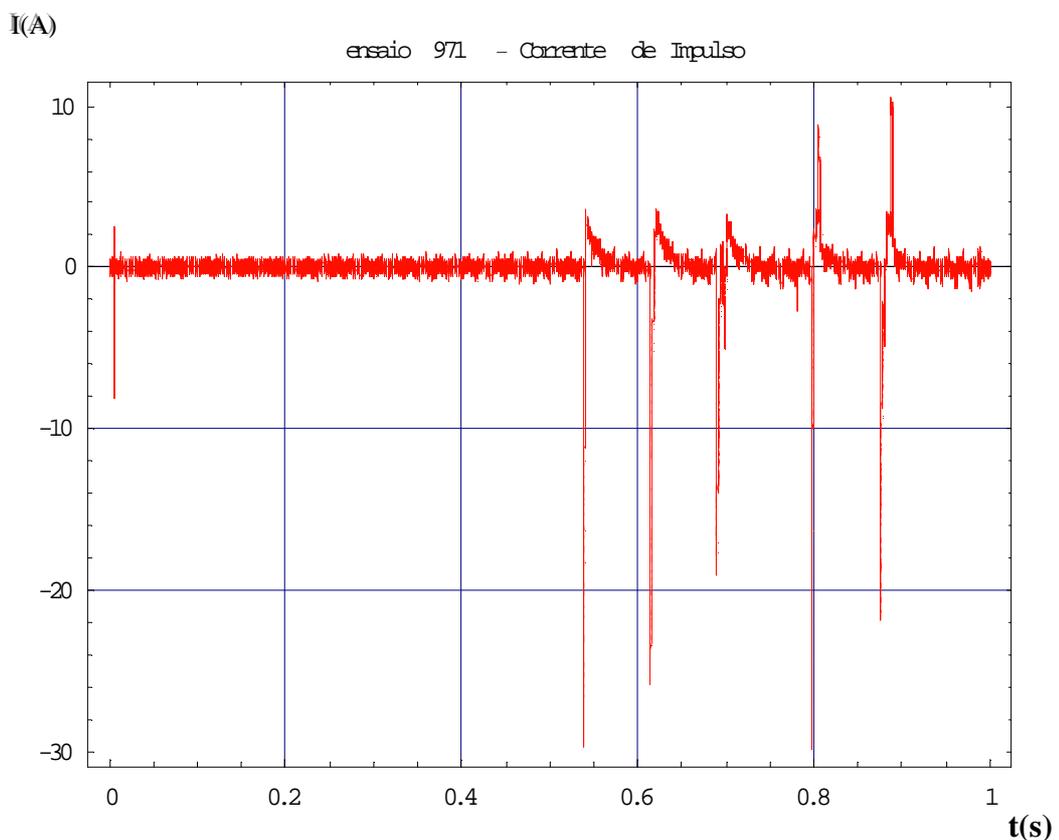


Figura 5.2.2.(5) - Correntes de Impulso – Ensaio 971

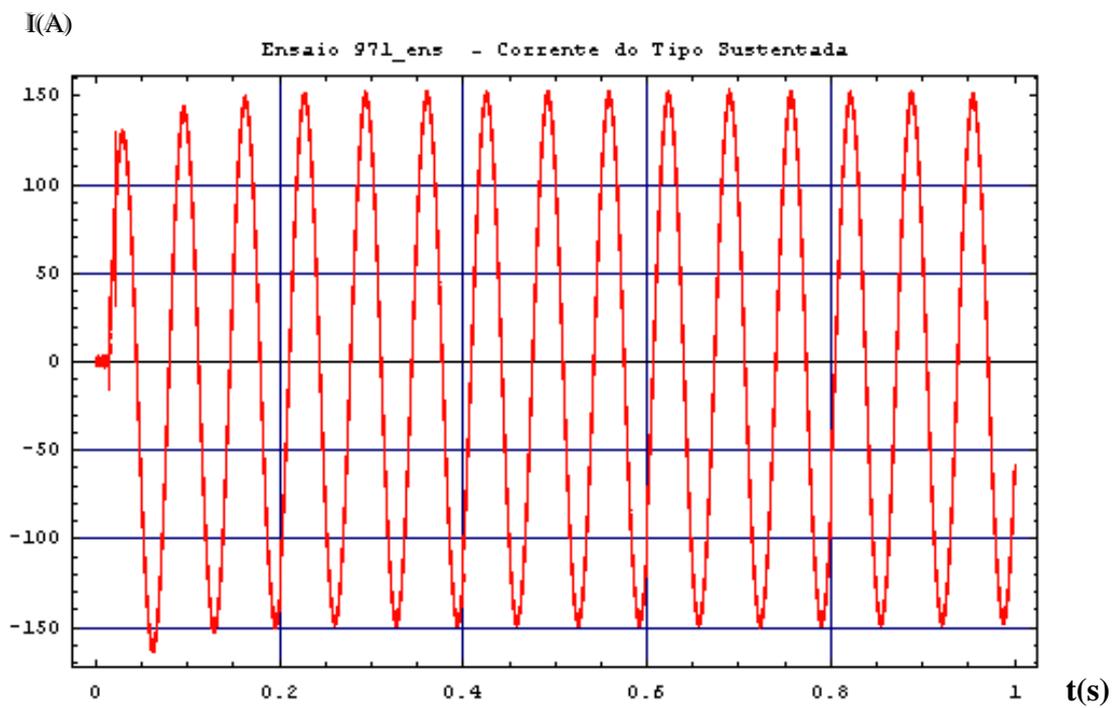


Figura 5.2.2.(6) - Corrente Sustentada – Ensaio 971

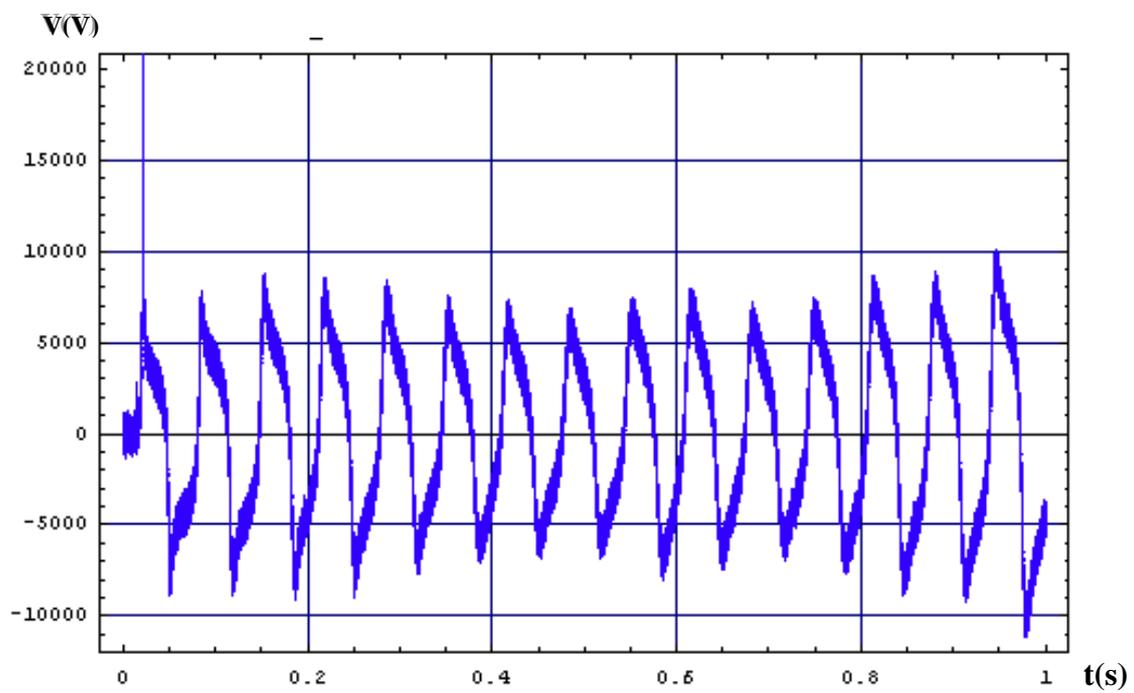


Figura 5.2.2.(7) - Tensão na extremidade da cadeia junto ao condutor

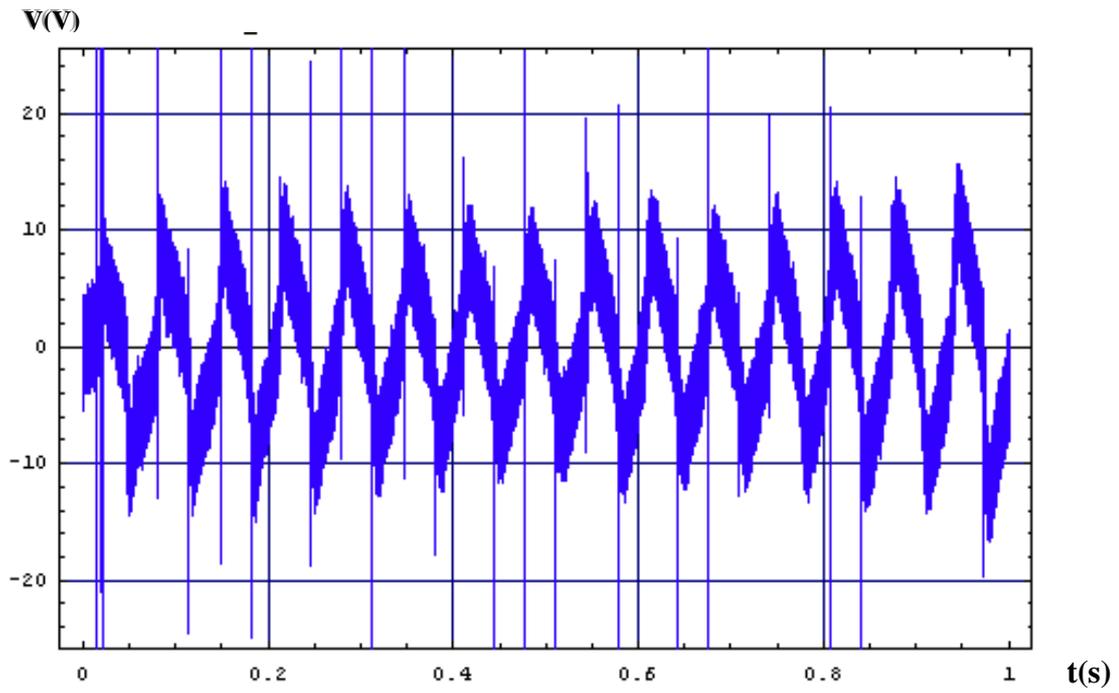


Figura 5.2.2.(8) - Tensão na extremidade da cadeia junto a torre

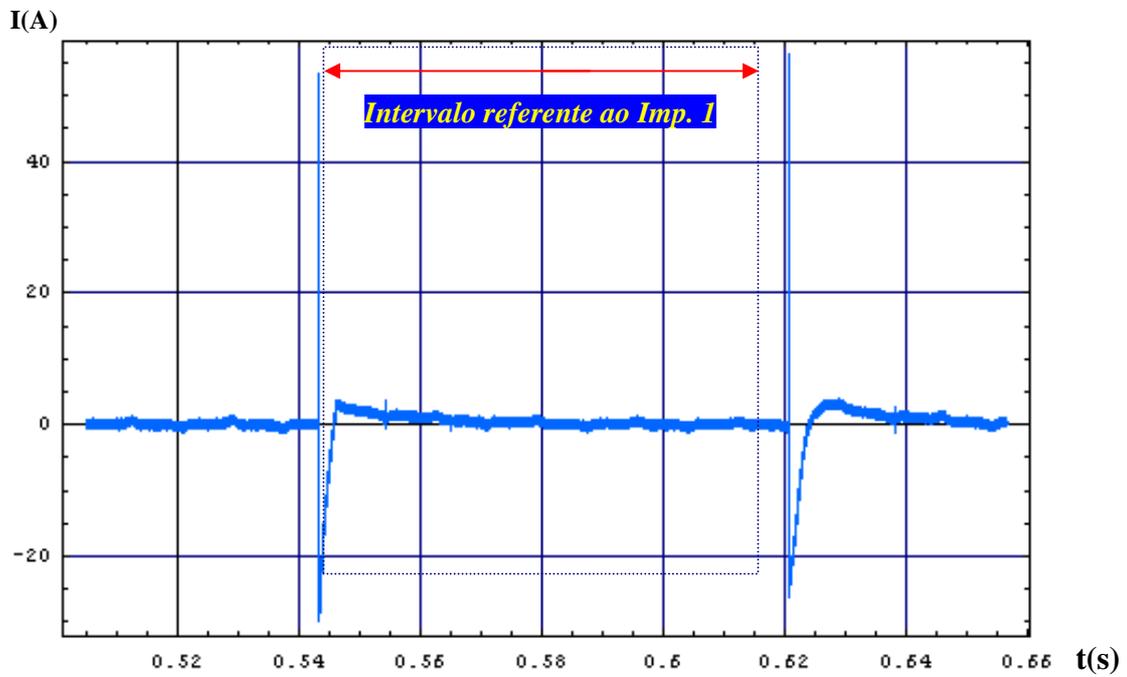


Figura 5.2.2.(9) – Intervalo do 1º impulso do ensaio 971

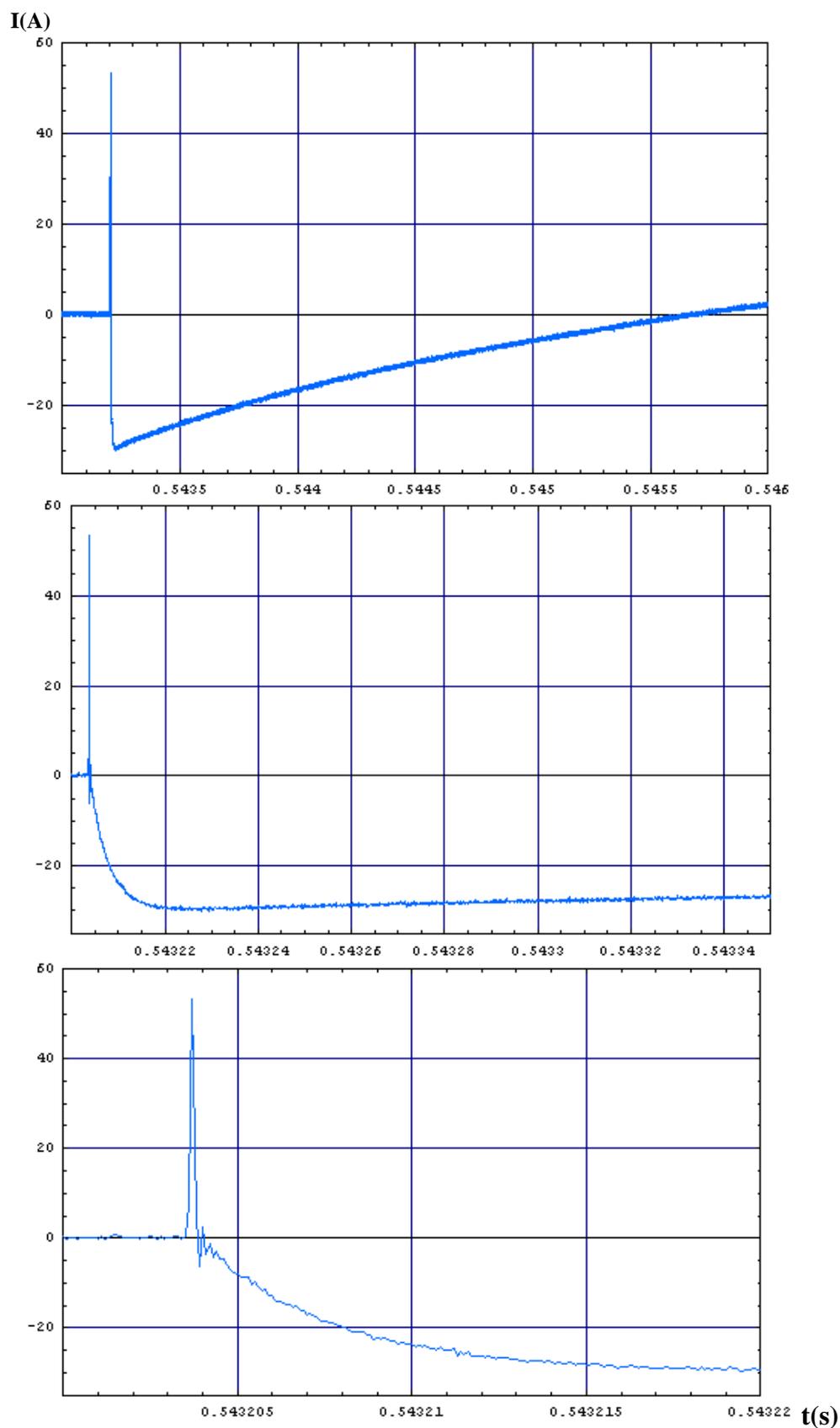


Figura 5.2.2.(10) – Destaque para frente do 1º impulso do ensaio 971

Observa-se um pico reverso pré-impulso cuja origem muito provavelmente esteja relacionada a própria característica construtiva do gerador de impulsos. Esse primeiro pico anômalo pode ser observado também nas figuras a seguir (5.2.2.(11) e 5.2.2.(12)) que apresentam a corrente sustentada e a corrente total de arco.

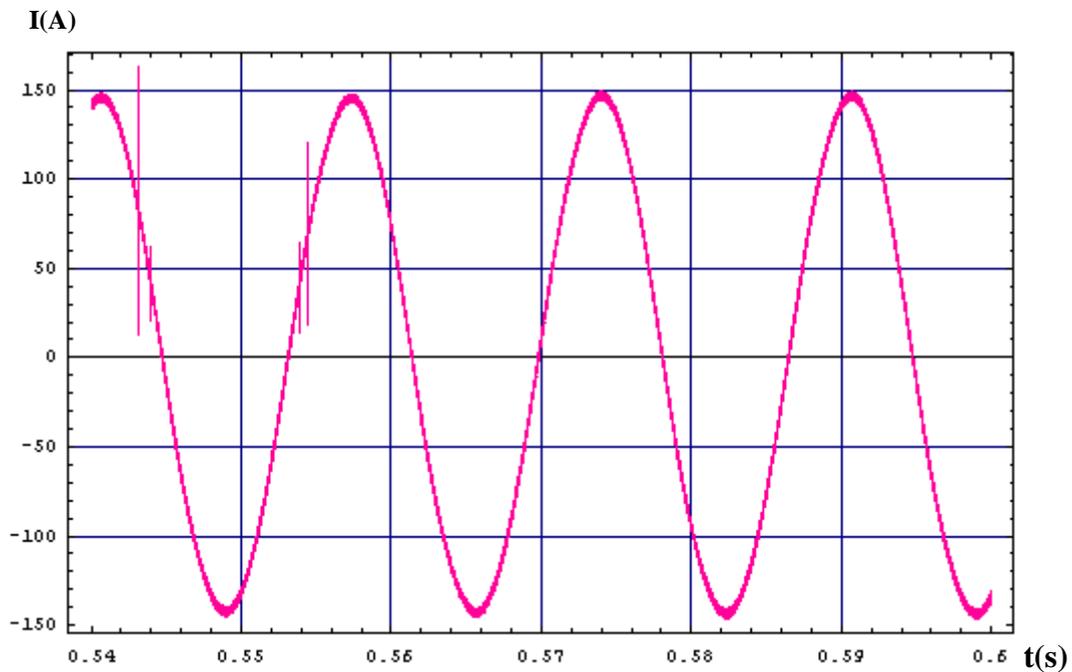


Figura 5.2.2.(11) – Corrente de frequência industrial do ensaio 971

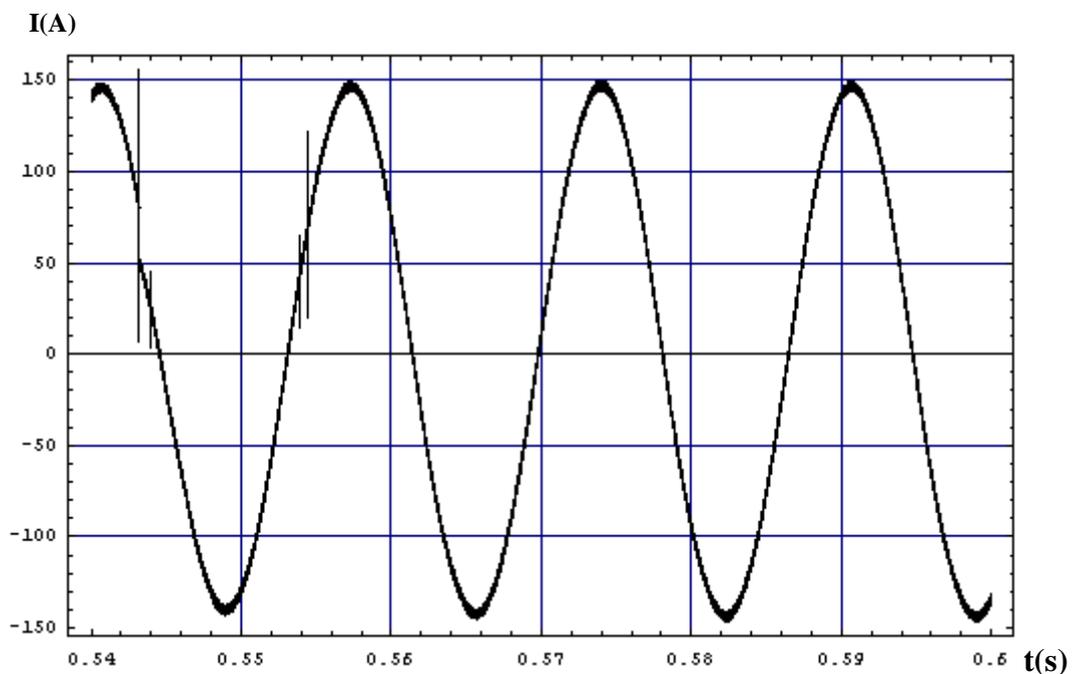


Figura 5.2.2.(12) – Corrente de arco ao longo do intervalo do 1º impulso do ensaio 971

Há ainda interferências, que podem ser observadas nos gráficos apresentados, de amplitude moderada no que se refere a corrente de impulso, mas de presença bem mais acentuada nas grandezas sustentadas, e, por conseguinte, na corrente e tensão total de arco (figs. 5.2.2.(11) a 5.2.2.(13)).

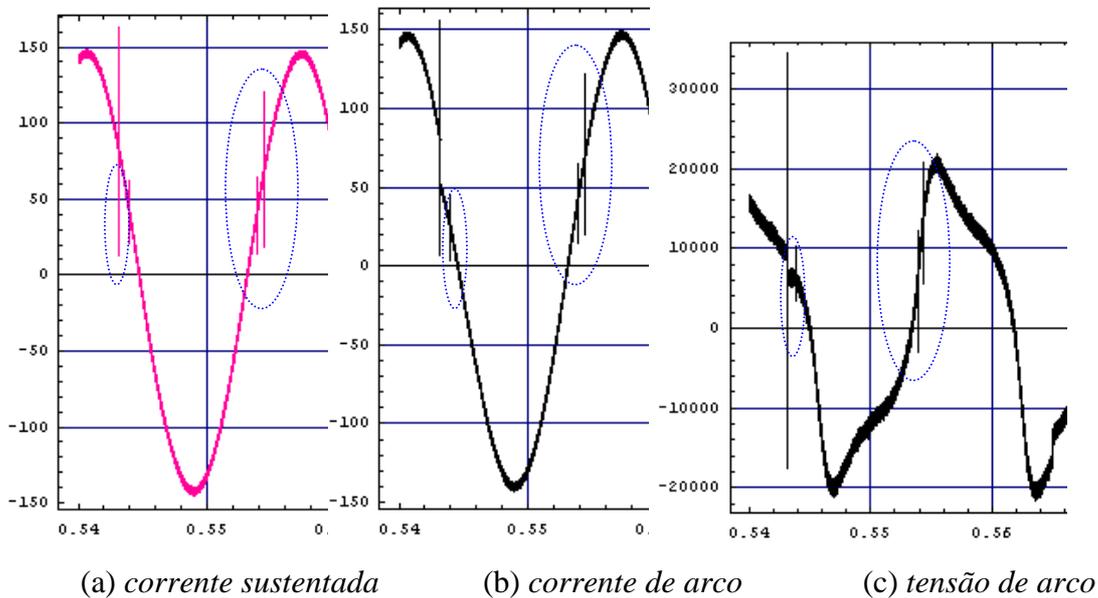


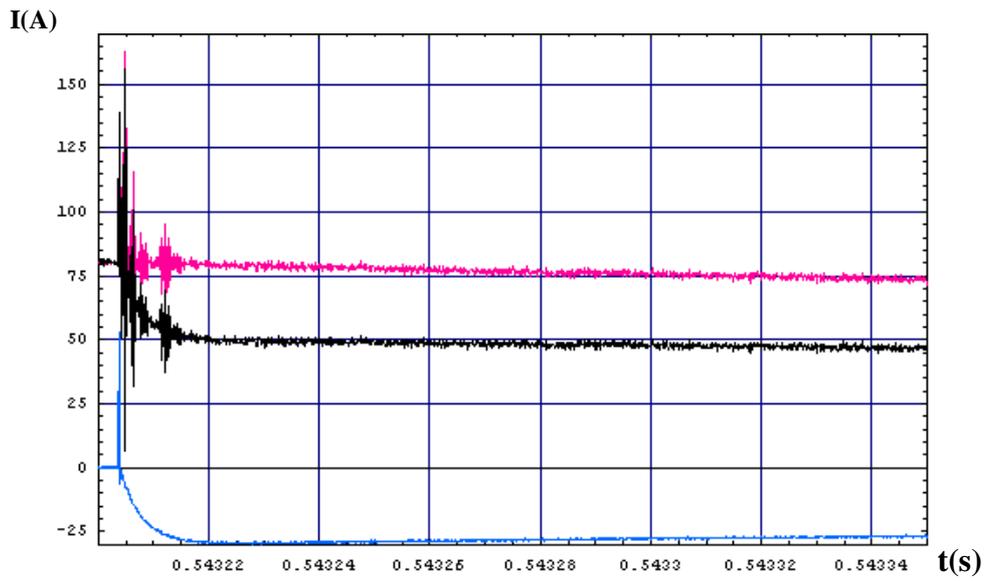
Figura 5.2.2.(13) – Principais interferências observadas no intervalo do 1º impulso do ensaio 971

Ainda que ruídos/interferências possam ser bastante atenuados através da filtragem das grandezas medidas, o quanto filtrar essas grandezas exige uma análise criteriosa, de acordo com o tipo de fenômeno envolvido e nível de ruído observado.

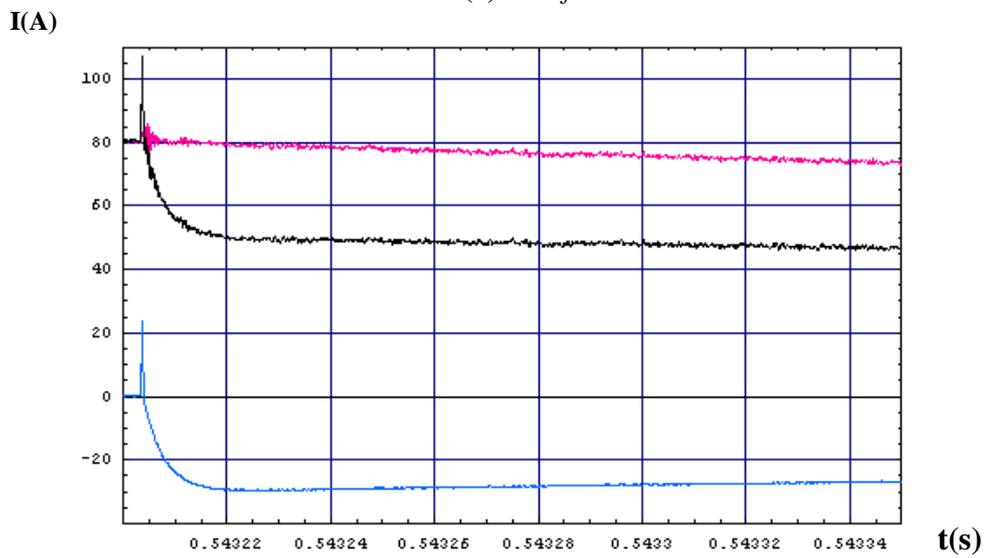
O filtro utilizado envolve uma função do tipo $e^{-(k^2)/p}$, sendo a escolha do parâmetro “p” determinada pelo tipo de informação que se quer preservar. Quanto mais alto o valor de “p” maior a gama de frequências filtradas de peso significativamente reduzido pelo filtro, e por conseguinte, no mesmo sentido, frequências mais altas são filtradas.

Assim, no caso da avaliação do comportamento dinâmico do arco, onde são esperadas constantes de tempo da ordem de 10^{-6} s, “p” é da ordem de 10^0 , enquanto na análise de fenômenos lentos “p” pode chegar a 10^4 sem prejuízo dos estudos.

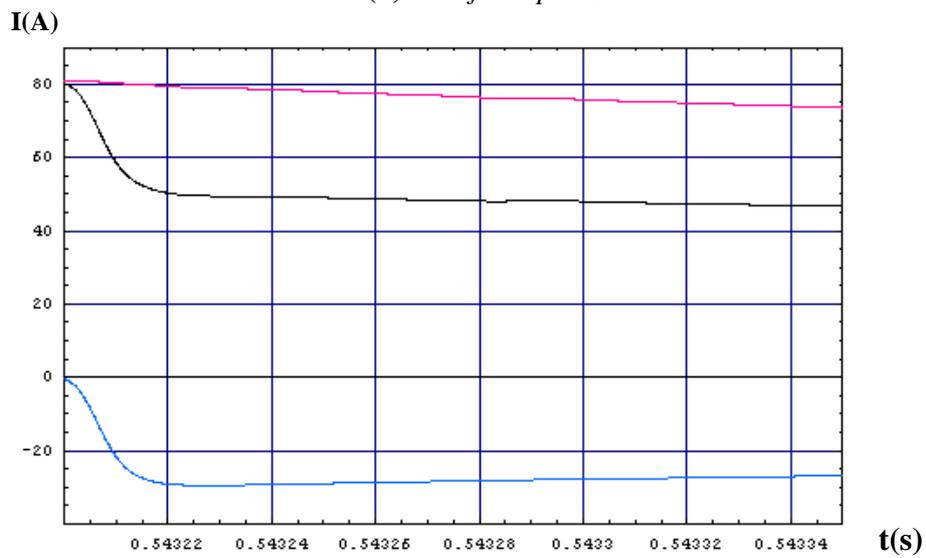
A fig.5.2.2.(14), a seguir, ilustra o efeito da variação de “p” nas formas de onda de corrente, nos instantes iniciais de aplicação do primeiro impulso do ensaio 971.



(a) sem filtro



(b) com filtro $p = 2$



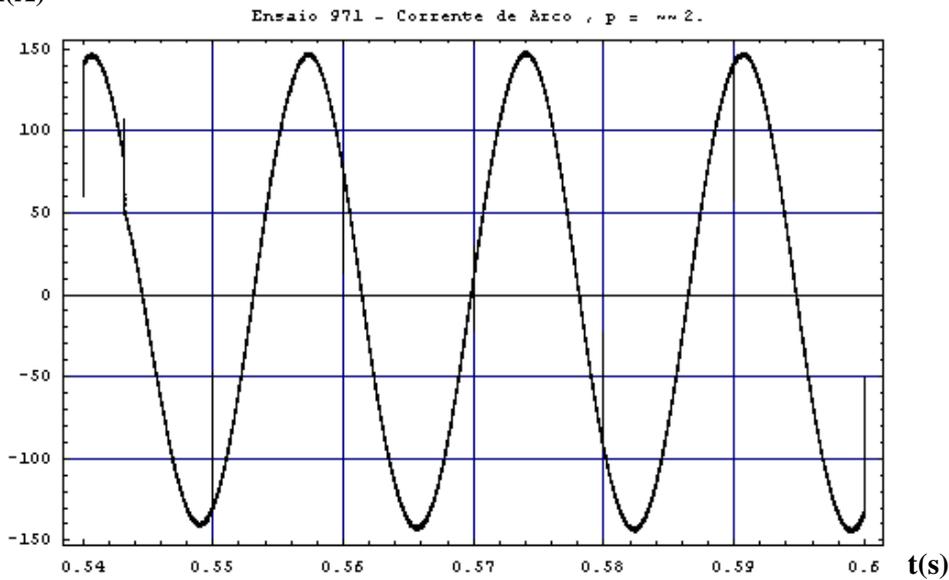
(c) com filtro $p = 2000$

----- : corrente sustentada - - - - : corrente de impulso - - - - : corrente de arco
 Figura 5.2.2.(14) – Corrente sustentada, de impulso e de arco – variação de “p”

Observa-se que para $p = 2000$ os ruídos relacionados às altas frequências foram suprimidos, mas as informações referentes à frente do impulso foram significativamente alteradas.

Para efeitos de estudo do comportamento dinâmico do presente exemplo chegou-se aos valores de $p = 2$, para corrente, e $p = 8$ para tensão (Fig. 5.2.2.(15)). A título de informação, nos estudos relacionados ao regime sustentado utilizou-se $p = 20000$ sem prejuízo dos resultados.

I(A)



V(V)

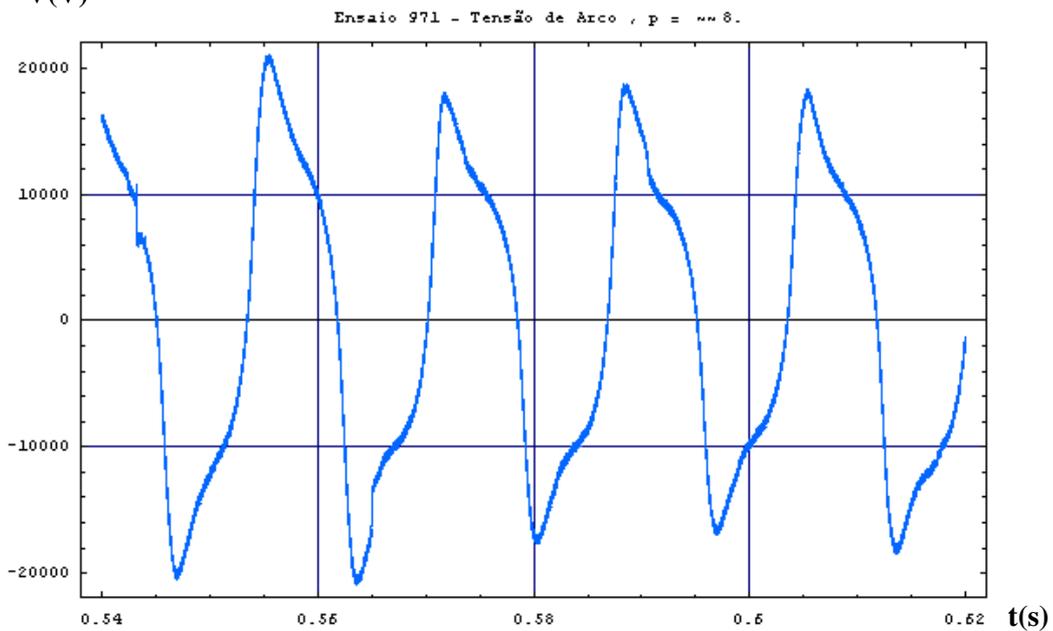


Figura 5.2.2.(15) – Corrente e Tensão Filtradas para análise de comportamento dinâmico do arco

A partir dos dados medidos, pré-processados e filtrados tem-se as grandezas corrente e tensão de arco, e, a partir delas, a condutância de arco $g(t)$. Considerando que a priori calculou-se a variação do comprimento do arco ($\ell(t)$), ao multiplicá-la por $g(t)$ tem-se $g_u(t)$ (Fig.5.2.2.(4)).

Considerando $g_u(t)$ definida como na equação (5.10), pode-se ainda eliminar a parcela referente à componente sustentada, de maneira a concentrar os valores em torno dos parâmetros que afetam diretamente o cálculo das variáveis relacionadas ao comportamento dinâmico do arco. A nova $g_u(t)$, calculada a partir da subtração dos valores referentes a componente sustentada, passou a se chamar $g_{cor_u}(t)$:

$$g_u(t) = g_u(t_0) + A.e^{-t/\theta_1} + B.e^{-t/\theta_2} + C.e^{-t/\theta_3} + D.e^{-t/\theta_4} + E.Re[e^{-i\omega t}],$$

$$g_{cor_u}(t) = g_u(t_0) + A.e^{-t/\theta_1} + B.e^{-t/\theta_2} + C.e^{-t/\theta_3} + D.e^{-t/\theta_4} \quad (5.11)$$

onde

$g_u(t_0)$: valor da condutância de referência (t_0 : instante onde se estabelece o comprimento de referência).

$A.e^{-t/\theta_1}$: parcela referente a menor constante de tempo do arco (θ_1)

$B.e^{-t/\theta_2}$: parcela referente a maior constante de tempo do arco (θ_2)

$C.e^{-t/\theta_3}$: parcela referente a menor constante de tempo do impulso (frente de onda) (θ_3)

$D.e^{-t/\theta_4}$: parcela referente a maior constante de tempo do impulso (cauda do impulso) (θ_4)

A Fig.5.2.2.(16) apresenta, para efeitos de comparação, as funções que representam a “condutância unitária” com e sem a parcela referente ao regime sustentado :

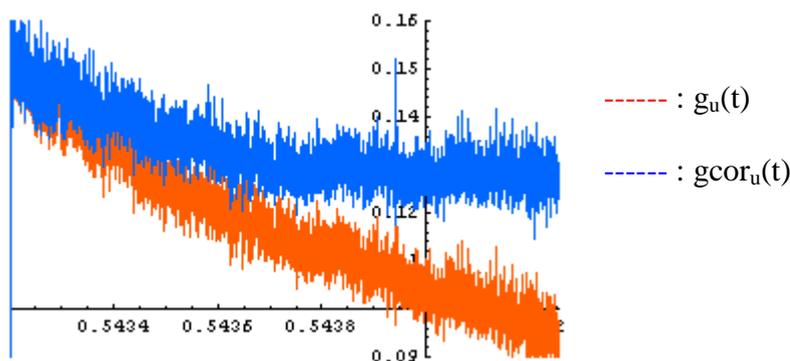


Figura 5.2.2.(16) – $g_u(t)$ e $g_{cor_u}(t)$ nos 1ms iniciais do impulso 1 do ensaio 971

Como já mencionado, a partir dos gráficos da corrente pode-se definir as constantes de tempo relacionada a frente e cauda do impulso (θ_3 e θ_4 , respectivamente).

Da mesma forma, da observação do gráfico da condutância na região do impulso, é possível se estimar a ordem de grandeza das constantes de tempo θ_1 e θ_2 a serem determinadas. A precisão dessa estimativa fica tão mais prejudicada quanto maior for o nível de ruído observado, daí a dificuldade de se estabelecer de antemão um valor mais preciso dessas grandezas, que será determinado a partir de cálculos processados levando em consideração, além da equação 5.11, as equações que definem os dois sub-arcos que representam o arco.

A tabela a seguir lista algumas constantes de tempo observadas para cada uma das grandezas mencionadas acima, agrupadas de acordo com suas respectivas definições, quais sejam :

Tabela 5.1 - Constantes de Tempo observadas com o ensaio 971

<i>Grandeza</i>	<i>g(t)</i>		<i>Impulso</i>	
<i>Variável</i>	$\theta_1(\mu\text{s})$	$\theta_2(\mu\text{s})$	$\theta_3(\mu\text{s})$	$\theta_4(\text{ms})$
	0,8; 1,175; 2,12; 2,8; 3,36	36,6 ; 78,2; 79,5.	4,054; 4,797; 5,6081	1,3; 1,61; 2,49; 3,19; 3,22
$\theta_1(\mu\text{s})$: menor constante de tempo do arco		$\theta_3(\mu\text{s})$: frente do impulso		
$\theta_2(\mu\text{s})$: maior constante de tempo do arco		$\theta_4(\text{ms})$: cauda do impulso		

A estratégia mais direta para cálculo seria concentrar num mesmo sistema de equações todas as variáveis e coeficientes a serem determinados. Entretanto, devido ao elevado nível de ruído observado ainda em $g_u(t)$, os cálculos não apresentaram resultados satisfatórios.

Um fator perturbador dos cálculos é a região de $g(t)$ (ou suas variações) na vizinhança da passagem por zero da tensão ou corrente (Fig.5.2.2.(17)), sobretudo no que se relaciona às menores constantes de tempo. Dessa forma, os cálculos iniciais se concentraram nos instantes do impulso que antecedem essa região “turbulenta”, de derivadas elevadas.

Optou-se então por trabalhar a priori somente com a equação 5.11, ajustando dessa forma relações mais firmes entre seus coeficientes (A, B, C e D) e parâmetros (θ_1 , θ_2 , θ_3 e θ_4) de forma a traduzir o mais próximo possível, o comportamento observado

em $g_u(t)$, a serem incluídas posteriormente na determinação dos parâmetros dos sub-arcos.

Os cálculos tomaram por base listas de resultados dos cálculos para os parâmetros acima com distribuição de pontos variadas ao longo da função calculada, considerando variações dos filtros aplicados aos dados de ensaios. As Figs. 5.2.2.(18) a 5.2.2.(23) a seguir ilustram a combinação das listas e filtros considerados. Foram consideradas quatro listas para o caso sem filtro, sendo que as três primeiras se limitam ao intervalo inicial de 1,5 ms do impulso e a última vai a 3ms, abrangendo a região “conturbada” da condutância (Fig.5.2.2.(18)). Para os casos com filtro, para cada ajuste de filtro foram consideradas também quatro listas de amostra de pontos (Fig.5.2.2.(19)).

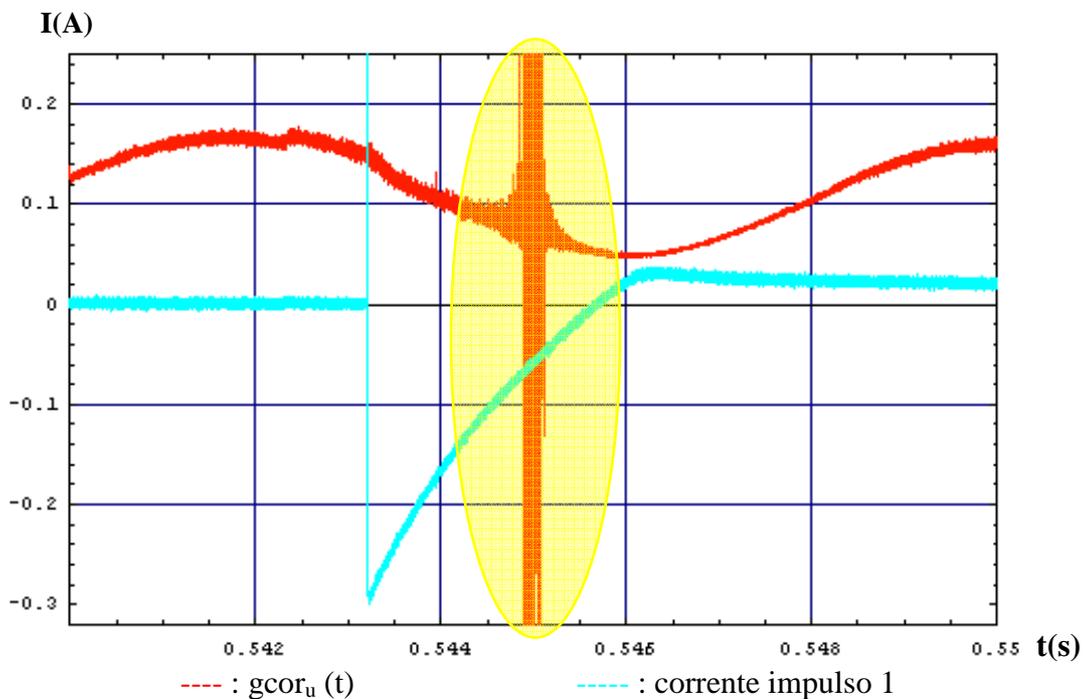


Figura 5.2.2.(17) – Destaque de região da condutância referente à passagem por zero de corrente e tensão

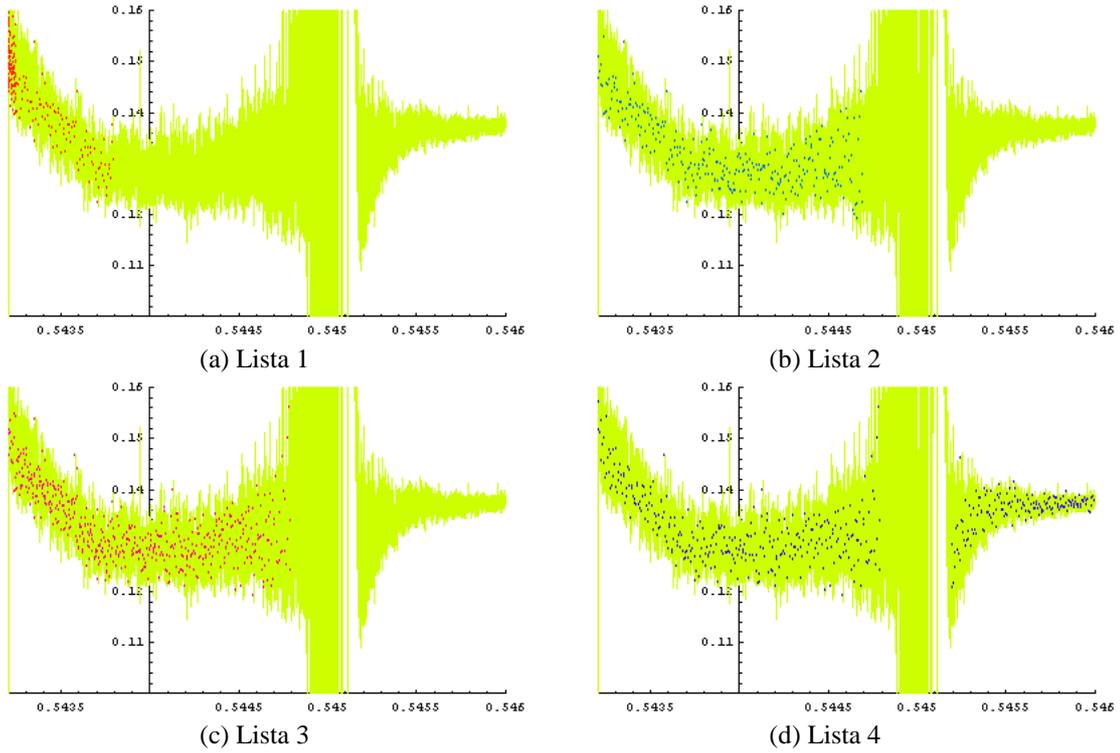


Figura 5.2.2.(18) – Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, sem filtro.

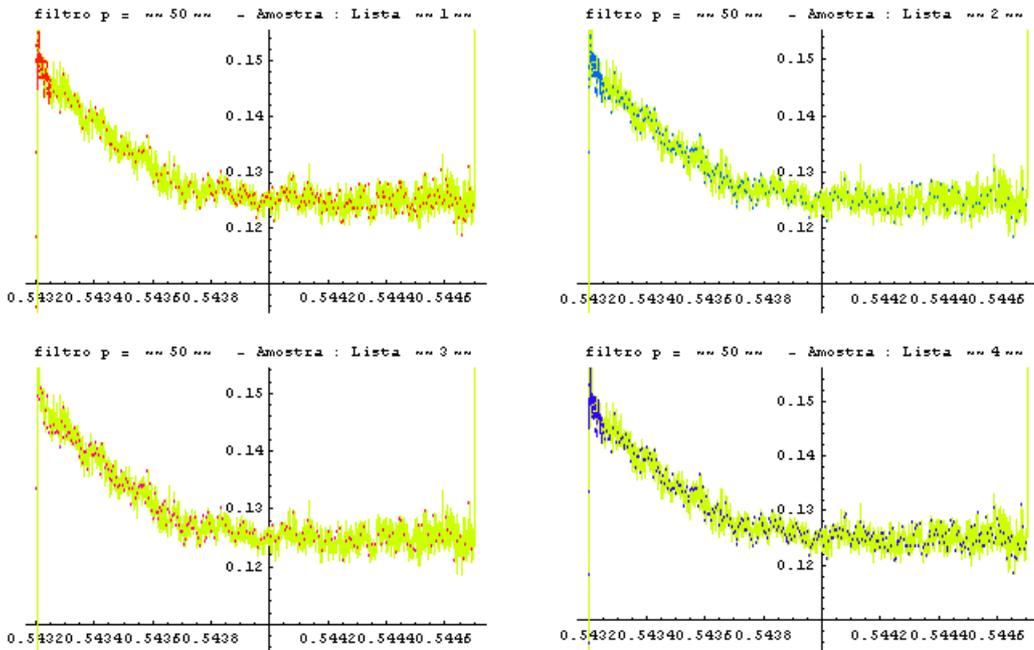


Figura 5.2.2.(19) – Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 50$.

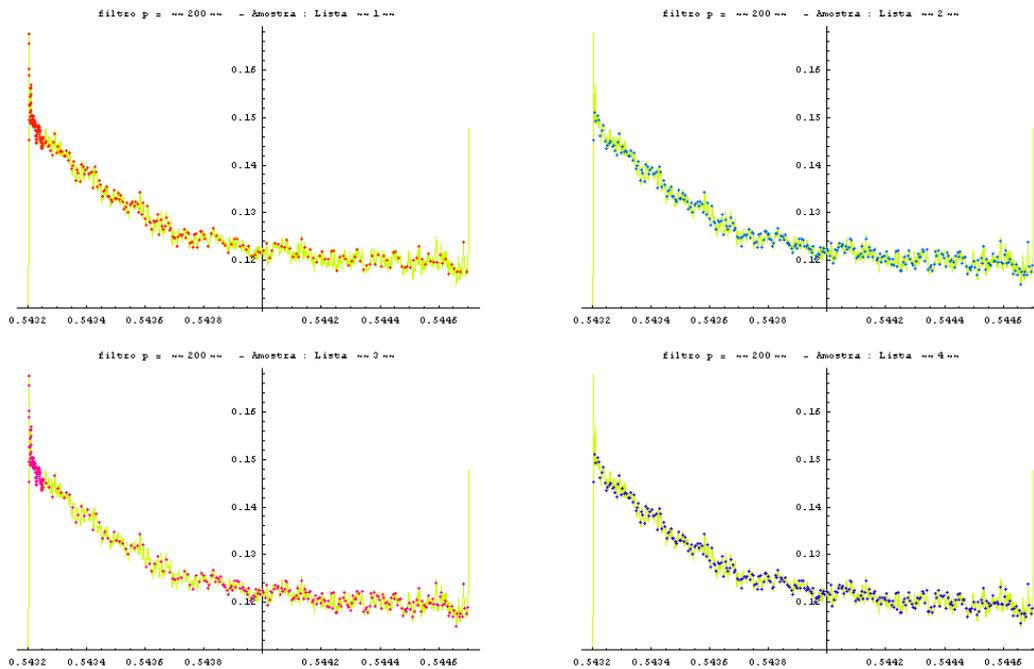


Figura 5.2.2.(20) – Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 200$.

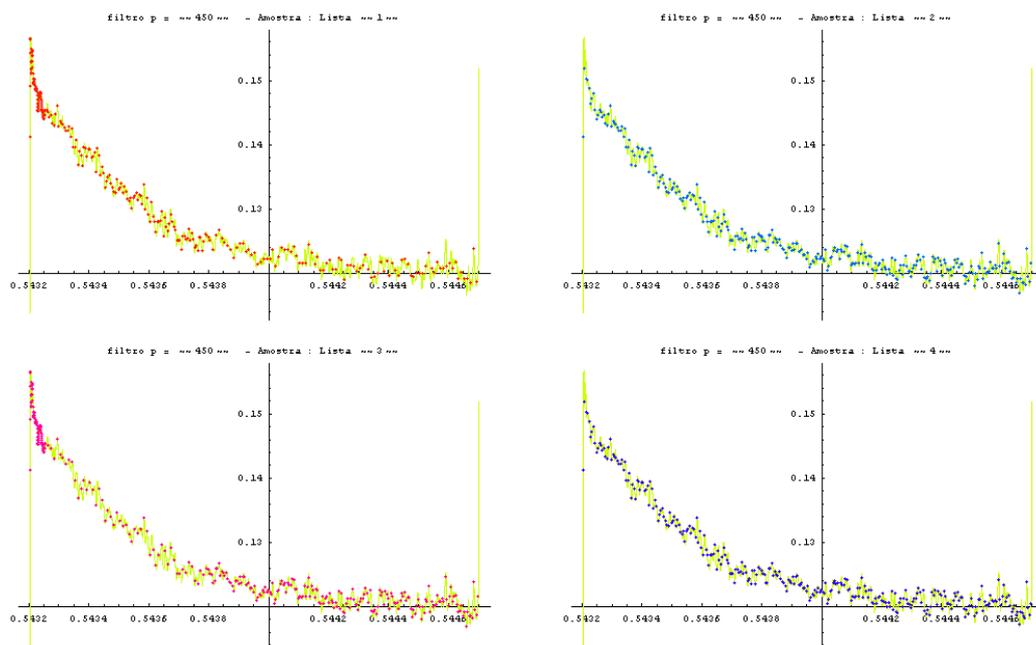


Figura 5.2.2.(21) – Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 450$.

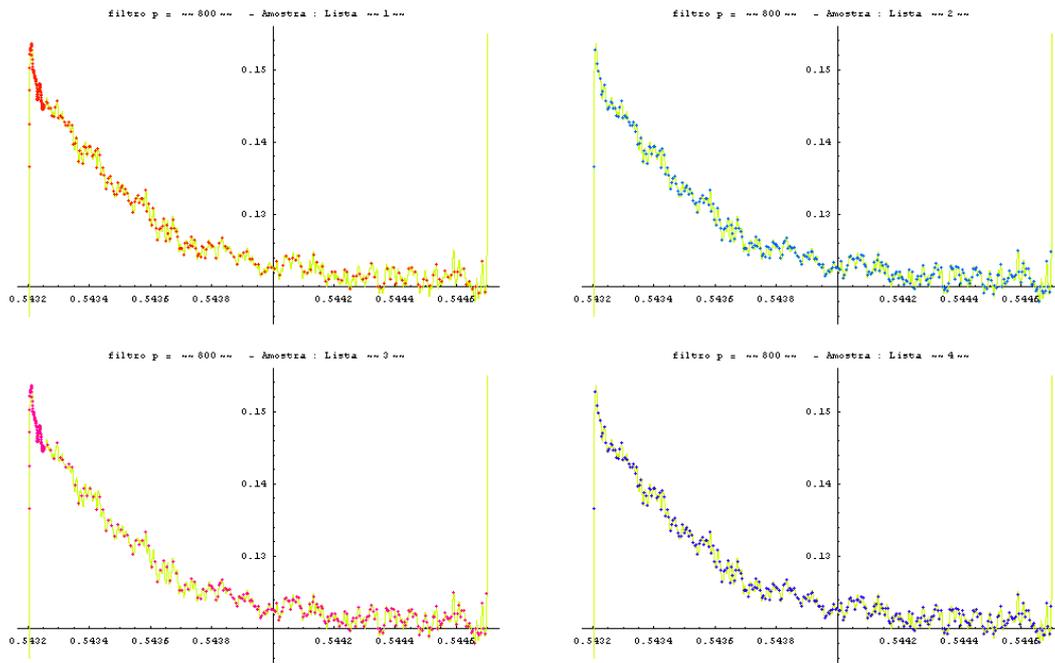


Figura 5.2.2.(22) – Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 800$.

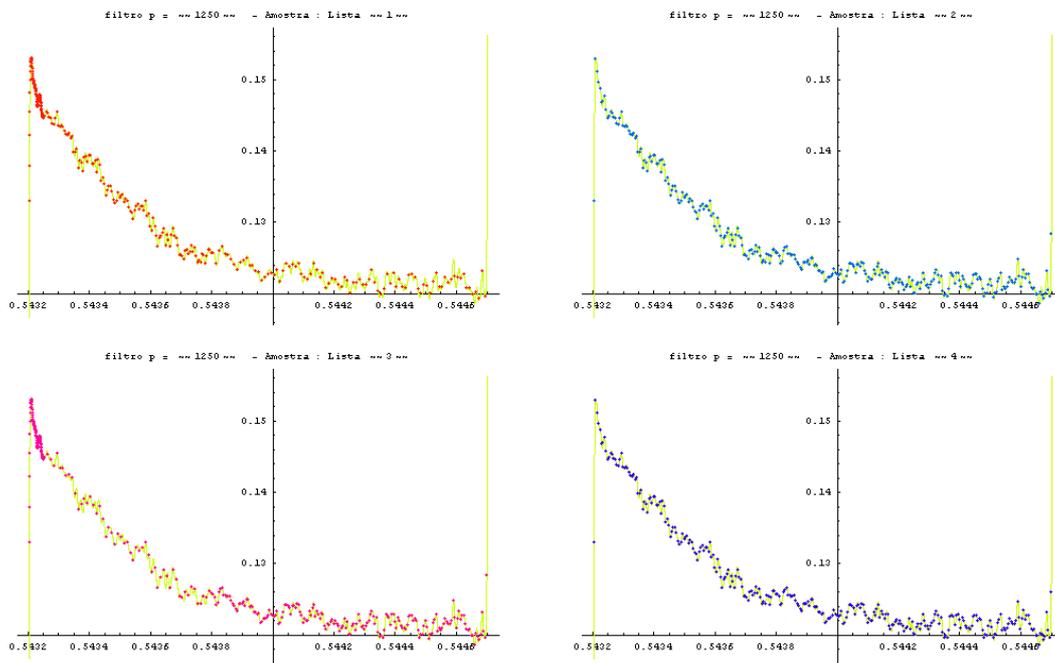


Figura 5.2.2.(23) – Ilustração das diferentes distribuições de amostragem que compõem as quatro listas consideradas nos cálculos dos parâmetros de $gcor_u(t)$, com filtro $p = 1250$.

Foram processados diversos cálculos para análise da variação desses parâmetros, a partir dos quais se observou que :

- os valores de B e D variavam de acordo com as constantes de tempo consideradas em seus cálculos;
- para $\theta_1 < \theta_3$, θ_1 pouco influencia as relações analisadas;
- poder-se-ia considerar um valor médio para B/D para $\theta_2 > 36 \mu s$. Para valores inferiores relações do tipo apresentado abaixo, em (5.12) são mais indicadas, uma vez que,
- a soma das parcelas exponenciais de B e D, embora também apresente variação, varia numa gama mais restrita de valores.

Sendo assim, verificou-se que uma relação consistente entre parcelas do tipo $B \times \theta_2 + D \times \theta_4 = k_{BD}$, onde $k_{BD} = \text{constante}$, podia ser determinada. Observou-se que a escolha de um k_{BD} fixo a partir de seu valor médio, apresenta erros pequenos, entre 0,9 % e 10 % para toda a gama de valores calculados.

Dessa forma, estabeleceu-se um valor para k_{BD} a partir de um valor médio dessa grandeza. No Anexo 8 são apresentadas figuras que ilustram o comportamento da soma das parcelas exponenciais que acompanham os coeficientes “B” e “D”, relacionados às maiores constantes de tempo para o arco e o impulso, respectivamente. Também são apresentados alguns resultados dos cálculos processados.

Sendo assim, considerando que θ_4 é dado e θ_2 tem valores estimados, parece razoável estabelecer, por exemplo, “B” em função de D :

$$B = (k_{BD} - D \times \theta_4) / \theta_2 \quad (5.12),$$

ou ainda, definir um valor de B “médio” a partir de um valor de D “médio”, já que D, associado a maior constante de tempo, foi o coeficiente que apresentou menor variação relativa.

Considerando que θ_1 e θ_2 são valores inicialmente estimados a partir dos gráficos das medições, e, que tendo determinado um valor para D pode-se, para cada θ_2 estimado, calcular o B correspondente a partir da relação (5.12), resta seguir para os cálculos dos coeficientes A e C. Por estarem associados às menores constantes de

tempo, para a determinação de A e C foram escolhidos outros conjuntos de pontos, mais restritos à fase inicial do impulso.

Os resultados desses cálculos também se encontram no Anexo 8. Da comparação entre as diferentes composições de constantes de tempo e coeficientes (A, B, C e D) para (5.11) é possível se estimar, dentre a gama de soluções possíveis, aquelas que mais se aproximam do que seria provavelmente “correto”. As funções considerando $\theta_1 = 2,8 \mu\text{s}$, para qualquer θ_2 , e, da mesma forma $\theta_2 = 10 \mu\text{s}$, para qualquer θ_1 aparentam ser as mais próximas de $gcor_u(t)$ (Figs 5.2.2.(24) e 5.2.2.(25)).

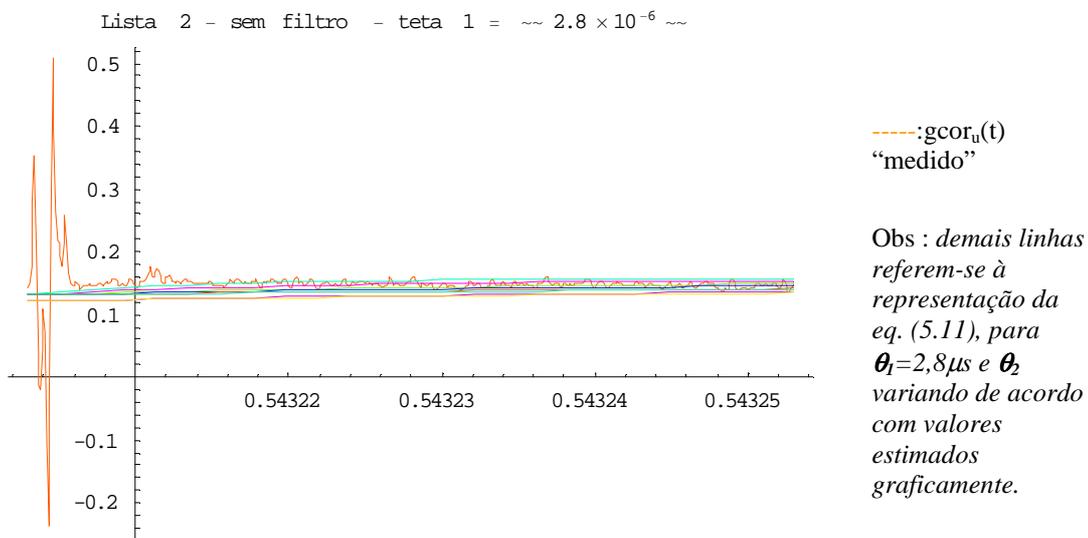


Figura 5.2.2.(24) – Comparação entre $gcor_u(t)$ calculado por aproximação da eq. (5.11) e “medido” ($\theta_1 = 2,8 \mu\text{s}$ e θ_2 variável)

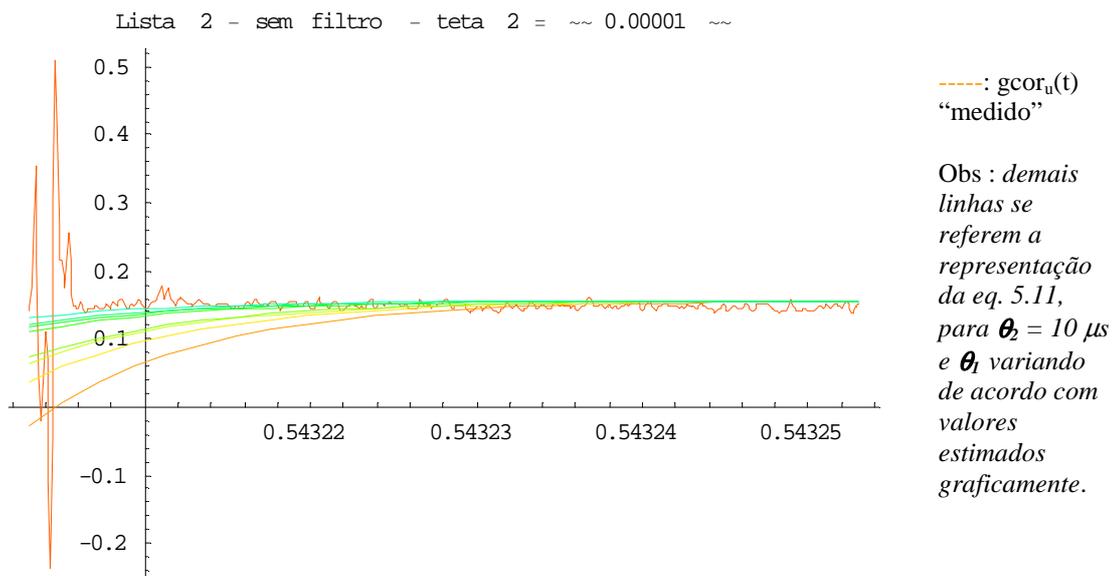


Figura 5.2.2.(25) – Comparação entre $gcor_u(t)$ calculado por aproximação da eq. 5.11 e “medido” ($\theta_1 =$ variável e $\theta_2 = 10 \mu\text{s}$)

Ressalta-se que o cálculo acima tem por objetivo principal a estimativa dos coeficientes A, B, C e D e não das constantes de tempo, uma vez que estas últimas fazem parte dos parâmetros do arco a serem determinados de acordo com o modelo analisado. Como exemplo, podemos citar o seguinte conjunto de parâmetros calculado para a equação (5.11):

para $\theta_3 = 4,9 \mu s$, $\theta_4 = 1234,75 \mu s$, considerando $\theta_1 = 2,8 \mu s$ e $\theta_2 = 10 \mu s$, com $A = 0,543234$; $B = 0,112549347$; $C = 0,146623$ e $D = 0,0211465707$ calculados, e tendo como instante de referência para o ensaio 971, $t_0 = 0,5432 s$, tem-se $g_u(t_0) = 0,142315 S$ e assim tem-se a equação abaixo, por exemplo, para o cálculo da condutância a ser comparada com o valor medido :

$$g_{cor_u}(t) = 0,142315 + 0,54323e^{-t/2,8 \cdot 10^{-6}} + 0,11255e^{-t/10 \cdot 10^{-6}} + 0,14662e^{-t/4,9 \cdot 10^{-6}} + 0,02114e^{-t/\theta_4}$$

Outra hipótese de cálculo dos coeficientes A, B, C e D é a de se estabelecer relações entre os referidos coeficientes, agrupando as parcelas não mais pela ordem de grandeza das constantes de tempo, mas sim por afinidade de origem da grandeza associada. Assim, os parâmetros do arco devem estar relacionados entre si, assim como os parâmetros relacionados ao impulso. Logo, os cálculos devem determinar relações do tipo : $A \cdot \theta_1 + B \cdot \theta_2 = kk$, e, $C \cdot \theta_3 + D \cdot \theta_4 = kj$, onde kk e kj são constantes.

A partir dos resultados parciais da pesquisa, estima-se que deve se considerar uma constante de tempo da ordem de grandeza de $10^0 \mu s$ e outra de $10^1 \mu s$ para uma satisfatória representação do comportamento dinâmico do arco. Considerando as informações em [3] onde indicou-se, a partir de resultados de ensaios para arcos no ar, uma estimativa razoável da ordem de grandeza das seguintes constantes : $\alpha \sim 0,1$, $\beta \sim 0,2$, $\xi \sim 0,4$, $J_r \sim 0,05$, e substituindo em (5.8) e (5.9), tem-se como modelagem do comportamento dinâmico do arco algo do tipo :

$$\frac{1}{g_1(t)} \frac{d(g_1(t))}{dt} = \frac{1}{2,8 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{p_1}{0,4 P_0} + 0,125 \left(\frac{0,667 * g_2}{g_1} - 1 \right) - 1 \right) \quad (5.13),$$

$$\frac{1}{g_2(t)} \frac{d(g_2(t))}{dt} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-6}} \left(\frac{p_2}{0,6 P_0} + 0,0833 \left(\frac{g_2}{0,667 * g_1} - 1 \right) - 1 \right) \quad (5.14),$$

onde $p_1 = u_1 \cdot i_1$, $p_2 = u_2 \cdot i_2$, $r_1 = 1 / g_1 = u_1 / i_1$, $r_2 = 1 / g_2 = u_2 / i_2$ e para arcos em paralelo, $u = u_1 = u_2$, $i = i_1 + i_2$, $g = g_1 + g_2$, $r = 1 / g$, $p_1 = (r_1 / r_1 + r_2) \cdot p$, $p_2 = (r_2 / r_1 + r_2) \cdot p$.

CAPÍTULO 6

Conclusões

De acordo com as informações contidas em grande parte da literatura disponível sobre o assunto, parece razoável se estabelecer uma modelagem de arco que valorize os principais aspectos relacionados ao equilíbrio de energia (Elenbaas-Heller), considerando, desta forma, o fornecimento de potência elétrica ao arco e os mecanismos de troca de calor (condução, convecção e radiação), representados através de variáveis que traduzem o estado físico médio da coluna central do arco. Assim, a partir de características estacionárias do ar, é possível se estabelecer seu comportamento dinâmico, representado basicamente pelas constantes de tempo presentes nas equações que caracterizam o comportamento do arco, do tipo *Mayr*, *Cassie*, *Thiel*, etc. Observa-se que consoante os fenômenos envolvidos, os modelos mais conhecidos e tradicionalmente adotados ao se situarem apenas no domínio de uma constante de tempo, restringem a sua utilização para condições específicas. Dessa forma, o modelo com duas constantes de tempo proposto em [3] parece sintetizar de forma satisfatória as principais grandezas que caracterizam o comportamento do arco e sua interação com a rede.

A utilização de metodologias que envolvam cálculos no domínio da frequência, no domínio do tempo, e até procedimentos híbridos frequência-tempo, devem ser fundamentadas numa modelagem criteriosa do arco, de acordo com o domínio e o estágio em que os estudos estão sendo desenvolvidos [2]. Para estudos paramétricos, para efeito de comparação de alternativas num contexto em que o arco secundário se integra a outros condicionamentos de projeto, não se faz necessária uma modelagem detalhada do arco. No entanto, em estágios posteriores dos estudos de manobra de linha, em que se verifica as condições transitórias para a efetiva implementação do arco secundário, o modelo com duas constantes de tempo parece ser o mais indicado para se analisar satisfatoriamente a extinção do arco secundário.

A variação do comprimento do arco, fenômeno relativamente lento e passível de visualização, tem seu comportamento intrinsecamente relacionado ao processo de extinção do arco, uma vez que reflete a influência de diversos fatores ambientais macroscópicos como vento, umidade do ar, pressão e etc, nos processos de ionização e recombinação das moléculas do plasma que compõe o arco, sendo por isso uma forma,

ainda que indireta e aproximada, de se registrar tais influências na dinâmica do comportamento do arco.

A representação do arco em termos incrementais é particularmente útil quando associada ao emprego de técnicas de transformação de Fourier, Laplace e similares, seja para análise de estabilidade, utilizando métodos como o de Nyquist, Bode, Routh-Hurwitz, seja para análise no domínio da frequência do comportamento transitório (domínio híbrido frequência-tempo).

Estudos mais precisos também devem considerar a representação da linha no domínio da frequência. A diversidade e complexidade dos fenômenos envolvidos sugere que o arco seja representado ao menos com duas constantes de tempo, sendo a menor delas da ordem de 10^{-6} segundos, o que justifica ter a linha representada para frequências até a ordem de 10^6 Hz, ou seja, MHz .

A metodologia de estudo e os critérios sugeridos pela ANEEL ilustram as limitações decorrentes da ausência de informações mais precisas para representação do arco secundário, cuja extinção dentro do tempo morto pré-estabelecido é a questão norteadora dos estudos para implementação do religamento monofásico.

O emprego de critérios e metodologias muito generalizadas distanciam o projeto de soluções otimizadas, ou ainda, pode conduzir a soluções equivocadas.

Uma estratégia proposta para otimização do projeto de uma linha de transmissão é a inclusão da observação das condições para o religamento monofásico ainda na etapa da determinação dos feixes e/ou da compensação em derivação. Dessa forma, pode-se evitar, inclusive, a partir de pequenas alterações nas características construtivas da LT, a eventual aquisição de dispositivos adicionais para promoção da extinção do arco secundário.

De um modo geral, para as chamadas Linhas Não-Convencionais as soluções se assemelham bastante às utilizadas nas Linhas Convencionais, exceção feita para Transmissão em Meia-Onda⁺, onde são necessárias soluções de engenharia para que se promova a extinção do arco secundário. Embora os transitórios de manobra de linha se assemelhem aos de linhas curtas, dispensando inclusive o uso de compensação reativa, na abertura monofásica observam-se valores elevados de corrente de arco secundário.

Sendo assim, medidas que apenas aumentem a impedância de sequência zero não têm a mesma eficiência que soluções que provoquem a instabilidade do arco secundário. A solução aqui não é a mitigação do valor do arco, mas provocar sua instabilidade. A eletrônica de potência se apresenta como uma ferramenta interessante

para a definição de tal solução, como por exemplo, através da injeção de corrente na fase defeituosa (*corrente compensatória*), tal que se prolongue o tempo com valor de baixa corrente de condução elétrica (passagem pelo zero alongada).

O modelo desenvolvido para caracterizar o comportamento dinâmico do arco secundário considera dois sub-arcos do tipo Thiel, conforme Fig. 6.(1). Segundo esse modelo, o arco pode ter seu comportamento representado pelas formulação a seguir:

$$-\frac{d(\text{Log } r_1)}{dt} = \frac{d(\text{Log } g_1)}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \left(\frac{p_1 + J \text{Log} \left(\frac{g_2 \varepsilon}{g_1} \right)}{\xi P_0} - 1 \right) \quad (6.1)$$

$$-\frac{d(\text{Log } r_2)}{dt} = \frac{d(\text{Log } g_2)}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \left(\frac{p_2 - J \text{Log} \left(\frac{g_2 \varepsilon}{g_1} \right)}{\eta P_0} - 1 \right) \quad (6.2)$$

onde

$$\eta = 1 - \xi, \quad \varepsilon = \xi / \eta, \quad p_1 = u_1 \cdot i_1, \quad \theta_1 = A_1 \cdot g^\alpha, \quad \theta_2 = A_2 \cdot g^\alpha, \quad p = p_1 + p_2$$

$$P_0 = B \cdot g^\beta, \quad Jr = J / P_0 = \text{constante}, \quad p_2 = u_2 \cdot i_2, \quad r_1 = 1 / g_1 = u_1 / i_1,$$

$$r_2 = 1 / g_2 = u_2 / i_2$$

para arcos em série,

$$u = u_1 + u_2, \quad i = i_1 = i_2, \quad r = 1 / g = r_1 + r_2, \quad p_1 = (g_1 / g_1 + g_2) \cdot p, \quad p_2 = (g_2 / g_1 + g_2) \cdot p$$

e para arcos em paralelo,

$$u = u_1 = u_2, \quad i = i_1 + i_2, \quad g = g_1 + g_2, \quad r = 1 / g, \quad p_1 = (r_1 / r_1 + r_2) \cdot p, \quad p_2 = (r_2 / r_1 + r_2) \cdot p$$

Os parâmetros B e β ($P_0 = B \cdot g^\beta$) são calculados a partir da característica estática do arco. No **Anexo 5** é apresentada a curva de característica estacionária para arcos no ar utilizada, conforme [5]. Esta curva relaciona campo elétrico e corrente de arco, portanto, para se contabilizar o valor de **u** deve ser considerado o comprimento do arco.

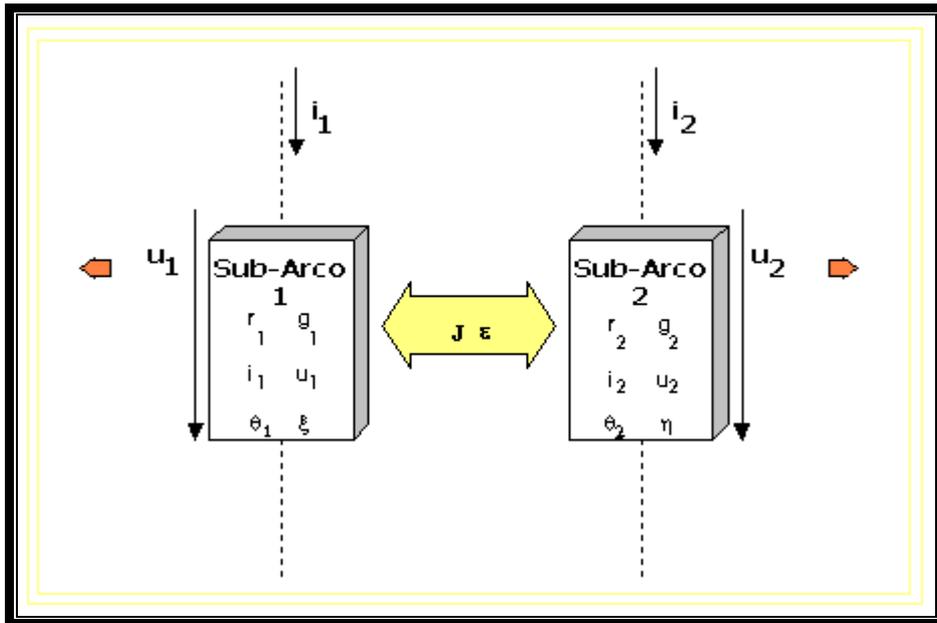


Figura 6.(1) – Representação esquemática do modelo de arco elétrico considerado

Em [3] indicou-se, a partir de resultados de ensaios para arcos no ar, valores aproximados, que fornecem uma estimativa razoável da ordem de grandeza das seguintes constantes : $\alpha \sim 0,1$, $\beta \sim 0,2$, $\xi \sim 0,4$, $J_r \sim 0,05$.

A partir dos resultados da presente pesquisa, estima-se que deve se considerar uma constante de tempo da ordem de grandeza de $10^0 \mu s$ e outra de $10^1 \mu s$ para uma satisfatória representação do comportamento dinâmico do arco.

Como trabalhos futuros, há a expectativa de se conseguir valores mais acurados para os parâmetros do arco, principalmente para as constantes de tempo, verificando uma eventual associação de tais valores com níveis de tensão inclusive. O alongamento do arco, assim como o efeito do vento, podem ainda ser estudados mais detalhadamente a partir das medições feitas com equipamentos mais precisos recém-instalados, como câmera de alta velocidade e medidor de vento ultrassônico tridimensional. O modelo pode ainda ter sua utilização facilitada pela indicação dos parâmetros e simplificações condizentes com o valor da corrente de arco esperada, ou ainda, sua representação modelada em programas de uso comum da engenharia elétrica, como ATP, EMTP, dentre outros. A importância da interação arco-rede pode ainda ser explorada através de ensaios laboratoriais específicos.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] PORTELA, C. , DUPONT, C., MEIRELES, M. P. , *Deterministic and Statistic Arc Modelling*. CIGRÉ 13-107, 1994 SESSION, Paris, 28 Agosto a 3 Setembro, 1994.
- [2] CÂMARA, ALESSANDRA S. B., *Extinção de Arco Secundário com Manobras Monofásicas. Conceitos Fundamentais e Critérios de Análise.*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- [3] PORTELA, C., *Alguns Métodos de Análise de Comportamento de Arcos no Ar. Exemplos de Aplicação*. VIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE) - Grupo IV – Sistemas de Potência (GSP), São Paulo, 1986.
- [4] PORTELA, C. , TAVARES, M. C., *Proposing a New Methodology to Optimize the Transient Study of a Transmission System*. International Conference on Power Systems Transients (IPST), Rio de Janeiro, 2001.
- [5] JOHNS, A. T., et al., *Performance of distance protection of e.h.v. feeders utilising shunt –reactor arrangements for arc suppression and voltage control*. IEE Proc., Vol. 127, Pt. C, No. 5, Setembro, 1980.
- [6] HAUBRICH, H. J., et al., *Single-phase auto-reclosing in EHV systems* . Rep.31-09, CIGRÉ-SESSION 1974, Paris, 1974.
- [7] HASIBAR, R. M., LEGATE, A. C., BRUNKE, J., PETERSON, W. G., *The Application of high-speed grounding switches for single-pole reclosing on 500kV power systems* . IEEE Transact. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, Abril, 1981.
- [8] AKAGI, H. ; WATANABE, E. H. ; AREDES, M. . *Instantaneous Power Theory and Applications to Power conditioning*. 1o. ed. Nova Iorque: IEEE Press / Wiley Interscience, 2007.
- [9] PORTELA, CARLOS M., *Modelagem de arco elétrico em disjuntores. Aplicações de modelos em estudos de manobra*. Apostila COPPE/UFRJ, 1996.

- [10] PORTELA, C. - *Sobretensões e Coordenação de Isolamento, Vol. I, II e III* - primeira edição, 1977, Vol. I, 247 p. , Vol. II, 344 p. - segunda edição, 1982, Vol. I, 354 p., Vol. II, 302 p. , Vol. III, 142p. - edição da EEM (Escola de Engenharia Mauá), do IMT (Instituto Mauá de Tecnologia), São Paulo, 1977 / 1982
- [11] PORTELA, C. - *Sistemas de Potência, Vols. I, II e III* - primeira edição, 1977, segunda edição, 1980, terceira edição, 1982 - terceira edição : Vol. I, 202 p., Vol. II, 245 p. , Vol. III, 322 p. - edição da EEM (Escola de Engenharia Mauá), do IMT (Instituto Mauá de Tecnologia), São Paulo, 1977 / 1980 / 1982
- [12] PORTELA, C. - *Sobretensões e Coordenação de Isolamento, Vols. I, II e III* - Vol. I, 349 p. , Vol. II, 304 p. , Vol. III, 140 p. - edição da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1982
- [13] PORTELA, C. - *Regimes Transitórios, Vol. I a IV* - Vol. I, 357 p. , Vol. II, 365 p. , Vol. III, 318 p. , Vol. IV, 280 p. - edição da COPPE/UFRJ e ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, 1983
- [14] PORTELA, C. , TAVARES, M. C., *Modelling, simulation and optimization of transmission lines. Applicability and limitations of some used procedures.* - Transmission and Distribution 2002, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - PES Society, 38 p. , Invited speech , Available: <http://www.ieee/pesTD2002>, São Paulo, Março de 2002
- [15] PORTELA, C. M. , *Análise de Redes Eléctricas. Algumas Aplicações.* Lisboa, 1970.
- [16] Edital do Leilão nº 001/2004- ANEEL/ Anexo 7-7k,
http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_transmissao/documentos/ANEXO%207K%20CamposNovos_Blumenau_FINAL.pdf
- [17] OLIVEIRA, O.; RODRIGUES, M. – MODELARCO- Modelagem de Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico - PARTE EXPERIMENTAL - Apresentação para Diretoria do CEPTEL, Rio de Janeiro, 27/Dez/2007.

- [18] Material disponível em : [http://www.pee.ufrj.br/labs/corona/portela/Informacoes_adicionais PeD2009arco/Informacoes adicionais PeD2009arco.htm](http://www.pee.ufrj.br/labs/corona/portela/Informacoes_adicionais_PeD2009arco/Informacoes_adicionais_PeD2009arco.htm)
- [19] DIAS, R. F. S et al, *Non Conventional Transmission Line with FACTS in Electromagnetic Transient Programs*, IPST 2009, Kyoto, 2009
- [20] PORTELA, C. M. , *Some Aspects of Very Long Lines Switching*, CIGRE SC 13 Colloquium , 1995, 12p , Florianópolis, 1995
- [21] PORTELA, C.; AREDES M.– *Very Long Distance Transmission – Proceedings 2003 International Conference on AC Power Delivery at Long and Very Long Distances*, 8 p., Novosibirsk, Setembro de 2003.
- [22] LACORTE, M., *Análise e Modelagem de Interrupção de Corrente por Disjuntores de Alta Tensão.* , Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1998.
- [23] CASSIE, A. M, *A New Theory of Rupture and Circuit Severity*, Rp. 102 - CIGRÈ SESSION 1939, Paris, 1939.
- [24] MAYR, O., *Beytrage zur Theorie dès statischemd denamschen lichtobogens*, *Archiv fier Electrotechnik*, we 37 (1943) pg. 589-609
- [25] ESZTERGALYOS, J. , *The Application of High-Speed Grounding Switches on EHV-UHV Power Systems to Enchnce Single-Pole Reclosing Control and Protection*, Western Protective Relay Conference, Washington, USA, 1981.
- [26] MONTANARI A. A., *Religamento monopolar adaptativo rápido baseado na assinatura harmônica da tensão de arco secundário*, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 2009
- [27] EDITAL DO LEILÃO NO 007/2008-ANEEL - **Vol III**,
http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2008/047/documento/edital_007_2008-madeira_09jul2008.pdf

- [28] CARVALHO, A. , et al., *Disjuntores e chaves: aplicação em sistemas de potência*. EDUFF, 365 p.. Niterói/RJ, 1995.
- [29] CAMARA, A. ; PORTELA, C. ; TAVARES, M. C. . *Single-Phase Auto-Reclosure Studies: Some Basic Aspects on Main Elements Representation*. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), IEEE, Chongqing, China, 2008.
- [30] CAMARA, A. ; PORTELA, C. ; TAVARES, M. C. . *Single-phase autoreclosure studies considering a robust and reliable secondary arc model based on a gray-box model*. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), IEEE, Chongqing, China, 2008.
- [31] CAMARA, A. ; GONÇALVES, R. ; RODRIGUES, M. ; OLIVEIRA, O. ; PORTELA, C. ; TAVARES, M. C. *Single-phase autoreclosure studies: secondary arc model research including a 500kV line experimental circuit*. International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), IEEE, Chongqing, China, 2008.
- [32] PORTELA, C. ; CAMARA, A. ; GONÇALVES, R. ; RODRIGUES, M. ; OLIVEIRA, O. ; TAVARES, M. C. *Estudos De Religamento Monofásico - Pesquisa E Desenvolvimento De Modelo Do Arco Secundário*. XX SNPTEE Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica, Recife, PE, 2009.
- [33] MONTANARI, A. ; TAVARES, M. C. ; PORTELA, C. ; CAMARA, A. . *Secondary Arc Harmonic Content for Various Current Levels Based on Field Tests*. IPST '09, Kyoto, Japão, 2009.
- [34] TAVARES, M.C. ; TALAYISIS, J. ; PORTELA, C. ; CAMARA, A. *Conteúdo Harmônico Da Corrente E Tensão De Arcos Elétricos Gerados Artificialmente Em Ambiente Não Confinado*. XVII Congresso Brasileiro de Automática (XVII CBA), Ribeirão Preto, SP, 2010.
- [35] ZEVALLOS, M. ; TAVARES, M. C. . *Redução das correntes de arco secundário em sistemas de transmissão típicos*. Controle & Automação (Impresso), p. 373-382, 2009.

- [36] MONTANARI, A. ; TAVARES, M. C. ; PORTELA, C. . *Adaptative Single-Phase Autoreclosing Based on Harmonic Signature of the Secondary Arc Voltage*. International - IPST , Kyoto, Japão, 2009.
- [37] MONTANARI, A. ; TAVARES, M.C. ; PORTELA, C. . *Religamento Monopolar Adaptativo Baseado Na Assinatura Harmônica Da Tensão De Arco Secundário*. - XX SNPTEE, Recife, PE, 2009.
- [38] AZEVEDO, M. ; PORTELA, C. ; TAVARES, M.C. ; ALVIM, M. . *Alternativas Em CA Para Troncos De Transmissão A Muito Longa Distância Avaliação Do Comportamento Para Transitórios Eletromagnéticos*. XX SNPTEE, Recife, PE, 2009.
- [39] TAVARES, M. C. ; PORTELA, C. M. *Proposition of a Half-Wave Length Energization Case Test*. IPST , Kyoto, Japão, 2009.
- [40] PORTELA, C. ; TAVARES, M.. ; ALVIM, M. G. ; AZEVEDO, M. *Nova Concepção De Linhas De Transmissão A Longa Distância Em Corrente Alternada E Extra Alta Tensão*. XX SNPTEE, Recife, PE, 2009.
- [41] TAVARES, M. C. ; PORTELA, C. . *Half-Wave Length Line Energization Case Test Proposition of a Real Test*. - ICHVE 2008 (IEEE), Chongqing, China, 2008.
- [42] TAVARES, M. C. ; PORTELA, C. . *Transmission System Parameters Optimization - Analyzing Secondary Arc Current and Recovery Voltage*. IPST'03, 2003, New Orleans, E.U.A., 2003..
- [43] J. M. MIGUEL, *Condicionador de Tensão Aplicado a Sistema com Perda de Fase*, Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 2005.
- [44] COPPETEC, Relatório *DT201, PROCESSAMENTO SISTEMÁTICO DE RESULTADOS DE MEDIDA PARA ESTIMAR O COMPRIMENTO DO ARCO EM FUNÇÃO DO TEMPO - COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DE FILMAGEM* - P&D Modelagem do Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico , Março de 2006, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.

ANEXOS

ANEXO 1

*Exemplo do Capítulo 3 :
Parâmetros Unitários em função da frequência da linha de transmissão LNC1 e
demais cálculos e gráficos associados*

Linha LNC 1 - Parâmetros unitários em função da frequência, na hipótese de transposição ideal, LT de 525 kV

Parâmetros da linha a 60 Hz (se idealmente transposta)

$$c_d = i 18,6685 \text{ nF/km}$$

$$c_h = i 9,39809 \text{ nF/km}$$

$$y_d = i 7,073784 \text{ } \mu\text{S/km a 60 Hz}$$

$$y_h = i 3,543 \text{ } \mu\text{S/km a 60 Hz}$$

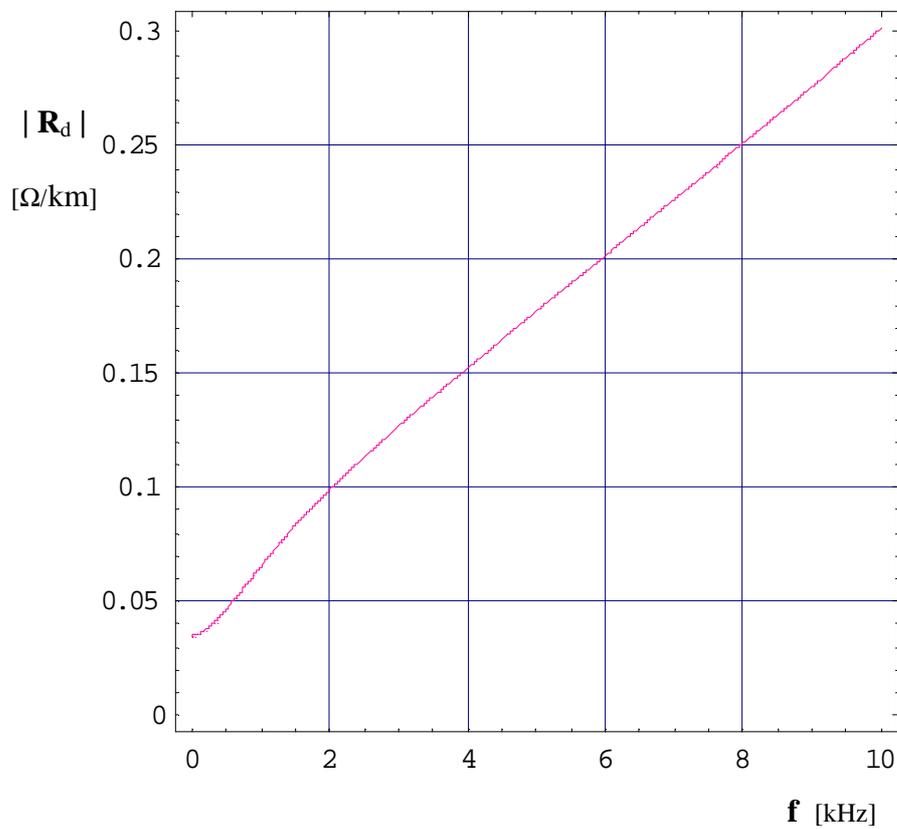
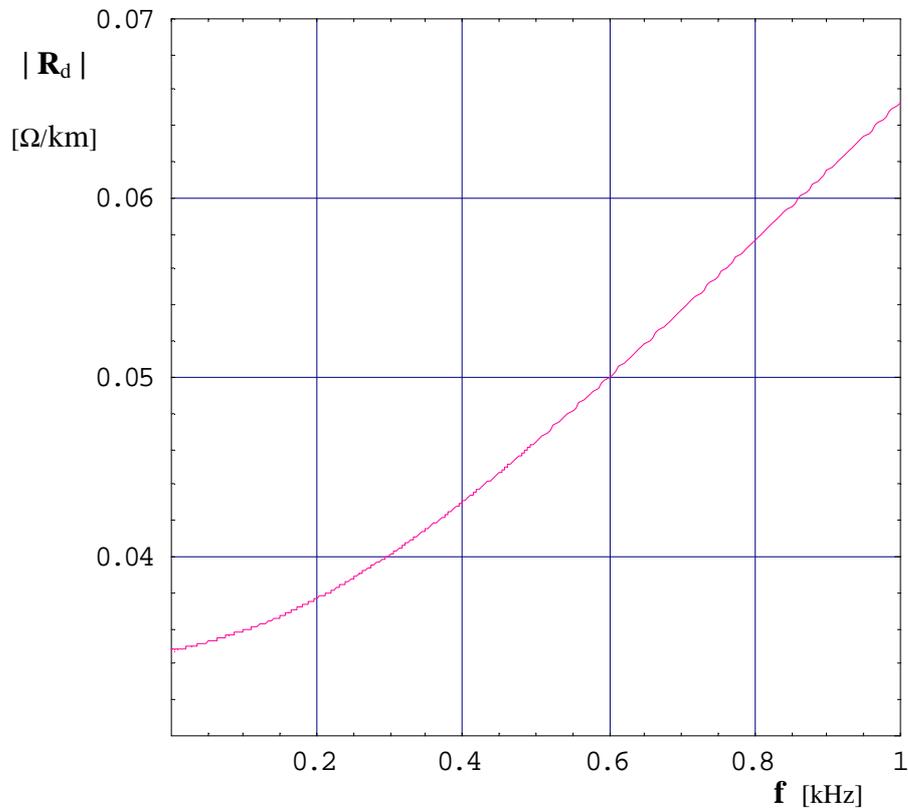
$$z_d = 0,0353634 + i 0,234599 \text{ } \Omega/\text{km a 60 Hz}$$

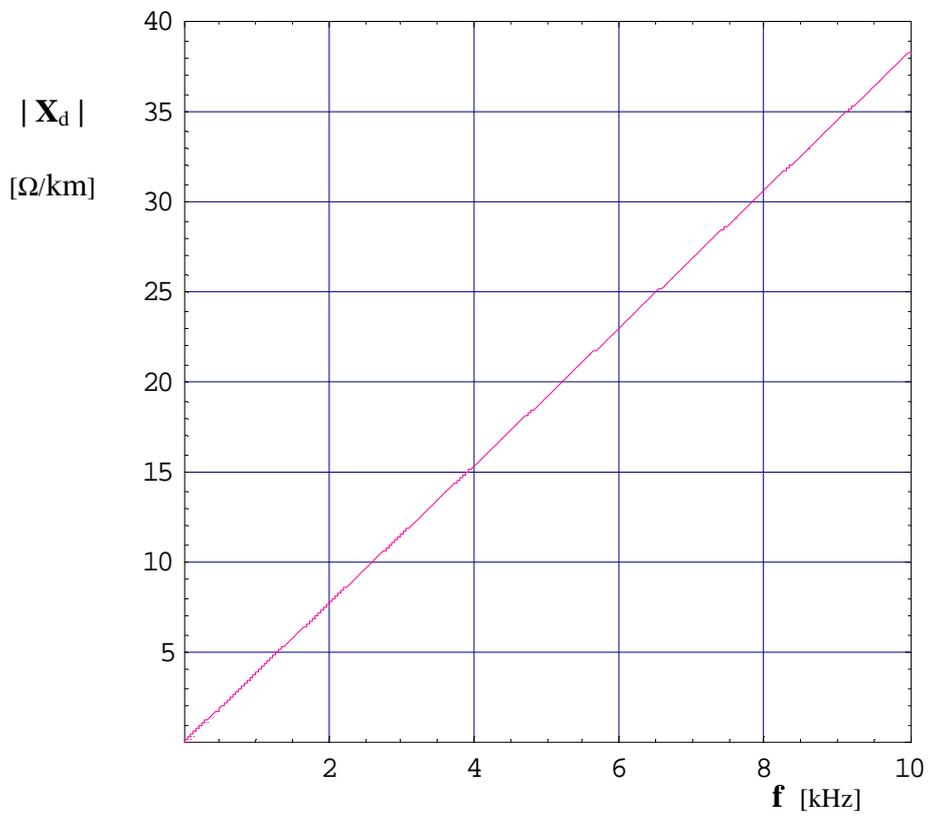
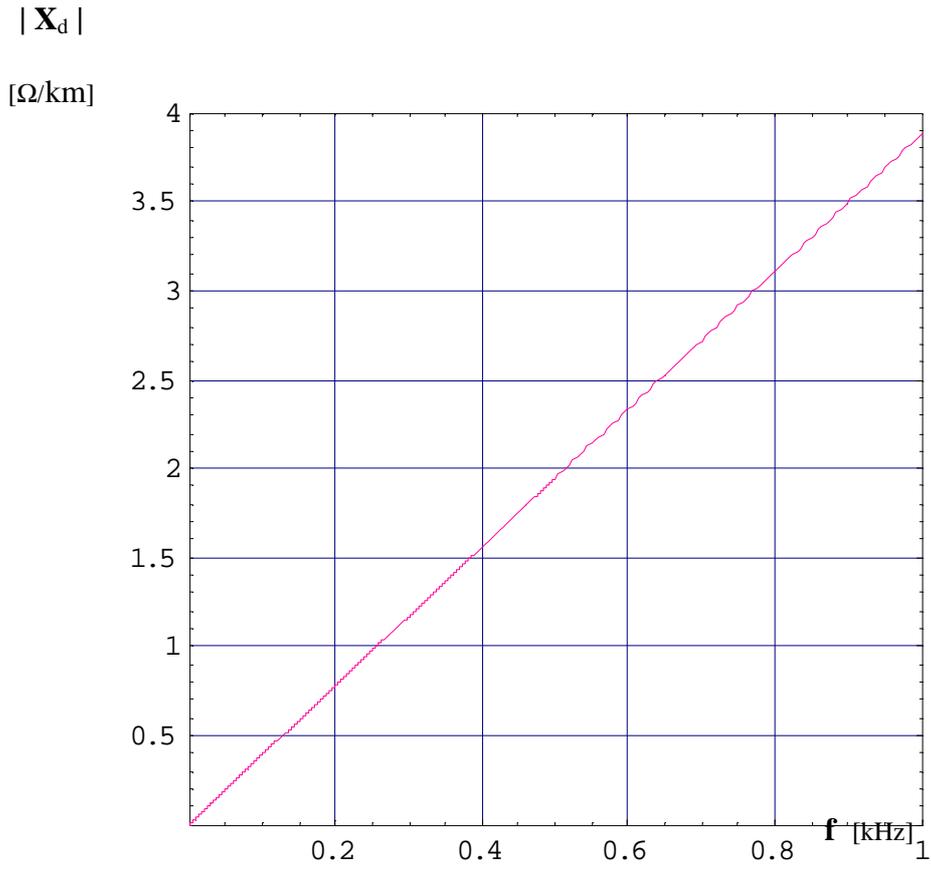
$$z_h = 0,346714 + i 1,31064 \text{ } \Omega/\text{km a 60 Hz}$$

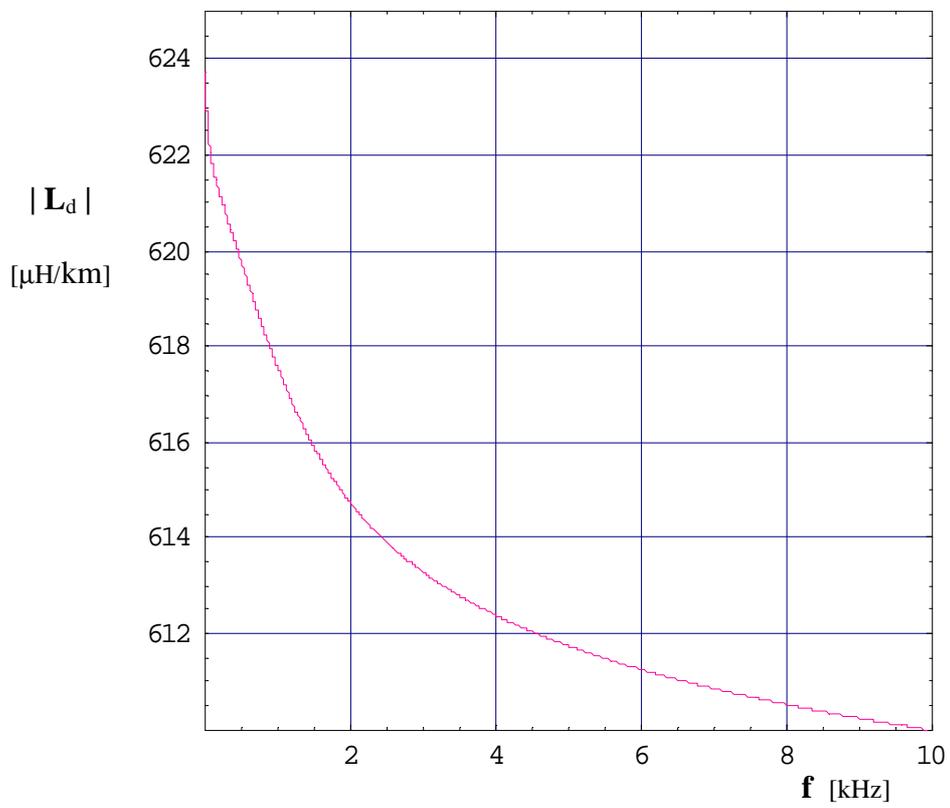
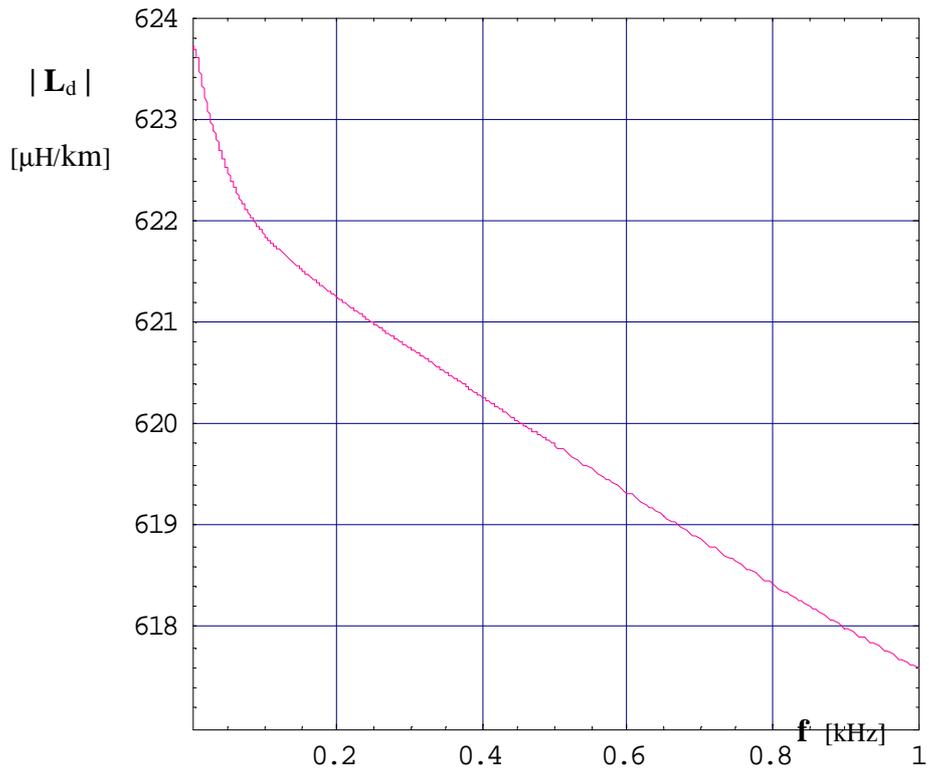
$$z_c = 183,091 - i 13,722 \text{ } \Omega \text{ a 60 Hz}$$

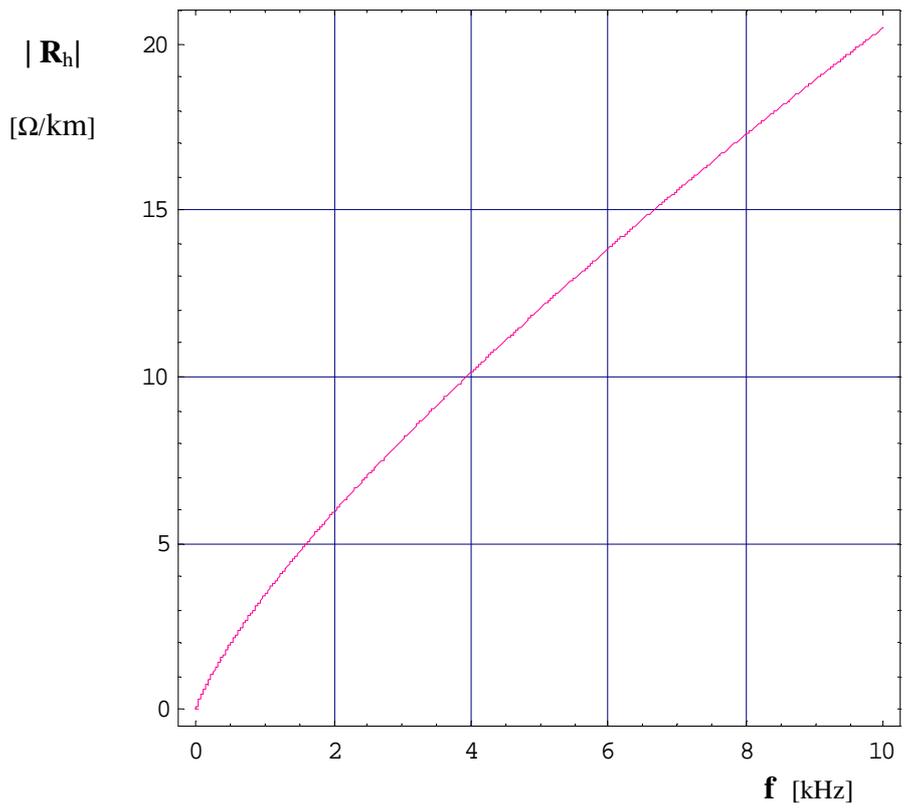
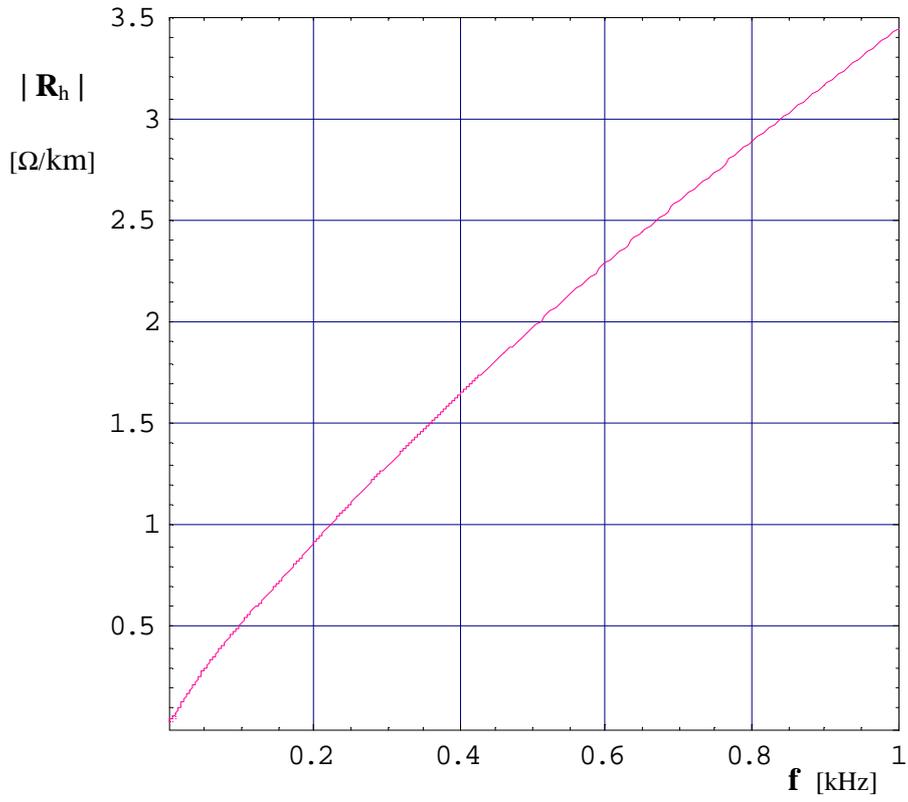
$$S_c = 1496,99 + i 112,94 \text{ MVA}$$

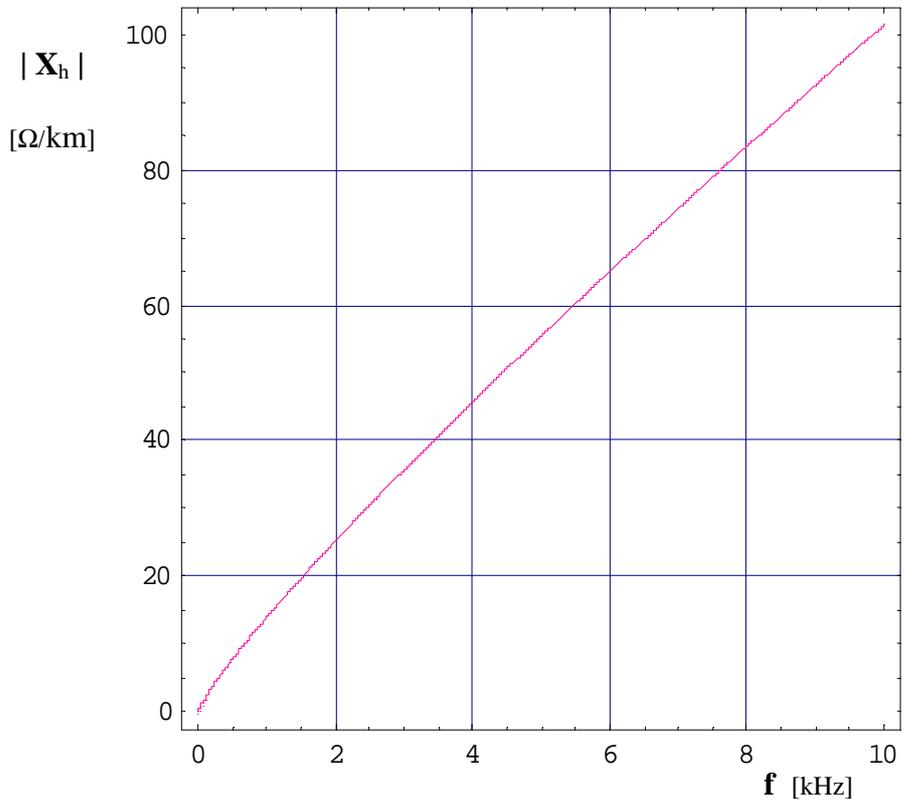
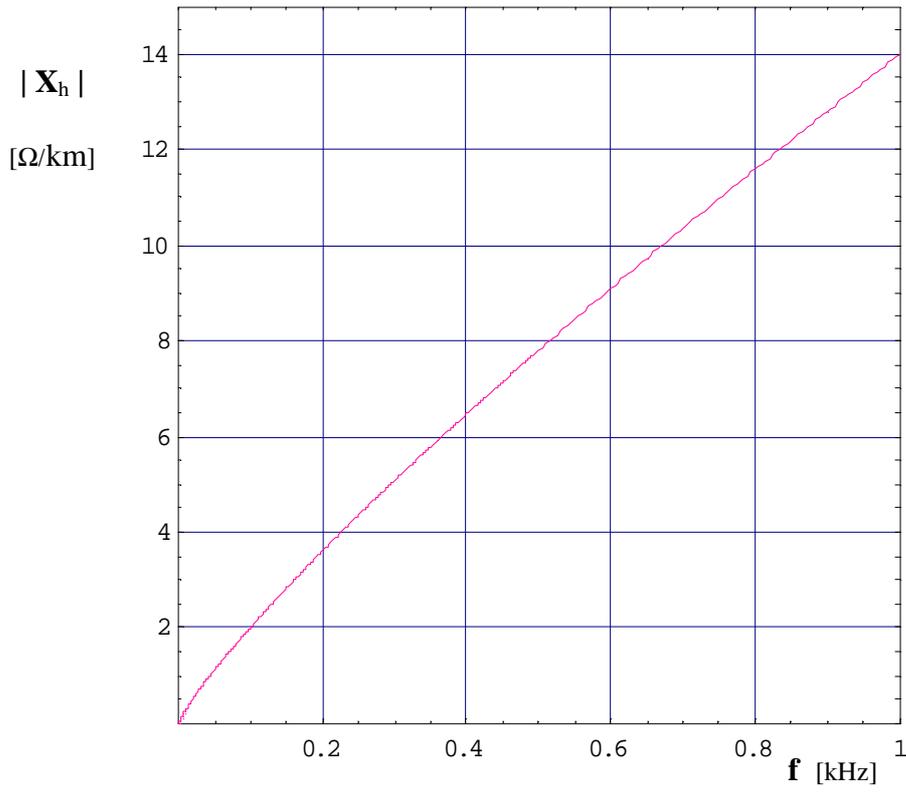
Linha LNC 1
Parâmetros unitários em função da frequência, na hipótese de transposição ideal

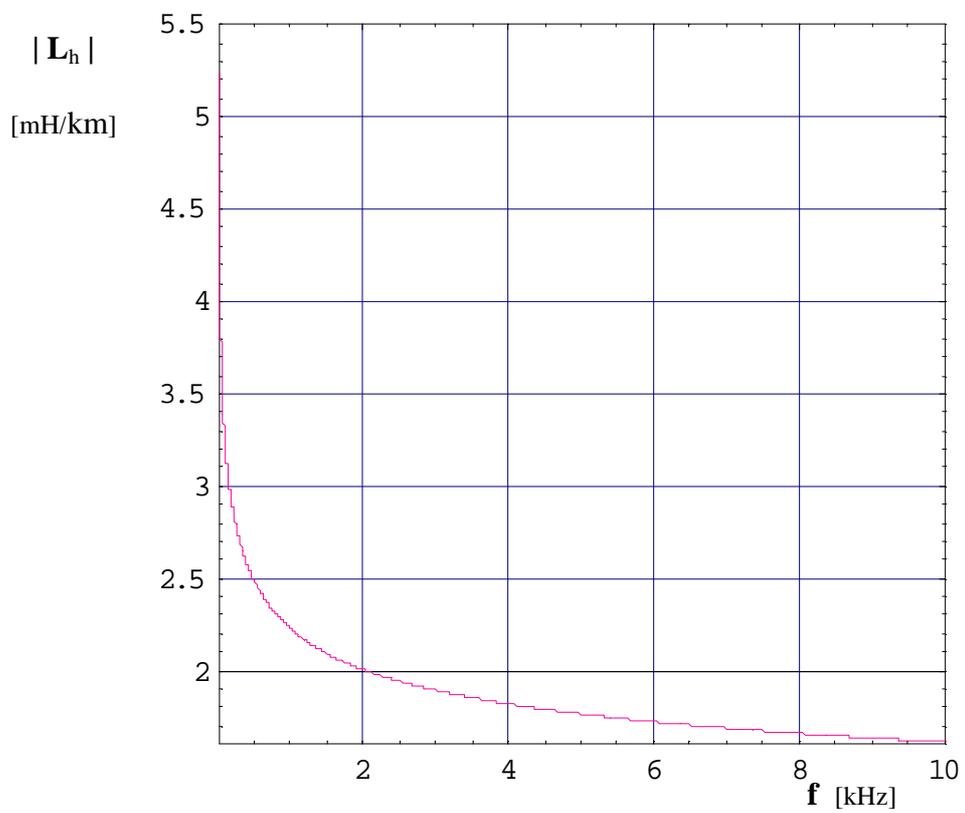
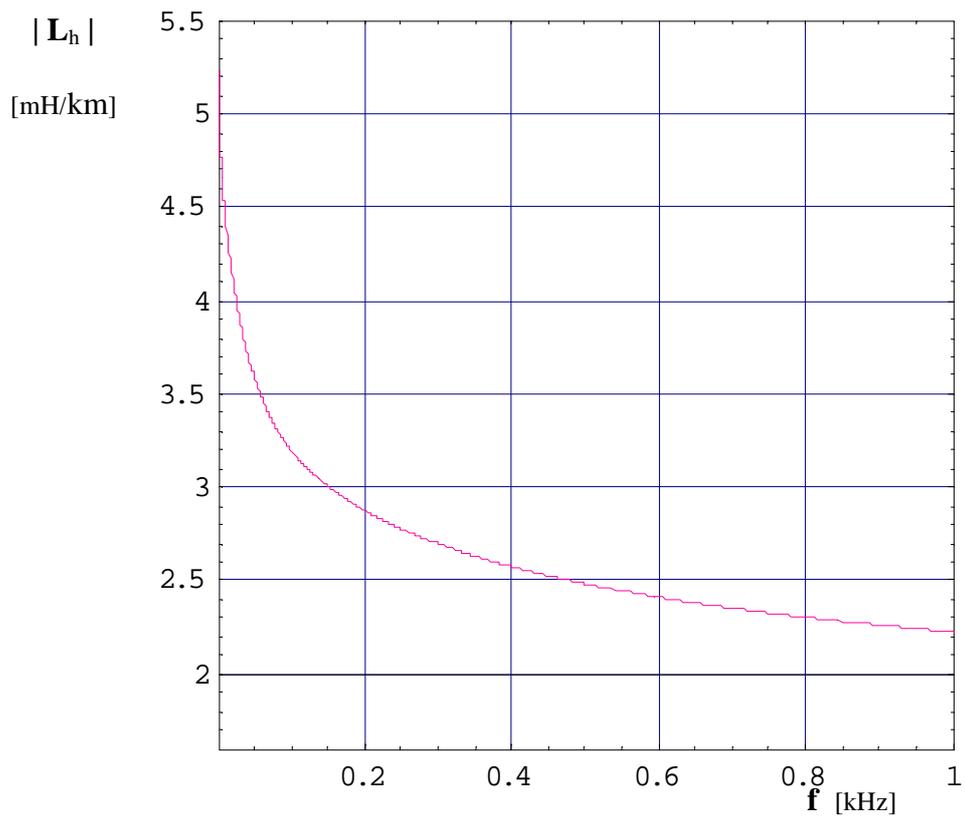












Listagem dos Resultados para Carga Pesada (xlxn3.nb) , processados no Mathematica (Critério 1):

contingência: curto no meio da linha / fases fechadas em ambos terminais da LT

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz), em Ω :

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.3535 +52.118 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.3535 +52.118 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.3535 +52.118 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 12.6145 +52.6361 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 12.6145 +52.6361 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.3535 +52.118 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto no meio da linha / abertura do terminal emissor da fase defeituosa

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 166.619 +127.134 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 166.619 +127.134 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 134.302 +137.599 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 166.619 +127.134 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 166.619 +127.134 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 134.302 +137.599 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto no meio da linha / abertura do terminal receptor da fase defeituosa

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.6572 +68.1111 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.6572 +68.1111 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.6572 +68.1111 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 13.851 +70.3562 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 13.851 +70.3562 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 12.6572 +68.1111 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto no meio da linha / fase defeituosa aberta em ambas extremidades

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 30.6608 +1337.99 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 30 j = 6 z(60Hz)= 78007.5 -88099.7 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 30.6608 +1337.99 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 170328. +26978.5 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 170328. +26978.5 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 30.6608 +1337.99 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto term. emissor / fases fechadas em ambos terminais da LT

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 1.2703 +19.1974 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 1.2703 +19.1974 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 1.2703 +19.1974 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 1.32873 +19.5055 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 1.32873 +19.5055 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 1.2703 +19.1974 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto term. emissor / abertura do terminal emissor da fase defeituosa

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 206.254 +159.777 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 206.254 +159.777 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 160.416 +169.083 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 206.254 +159.777 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 206.254 +159.777 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 160.416 +169.083 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto term. emissor / fase defeituosa aberta em ambas extremidades

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 24.4489 +1295.52 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 30 j = 6 z(60Hz)= 76431.6 -85411.1 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz)

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 24.4489 +1295.52 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 165596. +27341.5 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 165596. +27341.5 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 24.4489 +1295.52 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto 1/6 term. emissor / fases fechadas em ambos terminais da LT

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 5.95719 +34.3504 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 5.95719 +34.3504 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 5.95719 +34.3504 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 6.06125 +34.6858 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 6.06125 +34.6858 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 5.95719 +34.3504 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto 1/6 term. emissor / abertura do terminal emissor da fase defeituosa**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 228.45 +135.41 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 228.45 +135.41 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 208.683 +150.223 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 21 z(60Hz)= 224.633 +145.038 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 228.45 +135.41 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 208.683 +150.223 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto 1/6 term. emissor / fase defeituosa aberta em ambas extremidades**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 28.7487 +1319.53 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 30 j = 6 z(60Hz)= 77299.7 -86912.5 i x1 = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 28.7487 +1319.53 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 168194. +27168.1 i x1 = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 168194. +27168.1 i x1 = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 28.7487 +1319.53 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto 1/6 term. recep. / fases fechadas em ambos terminais da LT**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 14.3795 +52.5047 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 14.3795 +52.5047 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 14.3795 +52.5047 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 14.8791 +53.3697 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 14.8791 +53.3697 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 14.3795 +52.5047 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto 1/6 term. recep / abertura do terminal receptor da fase defeituosa**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 17.6345 +86.9909 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 17.6345 +86.9909 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 17.6345 +86.9909 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 20.3954 +91.3663 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 20.3954 +91.3663 i x1 = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 17.6345 +86.9909 i x1 = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto term. 1/6 recep / fase defeituosa aberta em ambas extremidades**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 23.3339 +1316.35 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 30 j = 6 z(60Hz)= 77329.9 -86824.2 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 23.3339 +1316.35 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 168312. +27021.4 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 168312. +27021.4 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 23.3339 +1316.35 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto term. recep / fases fechadas em ambas extremidades**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 13.78 +46.2234 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 13.78 +46.2234 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 13.78 +46.2234 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 14.4261 +47.3187 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 51 j = 21 z(60Hz)= 14.4261 +47.3187 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 13.78 +46.2234 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: **curto term. recep / fase defeituosa aberta em ambas extremidades**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 16.3483 +1290.77 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60Hz):

k = 30 j = 6 z(60Hz)= 76476. -85280.1 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 16.3483 +1290.77 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 165771. +27124.6 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60Hz):

k = 24 j = 10 z(60Hz)= 165771. +27124.6 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60Hz):

k = 1 j = 1 z(60Hz)= 16.3483 +1290.77 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

Resultados para Carga Leve (xlxn2.nb)

contingência: **curto no meio da linha / fase fechada**

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 12.7275 +51.4066 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 12.7275 +51.4066 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 12.7275 +51.4066 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 12.9931 +51.8835 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 12.9931 +51.8835 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 12.7275 +51.4066 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto no meio da linha / ab. term. transm.

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 143.69 +113.827 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 143.69 +113.827 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60): contingência:

k = 1 j = 1 z(60)= 119.625 +121.866 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60): contingência:

k = 51 j = 21 z(60)= 143.69 +113.827 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 143.69 +113.827 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 119.625 +121.866 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto no meio da linha / ab. term. recep.

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 12.3448 +67.9107 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 12.3448 +67.9107 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 12.3448 +67.9107 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 13.4134 +70.1298 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 13.4134 +70.1298 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 12.3448 +67.9107 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto no meio da linha / fase aberta:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 30.4036 +1337.79 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60):

k = 30 j = 6 z(60)= 78040.7 -88158.9 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 30.4036 +1337.79 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 24 j = 10 z(60)= 170486. +27201. i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 24 j = 10 z(60)= 170486. +27201. i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 30.4036 +1337.79 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

: curto term. emissor / fase fechada:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 1.35431 +19.0836 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 1.35431 +19.0836 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 1.35431 +19.0836 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 1.41529 +19.3836 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 1.41529 +19.3836 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 1.35431 +19.0836 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto term. emissor / ab. term. transm.:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 51 j = 21 z(60)= 177.559 +143.653 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60):

k = 51 j = 21 z(60)= 177.559 +143.653 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 142.593 +150.315 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 177.559 +143.653 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 177.559 +143.653 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 142.593 +150.315 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto term. emissor / fase ab.:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 23.3611 +1294.8 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 30 j = 6 z(60)= 76466.8 -85459.3 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 23.3611 +1294.8 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 24 j = 10 z(60)= 165761. +27543.8 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 24 j = 10 z(60)= 165761. +27543.8 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 23.3611 +1294.8 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto 1/3 term. emissor / fase ab.:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 6.11617 +34.0928 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 6.11617 +34.0928 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 6.11617 +34.0928 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 6.2236 +34.4118 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 6.2236 +34.4118 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 6.11617 +34.0928 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto 1/3 term. emissor / fase fech.:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 51 j = 21 z(60)= 193.758 +125.578 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 193.758 +125.578 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

contingência: curto 1/3 term. emissor / TE aberto

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 179.048 +135.724 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 21 z(60)= 191.521 +132.58 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 193.758 +125.578 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i
valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 179.048 +135.724 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto 1/3 term. emissor / fase ab.:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 27.9989 +1319.01 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 30 j = 6 z(60)= 77334.4 -86964.7 i xl = 4.85463 +1456.39 i xn= 1.77608 +444.021 i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 27.9989 +1319.01 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 24 j = 10 z(60)= 168358. +27378.2 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 24 j = 10 z(60)= 168358. +27378.2 i xl = 4.55015 +1365.05 i xn= 3.19695 +799.237 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 27.9989 +1319.01 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência: curto 1/6 term. recep. / fase fech.:

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 15.0516 +51.131 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 15.0516 +51.131 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 15.0516 +51.131 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 15.5565 +51.9199 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60)

k = 51 j = 21 z(60)= 15.5565 +51.9199 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60)

k = 1 j = 1 z(60)= 15.0516 +51.131 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

contingência : curto 1/6 term. recep TR aberto

valores tal que se tenha o menor valor em módulo da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 16.8352 +86.4853 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor da parte imaginária de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 16.8352 +86.4853 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o menor valor em módulo de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 16.8352 +86.4853 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

valores tal que se tenha o maior valor em módulo de z(60):

k = 51 j = 21 z(60)= 19.3016 +90.8095 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o maior valor da parte real de z(60):

k = 51 j = 21 z(60)= 19.3016 +90.8095 i xl = 5.92027 +1776.08 i xn= 7.10433 +1776.08 i

valores tal que se tenha o menor valor da parte real de z(60):

k = 1 j = 1 z(60)= 16.8352 +86.4853 i xl = 3.38301 +1014.9 i xn= 0. +0. i

Impedância medida no terminal 1

Linha LNC1

$L = 400 \text{ km}$

$L_1 = 0 \text{ km}$

Com 52% de compensação em derivação, distribuída igualmente entre as duas extremidades da LT, com reatores de neutro de 800Ω , e sem compensação em série .

Com disjuntores das duas extremidades fechados nas três fases

$Z [60 \text{ Hz }] = 8,16504 - 0,368667 i \Omega$

Com disjuntor da extremidade 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases, e disjuntor da extremidade 2 fechado nas três fases

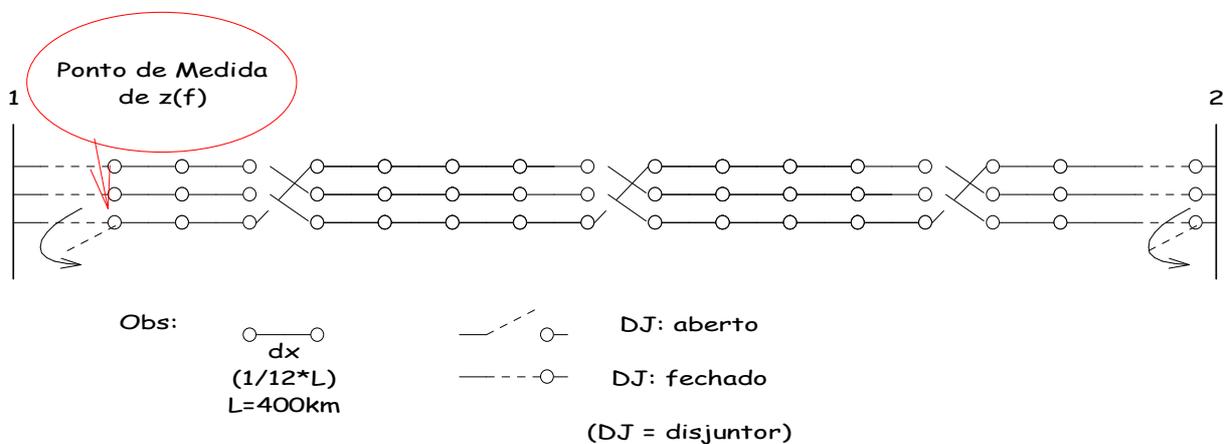
$Z [60 \text{ Hz }] = 22,3486 - 15,4326 i \Omega$

Com disjuntor da extremidade 1 fechado nas três fases, e disjuntor da extremidade 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases.

$Z [60 \text{ Hz }] = 4,70392 - 59,8018 i \Omega$

Com disjuntores das extremidades 1 e 2 abertos na fase a que se refere o valor de Z , e fechados nas outras duas fases

$Z [60 \text{ Hz }] = 6345,03 - 32874,0 i \Omega$



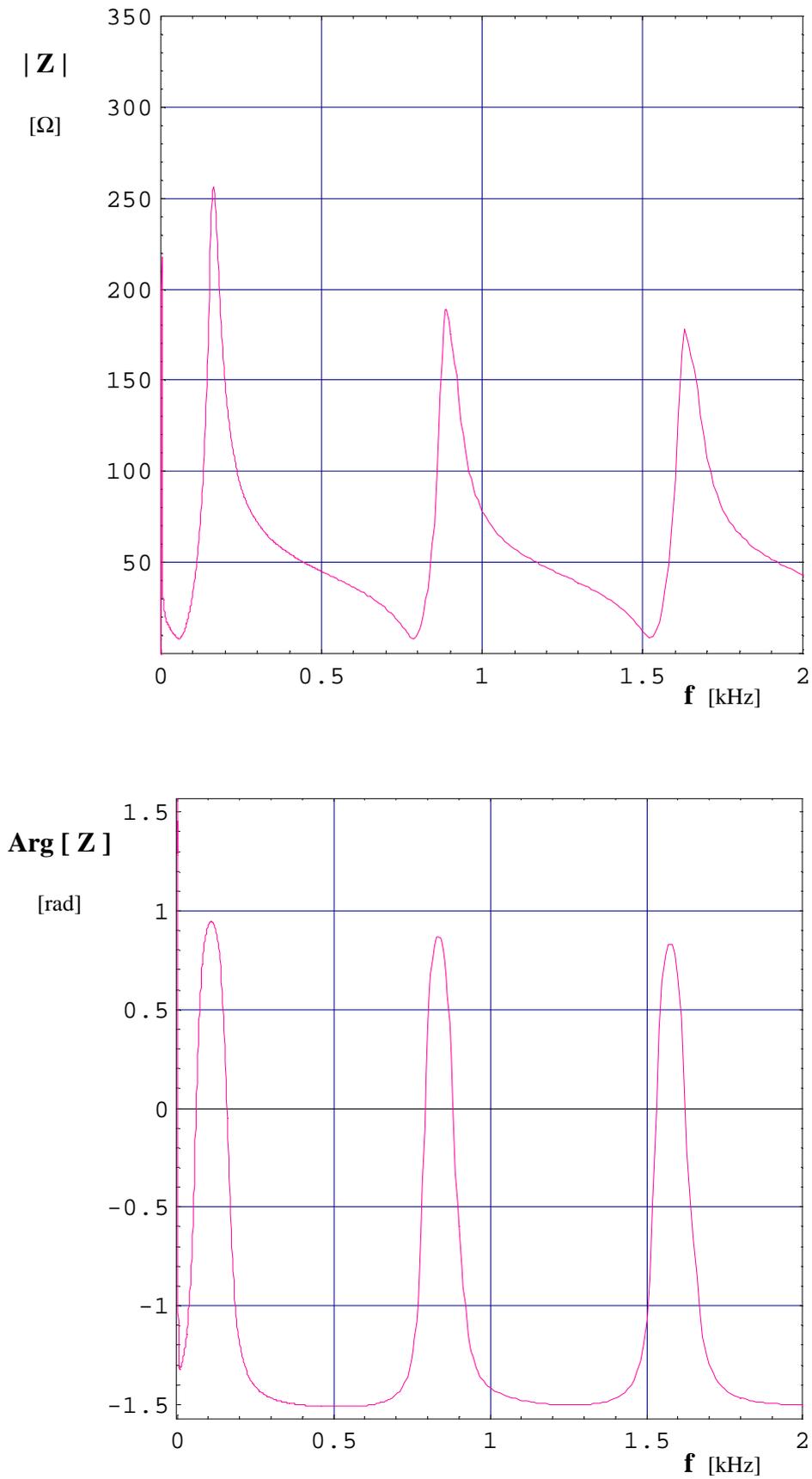


Figura 1 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0,2kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

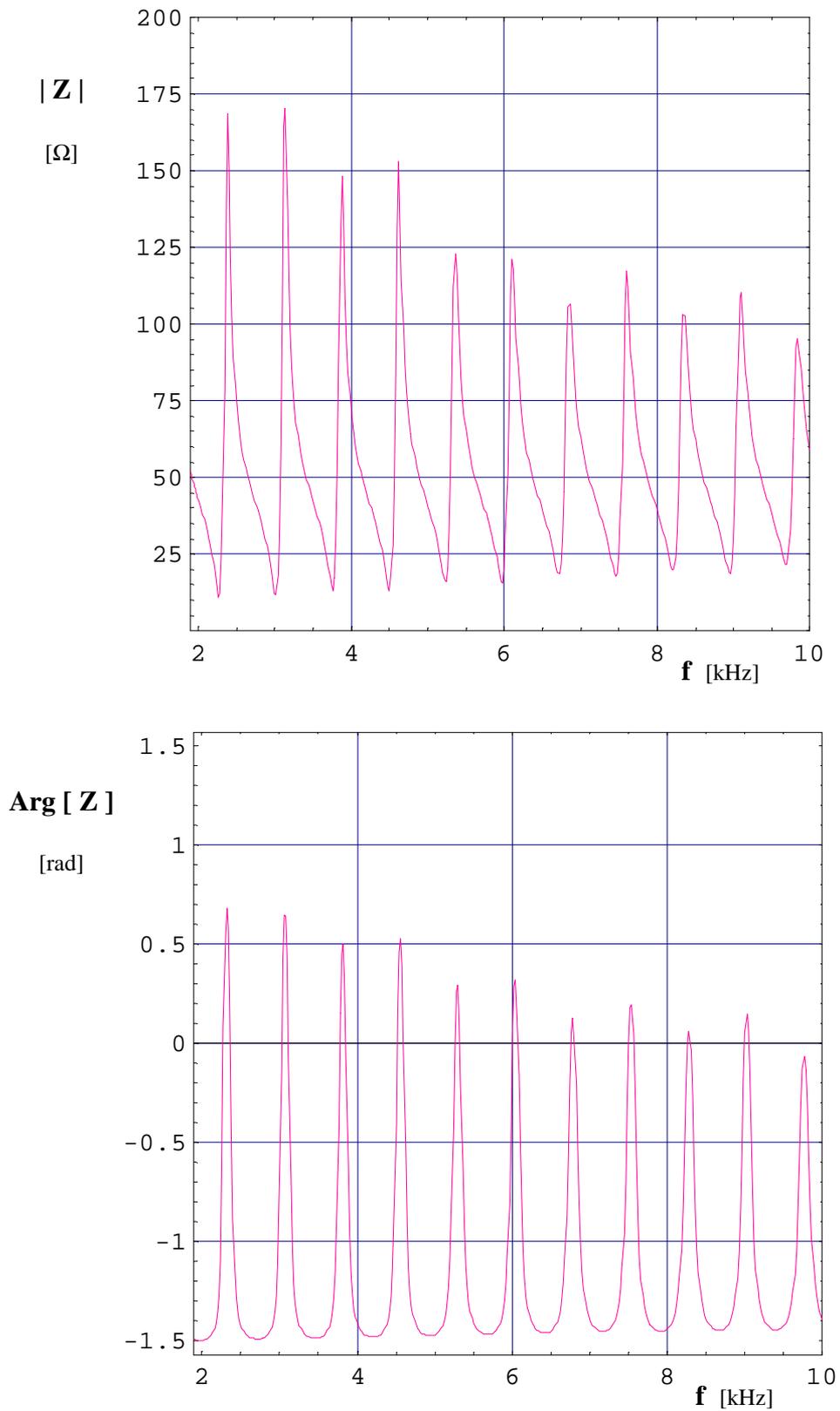


Figura 2 - Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

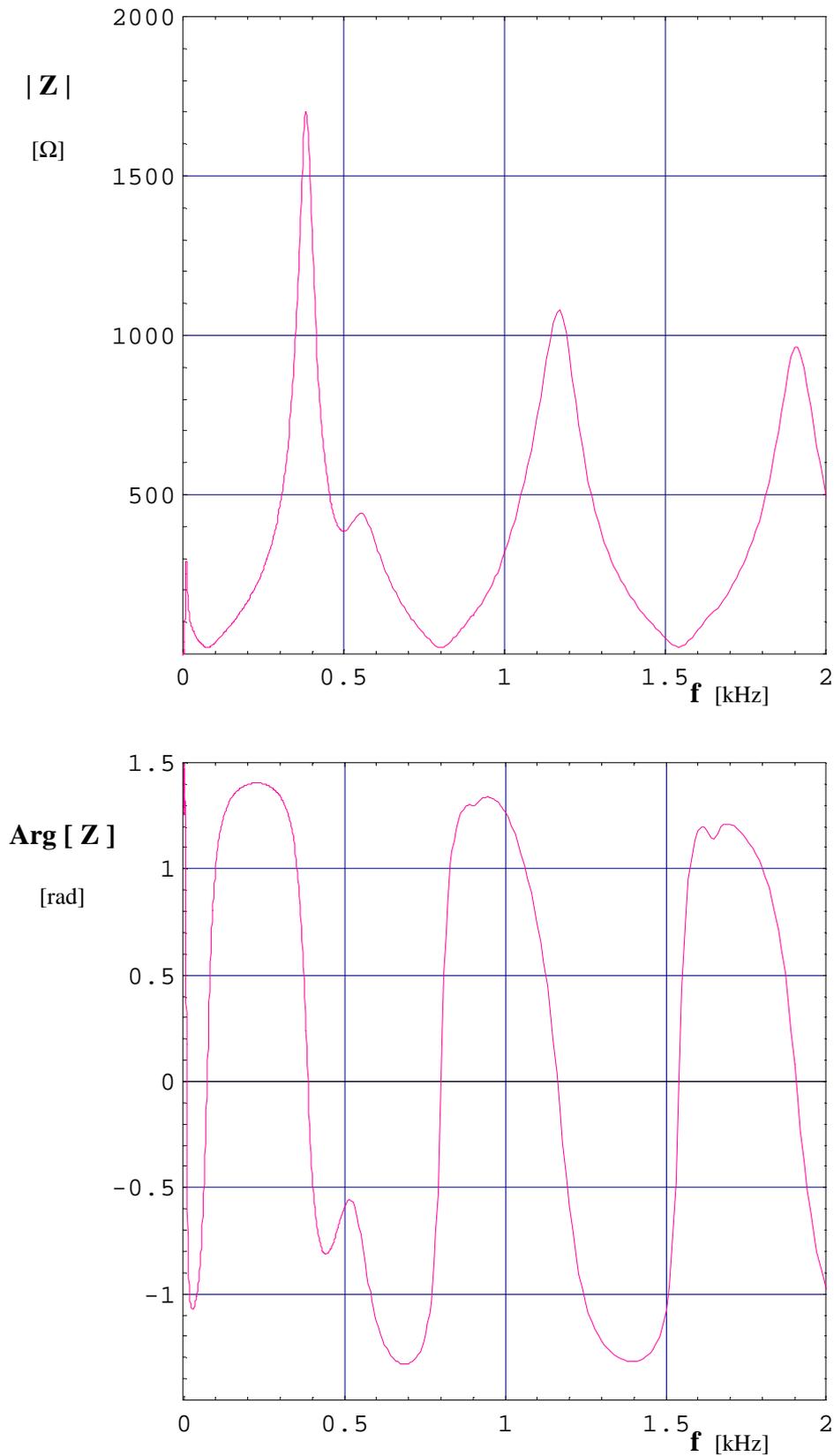


Figura 3 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0, 2 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

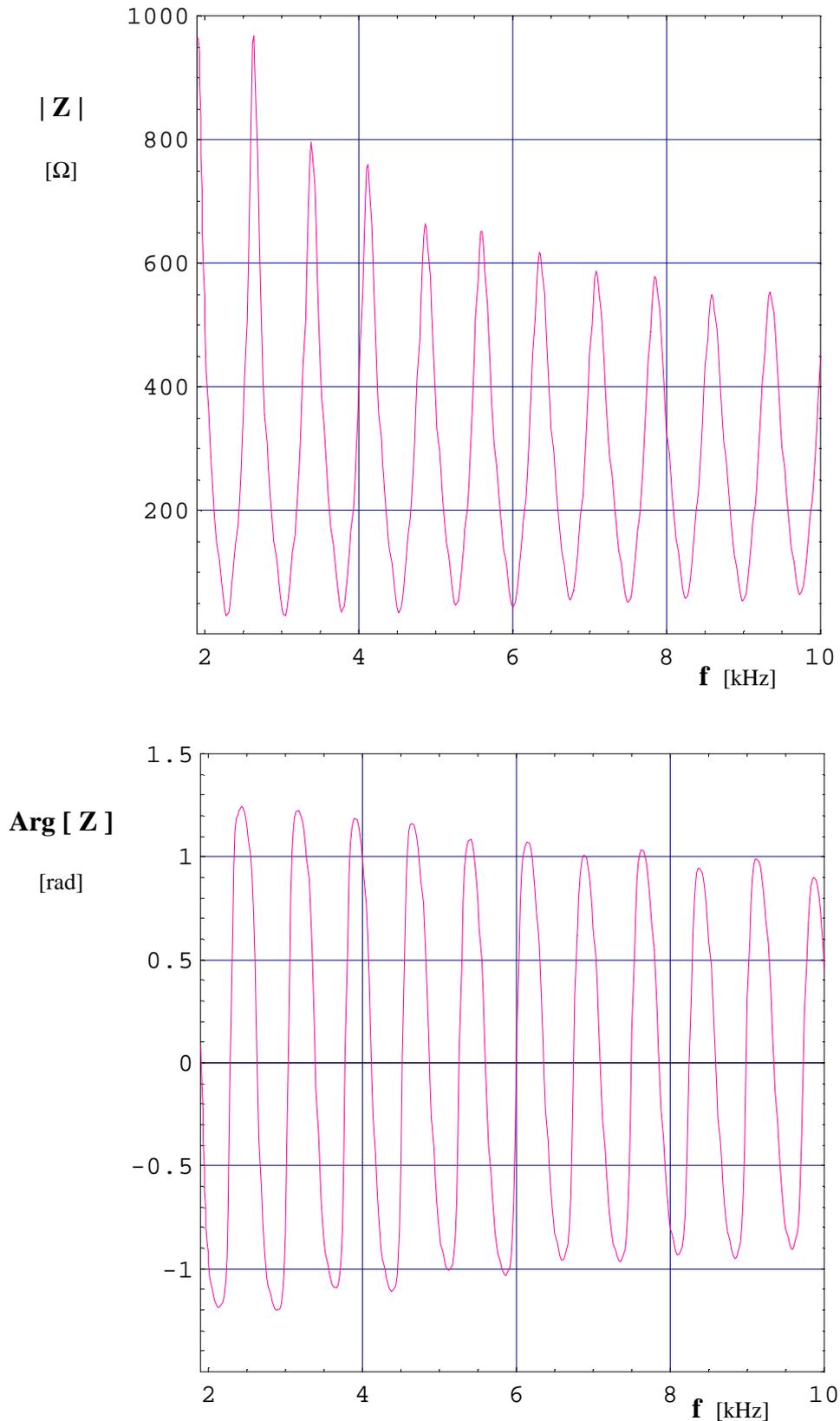


Figura 4 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

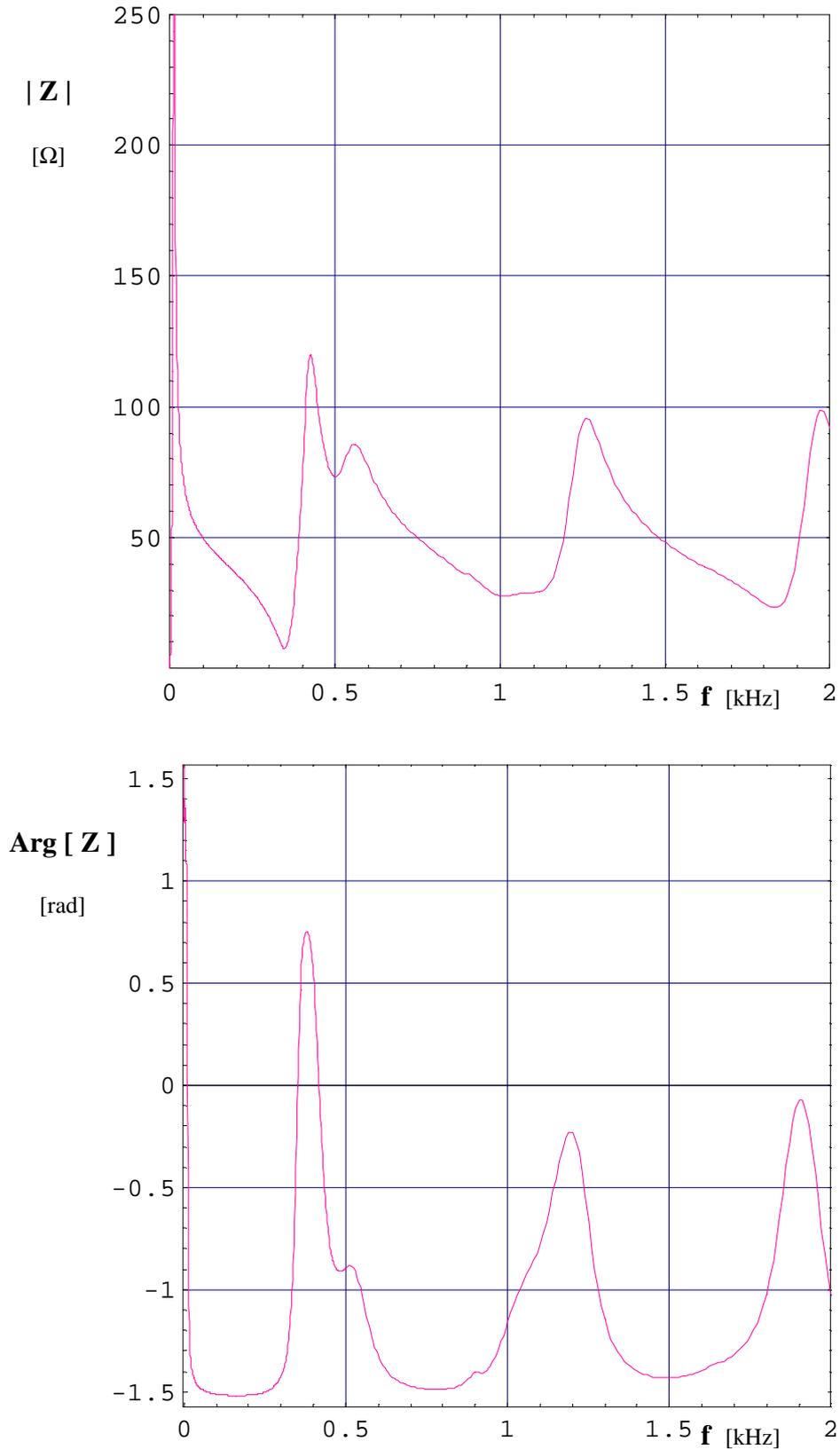


Figura 5 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0,2 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

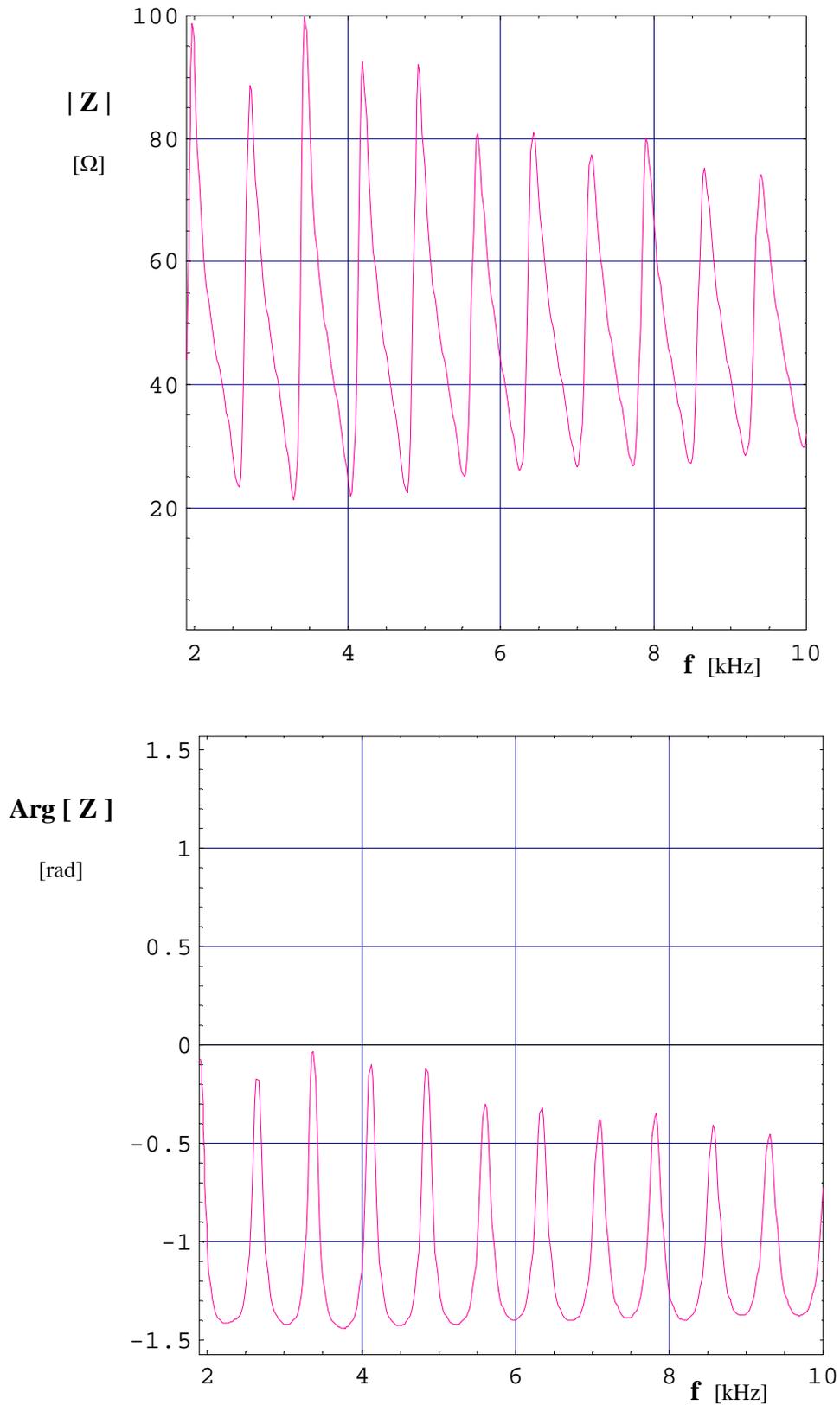


Figura 6 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

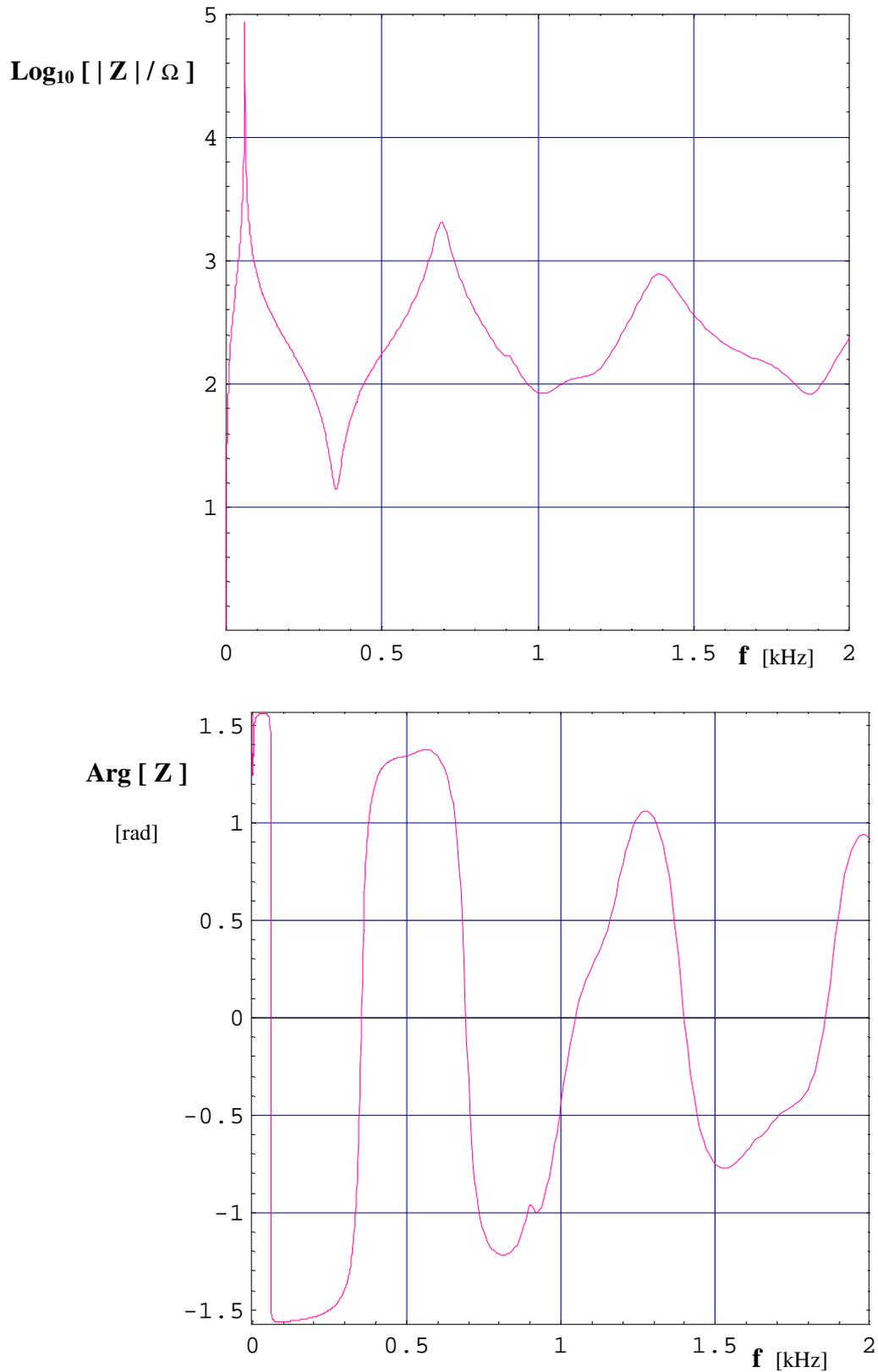


Fig. 7 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala logarítmica de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

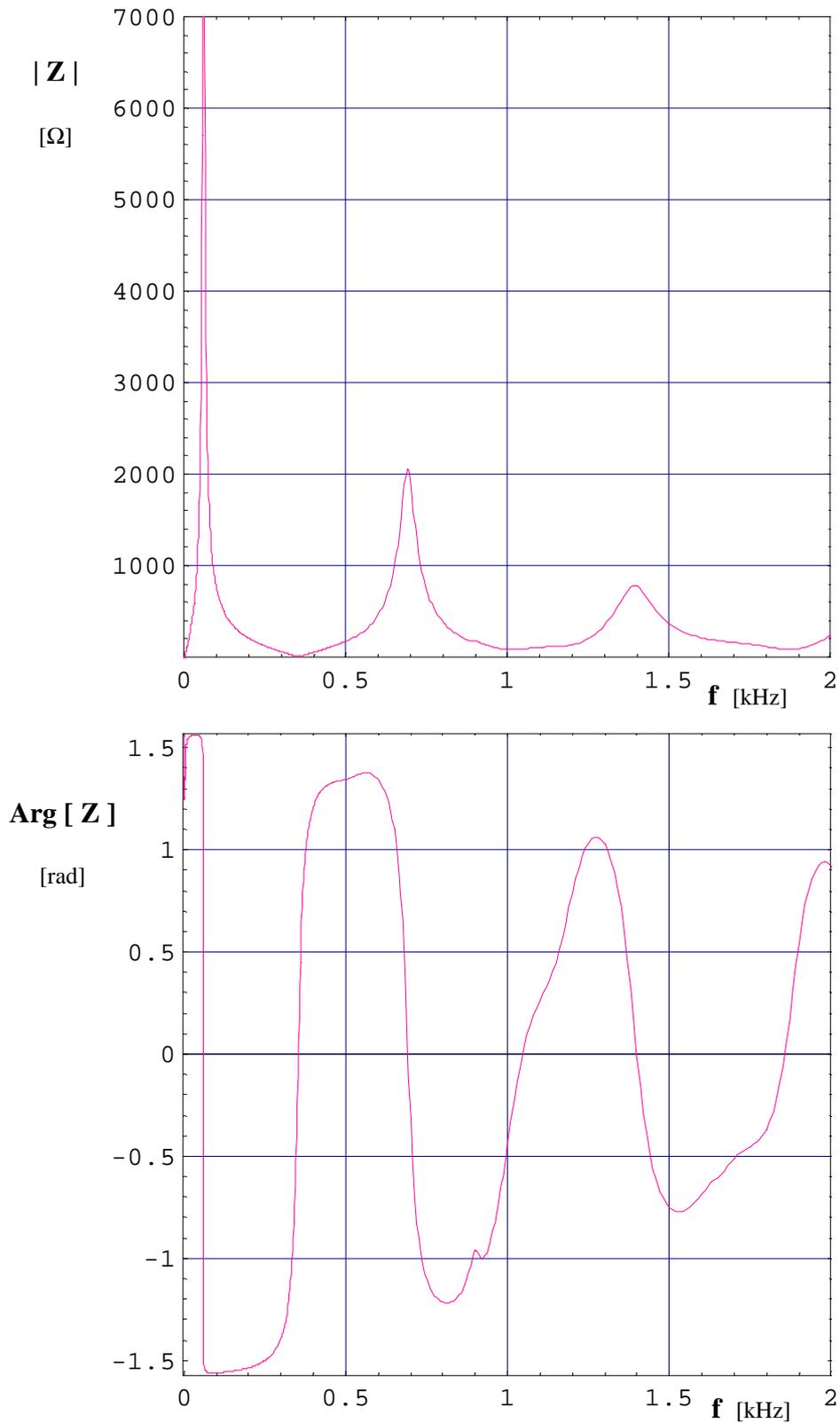


Fig. 8 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala linear de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

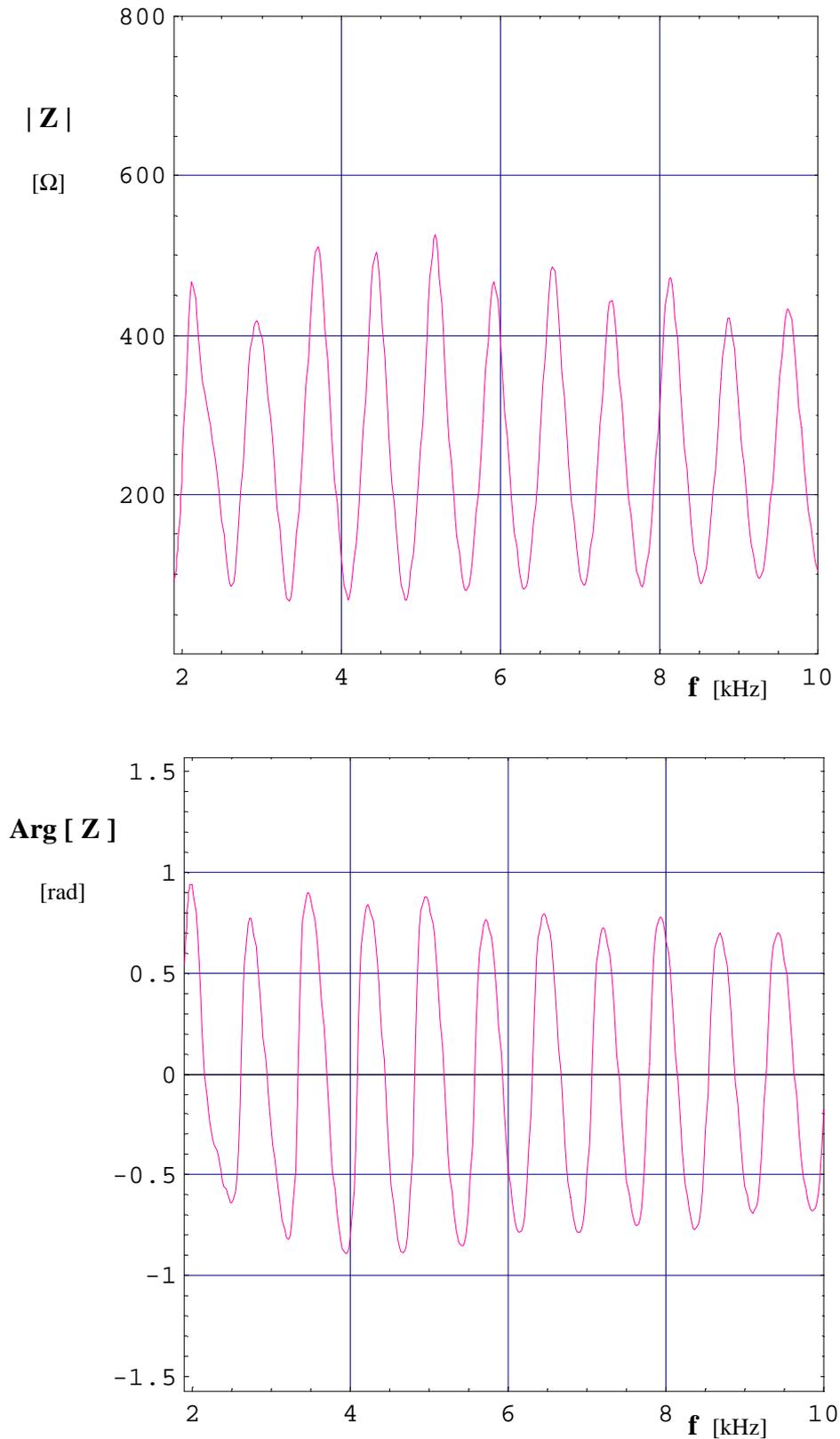


Fig. 9 –Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

Impedância medida num ponto a 134 km do terminal 1

Linha LNC 1

$L = 400 \text{ km}$

$L_1 = 134 \text{ km}$

Com 52% de compensação em derivação, distribuída igualmente entre as duas extremidades da LT, com reatores de neutro de 800Ω , e sem compensação em série.

Com disjuntores das duas extremidades fechados nas três fases

$$Z [60 \text{ Hz }] = 6,4582 + i 25,7544 \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases, e disjuntor da extremidade 2 fechado nas três fases

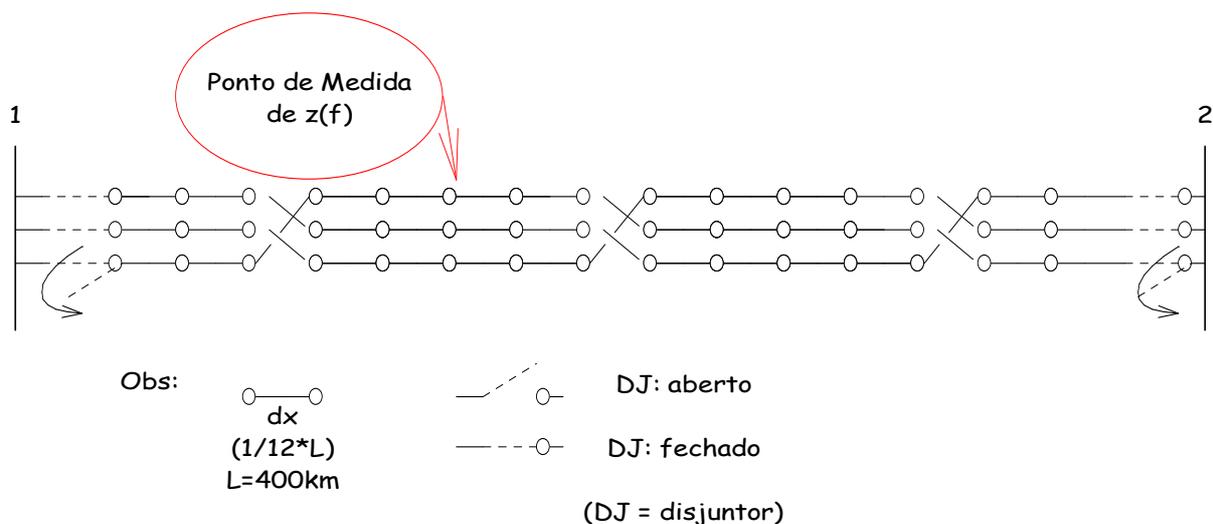
$$Z [60 \text{ Hz }] = 22,0009 - i 7,1028 \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 fechado nas três fases, e disjuntor da extremidade 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 12,2698 - i 43,4242 \Omega$$

Com disjuntores das extremidades 1 e 2 abertos na fase a que se refere o valor de Z , e fechados nas outras duas fases

$$Z [60 \text{ Hz }] = 6330,86 - i 33687,6 \Omega$$



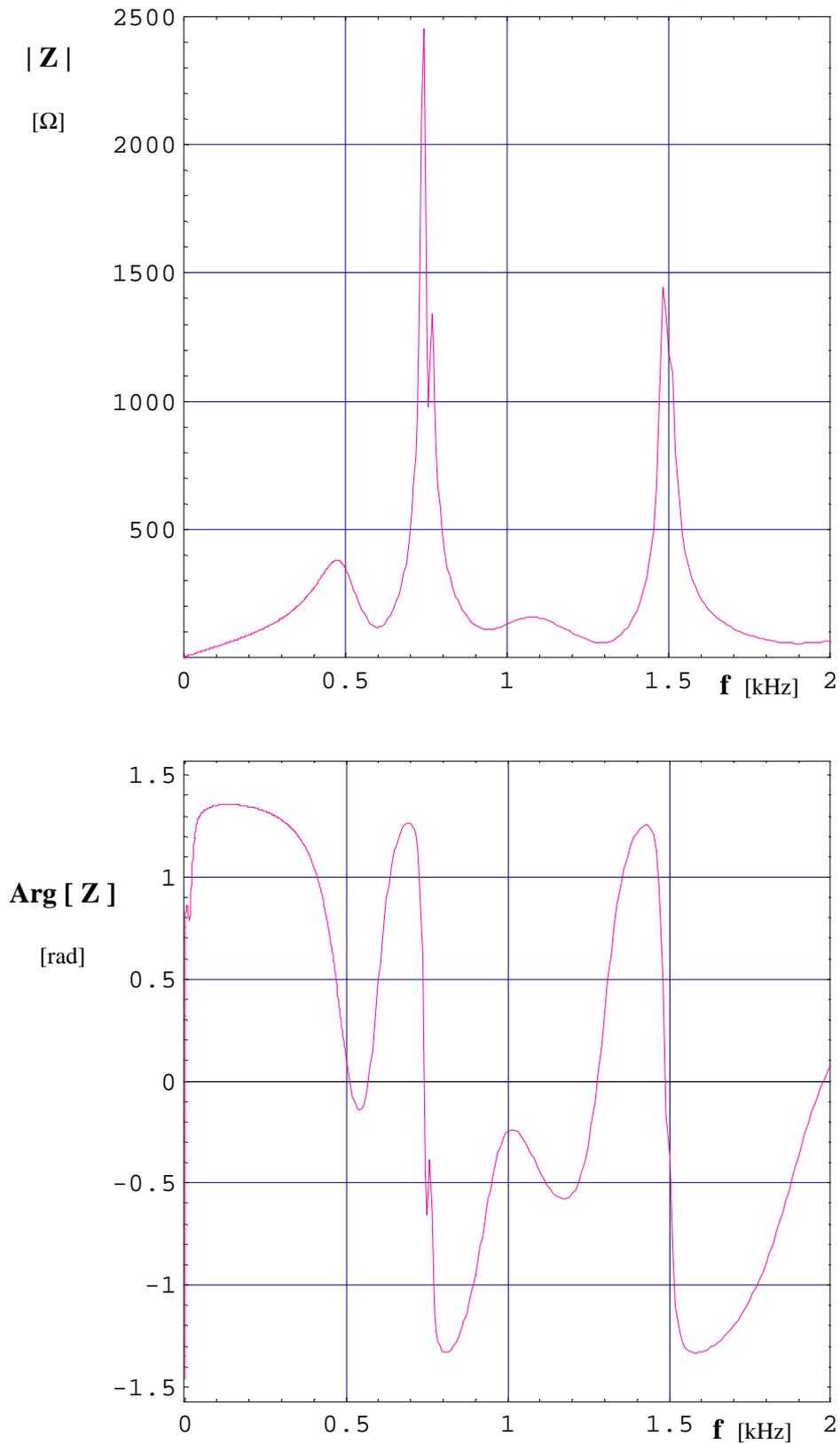


Fig. 1 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

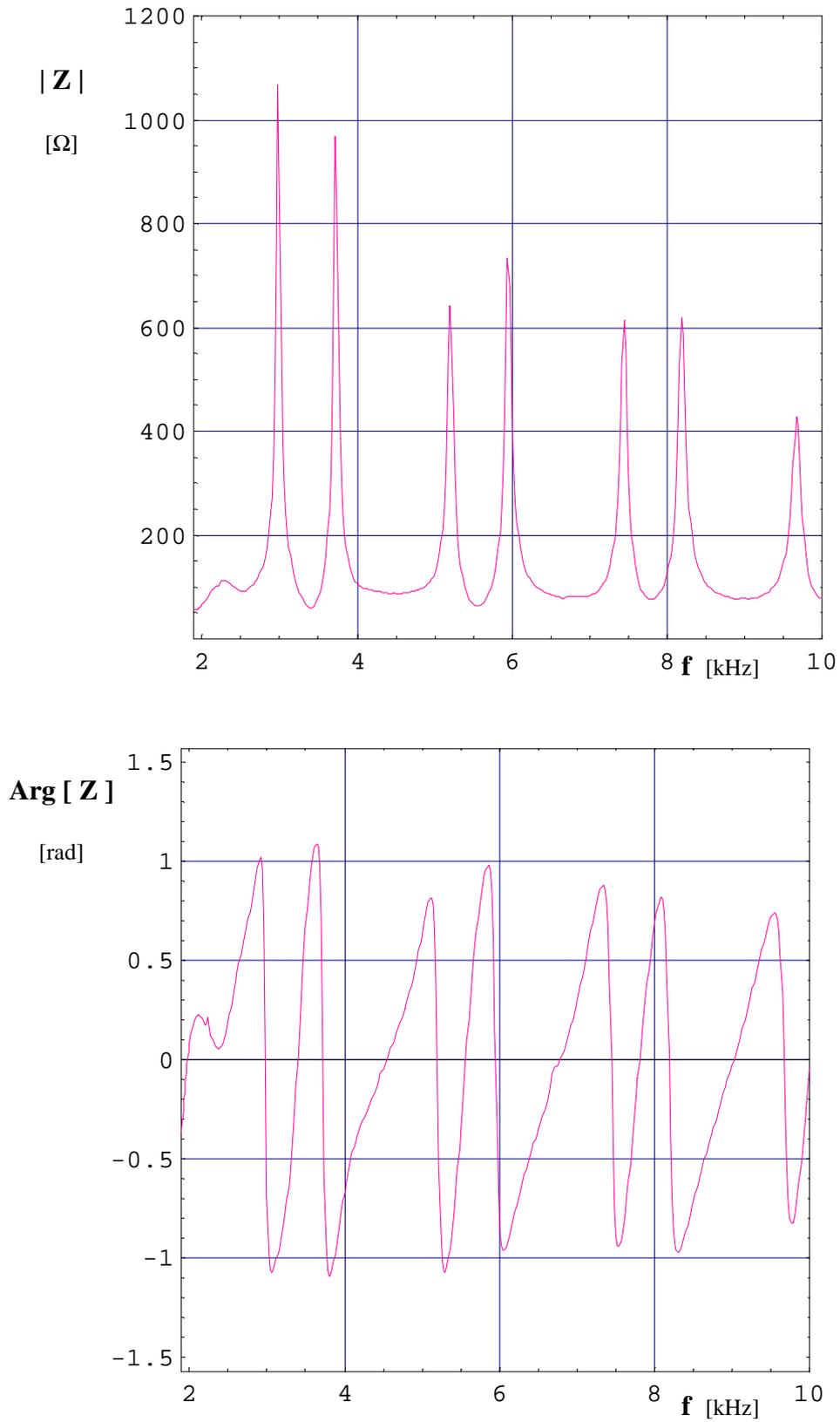


Fig. 2 - Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

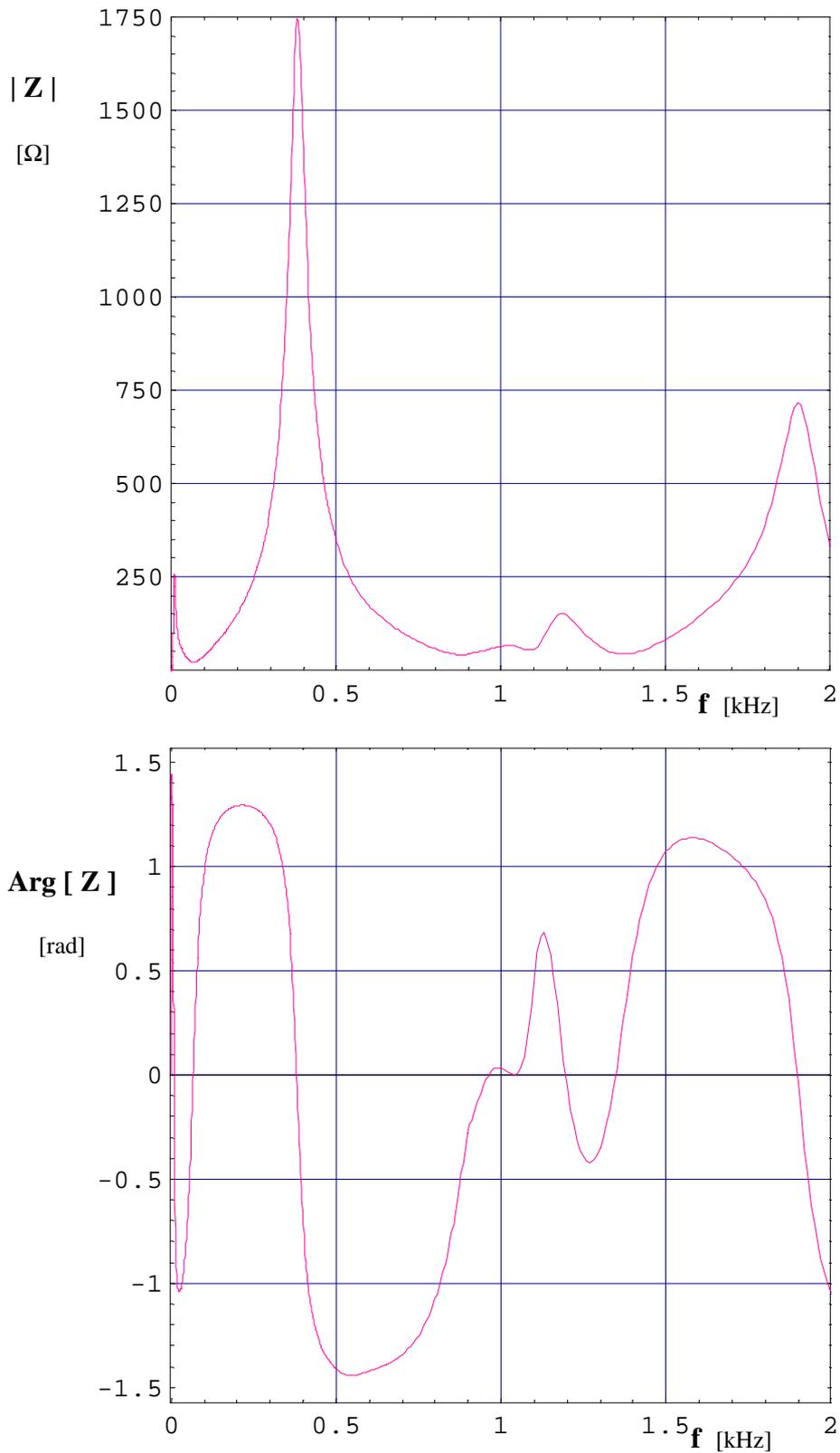


Fig. 3 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

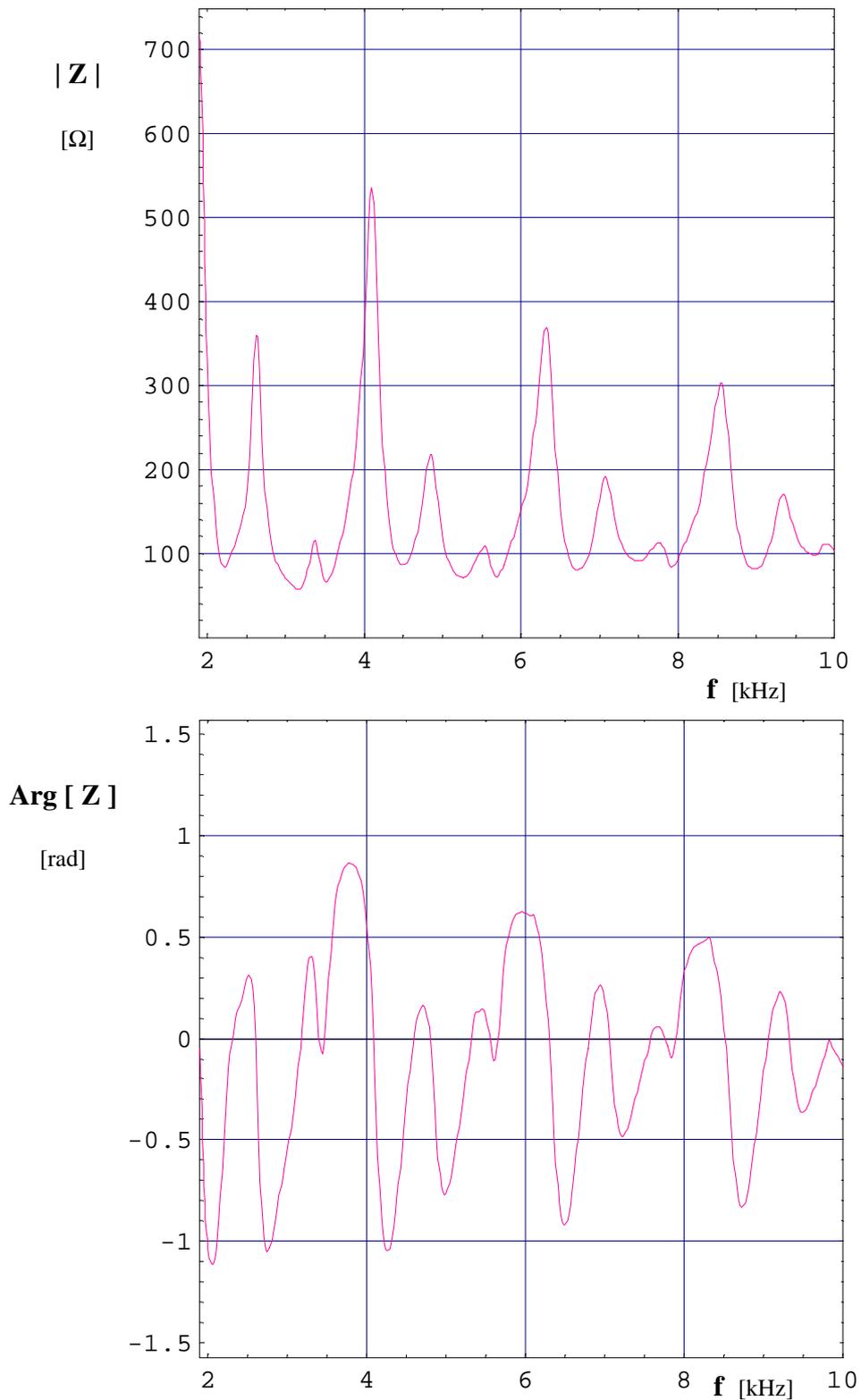


Fig. 4 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

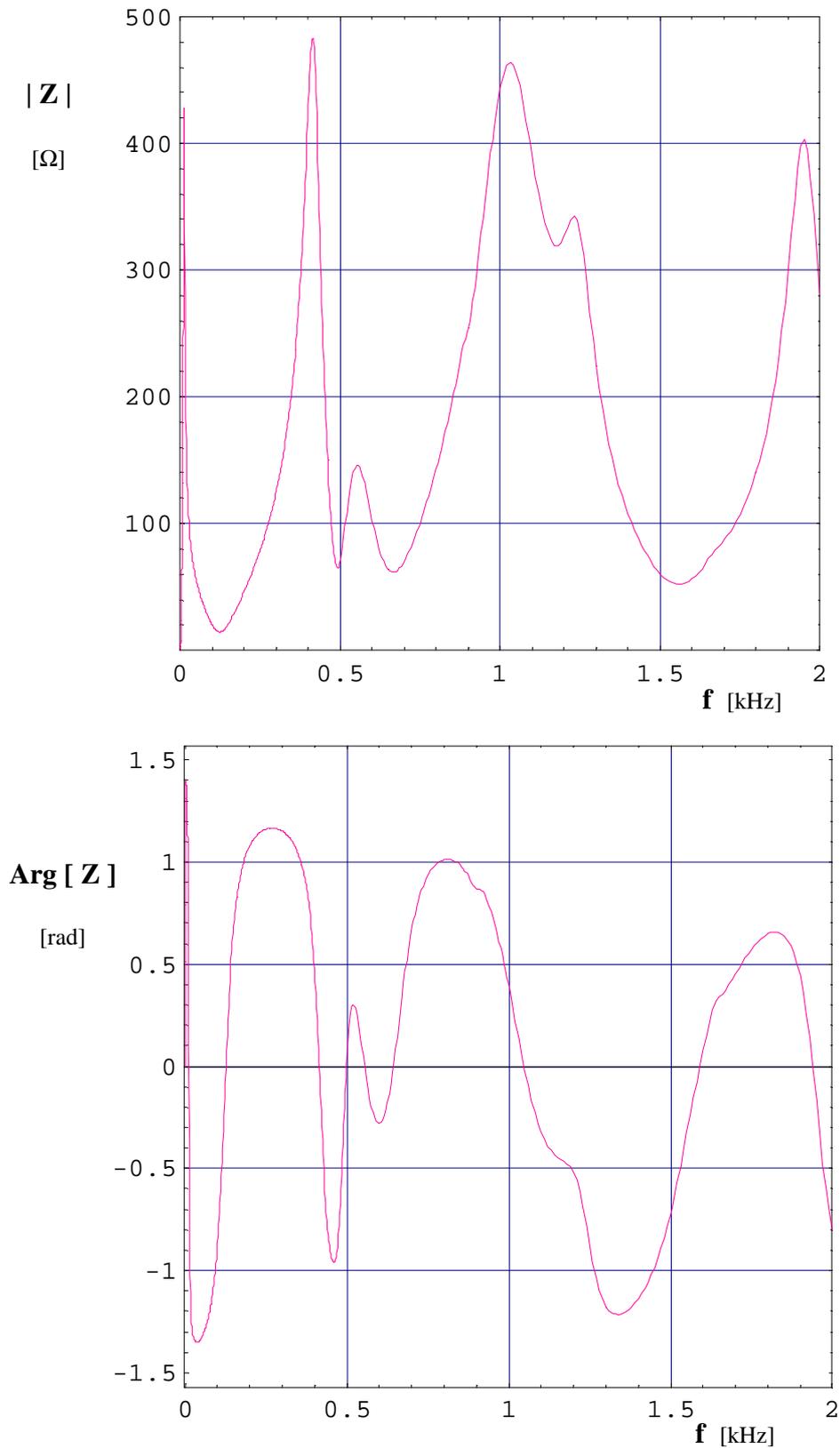


Fig. 5 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

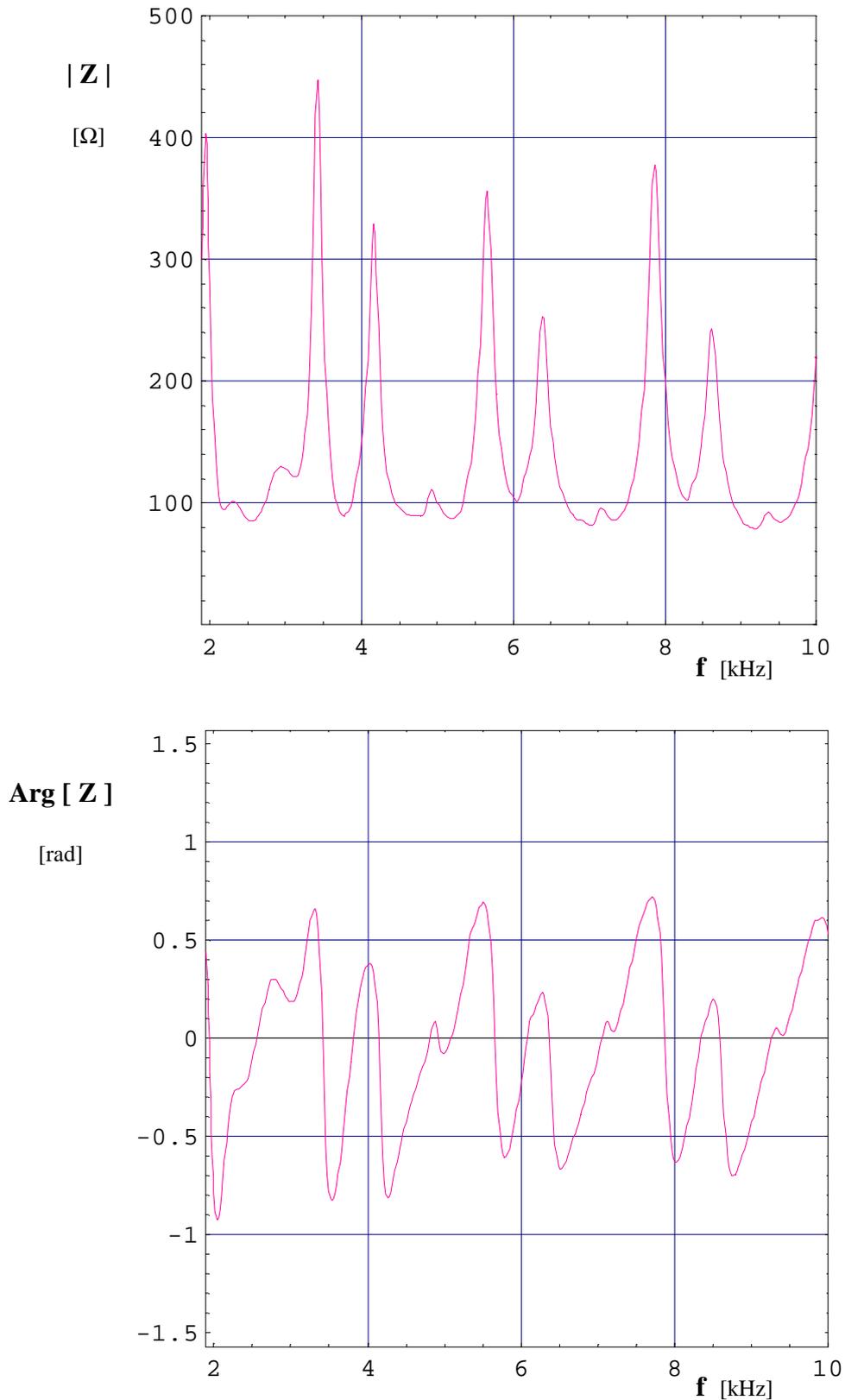


Fig. 6 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

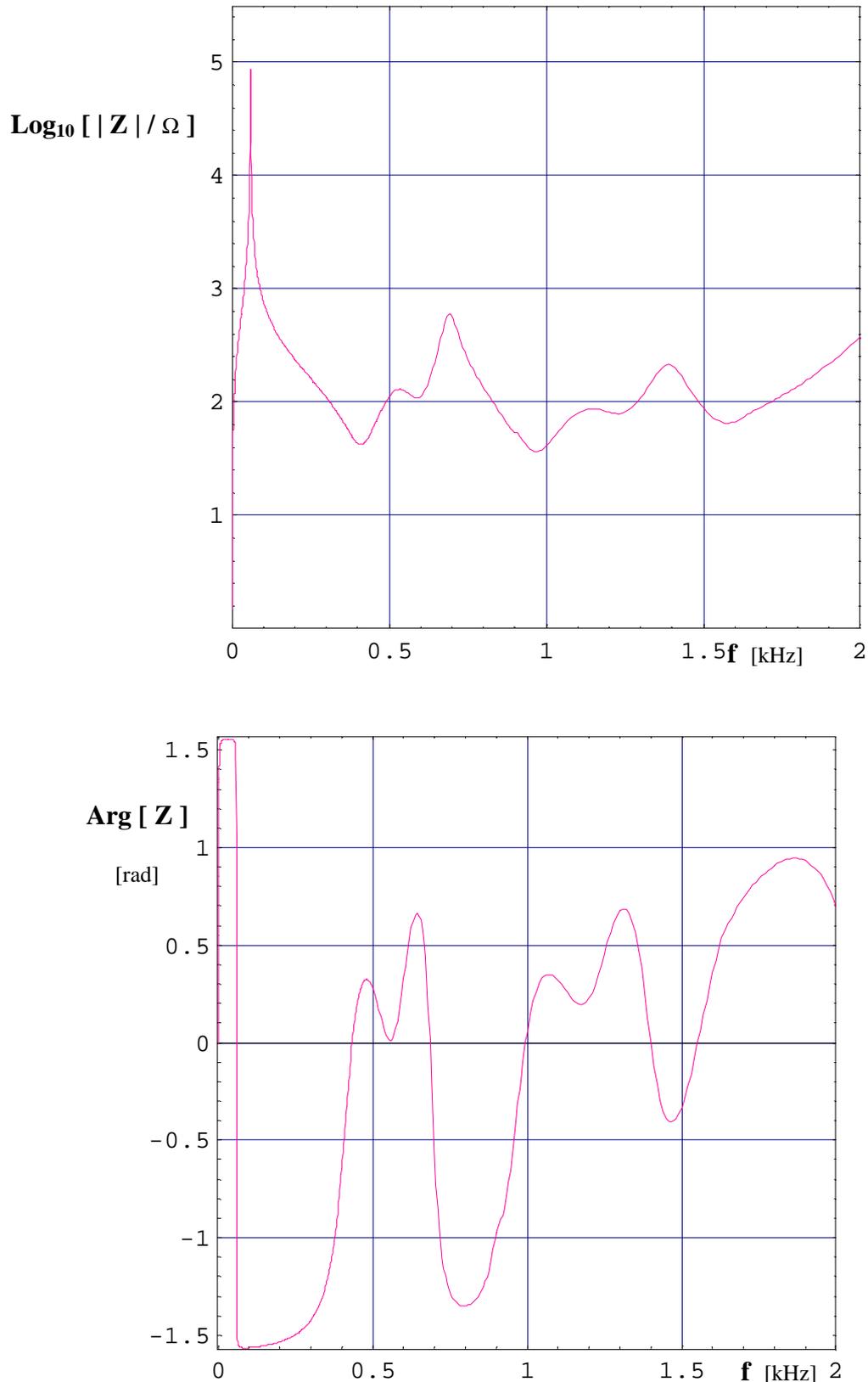


Fig. 7 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala logarítmica de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

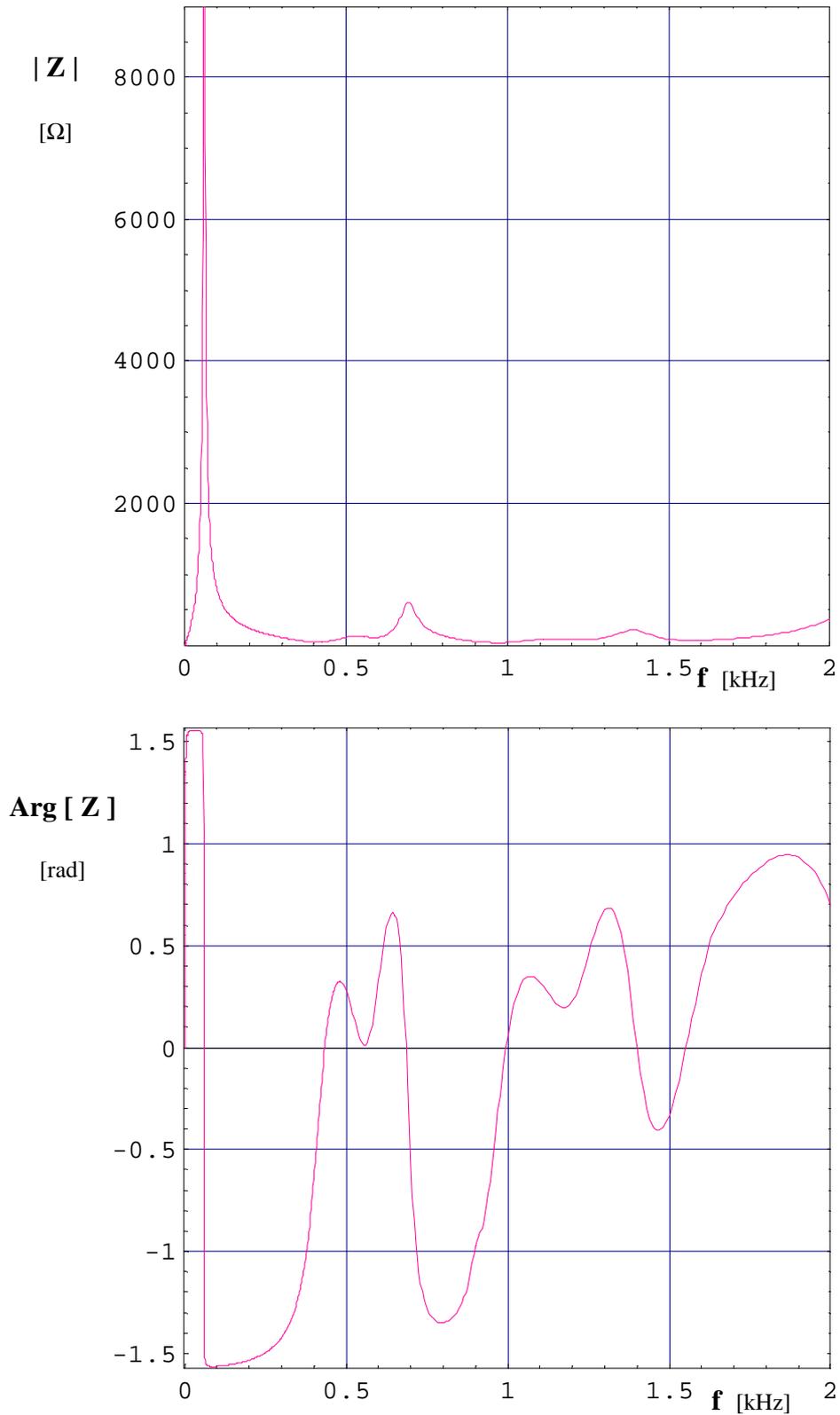


Fig. 8 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala linear de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

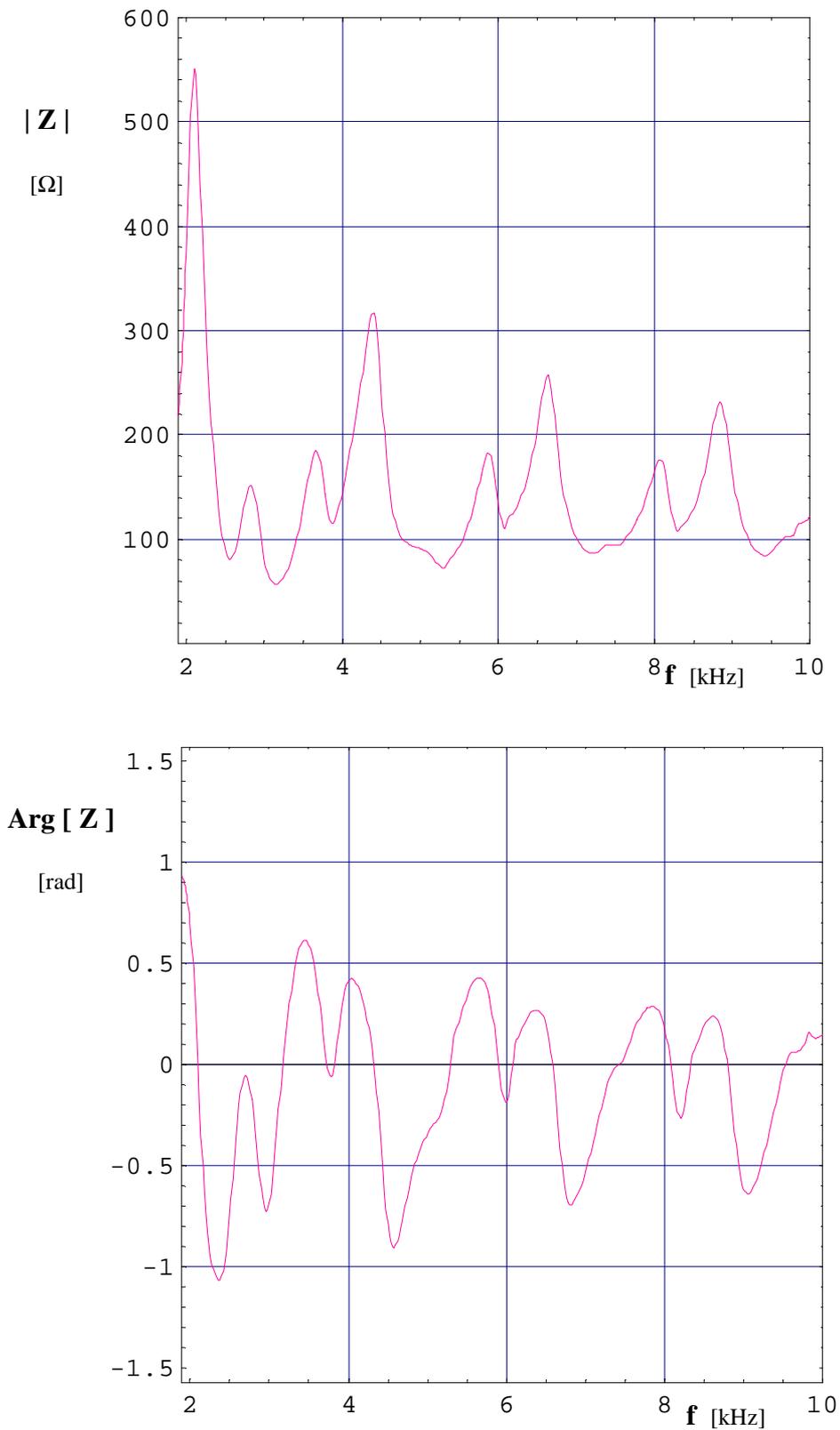


Fig. 9 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases

Impedância medida num ponto a 200 km do terminal 1 (meio da LT)

Linha LNC 1

$L = 400 \text{ km}$

$L_1 = 200 \text{ km}$

Com 52% de compensação em derivação, distribuída igualmente entre as duas extremidades da LT, com reatores de neutro de 800Ω , e sem compensação em série .

Com disjuntores das duas extremidades fechados nas três fases

$Z [60 \text{ Hz }] = 9,79946 + i 14,2665 \Omega$

Com disjuntor da extremidade 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases, e disjuntor da extremidade 2 fechado nas três fases

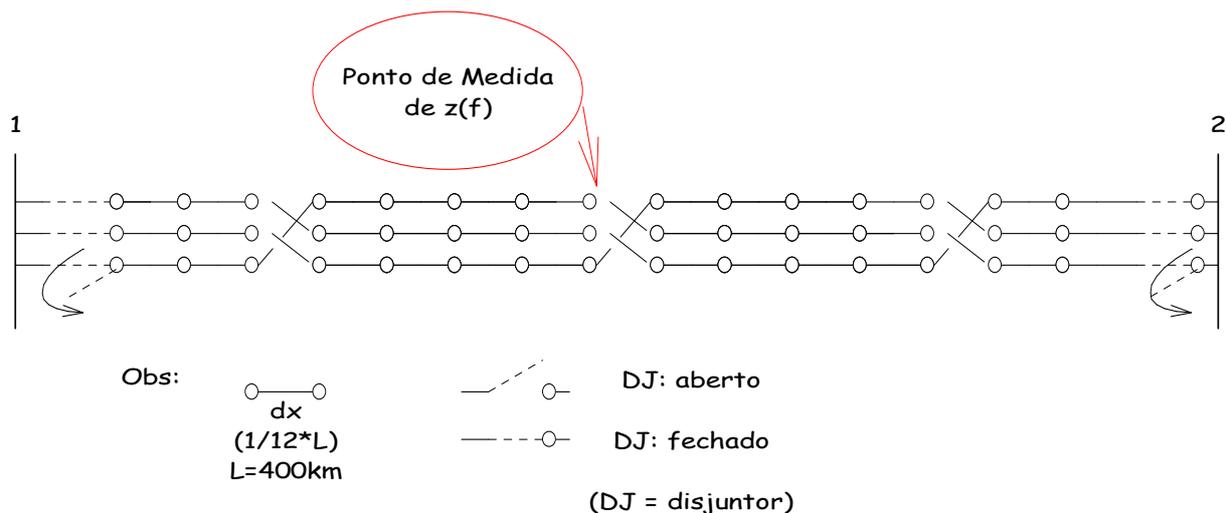
$Z [60 \text{ Hz }] = 20,3162 - i 7,29008 \text{ i}\Omega$

Com disjuntor da extremidade 1 fechado nas três fases, e disjuntor da extremidade 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases.

$Z [60 \text{ Hz }] = 14,7363 - i 39,3919 \Omega$

Com disjuntores das extremidades 1 e 2 abertos na fase a que se refere o valor de Z , e fechados nas outras duas fases

$Z [60 \text{ Hz }] = 6331,42 - i 33781,7 \Omega$



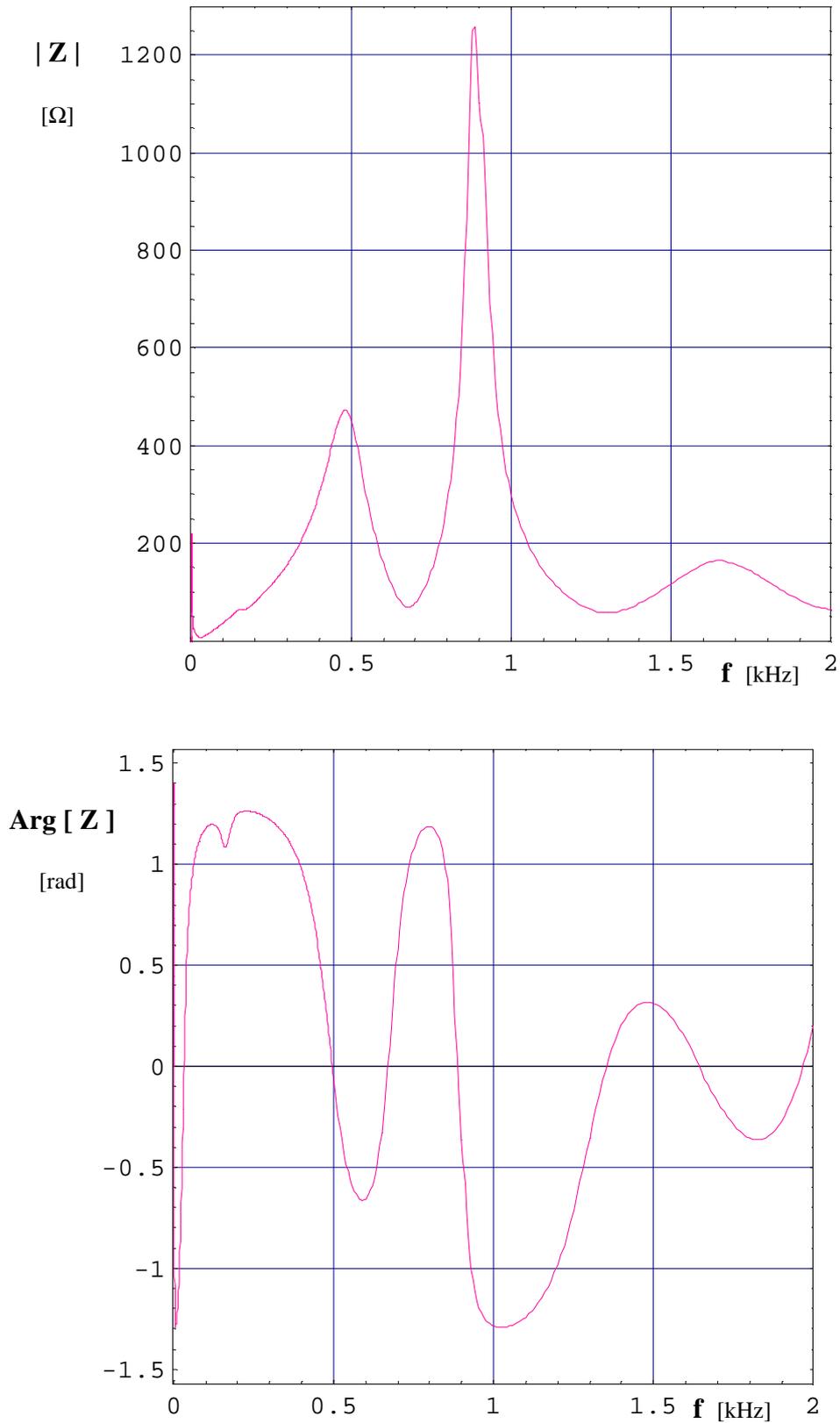


Fig. 1 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

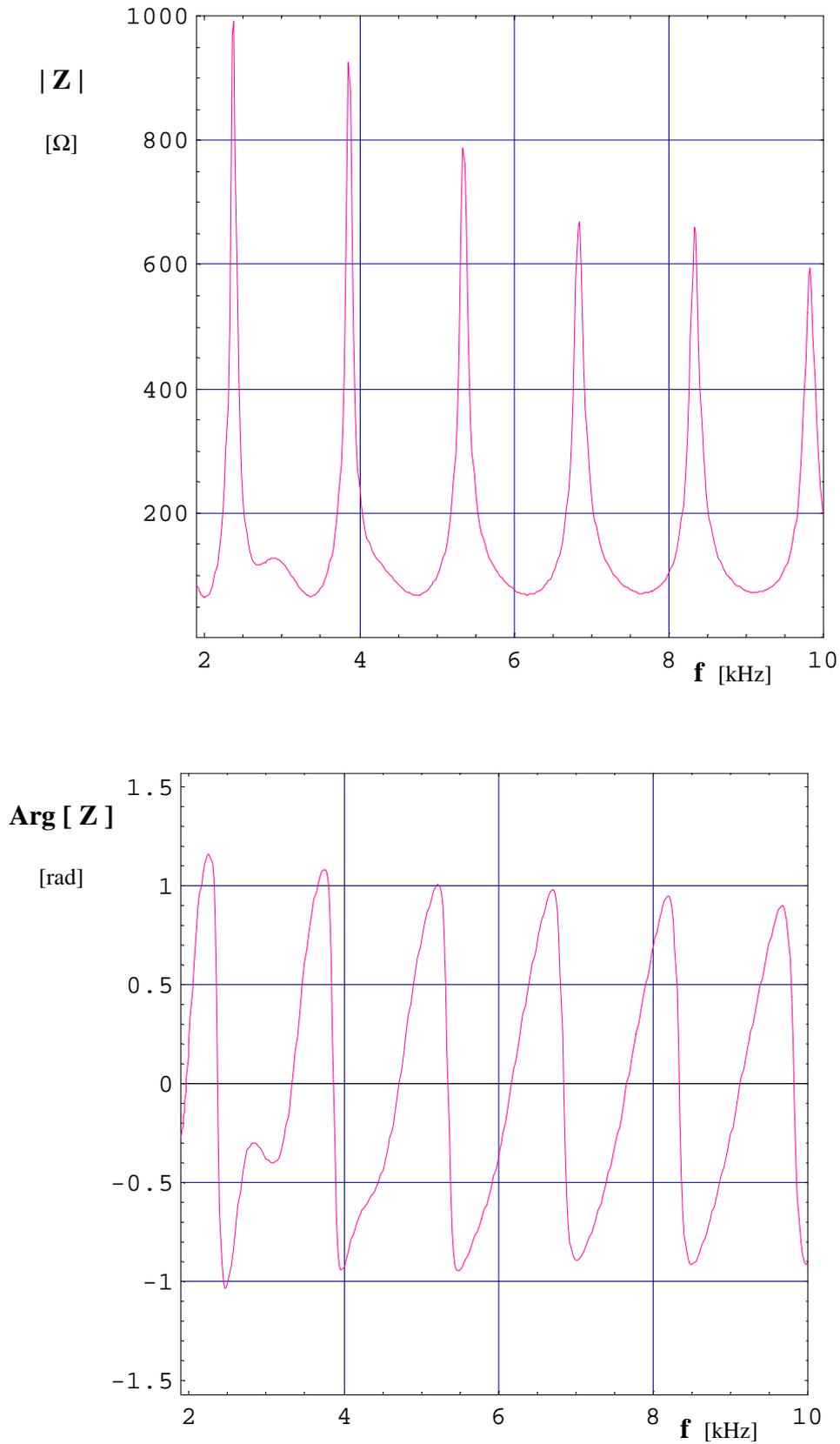


Fig. 2 - Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

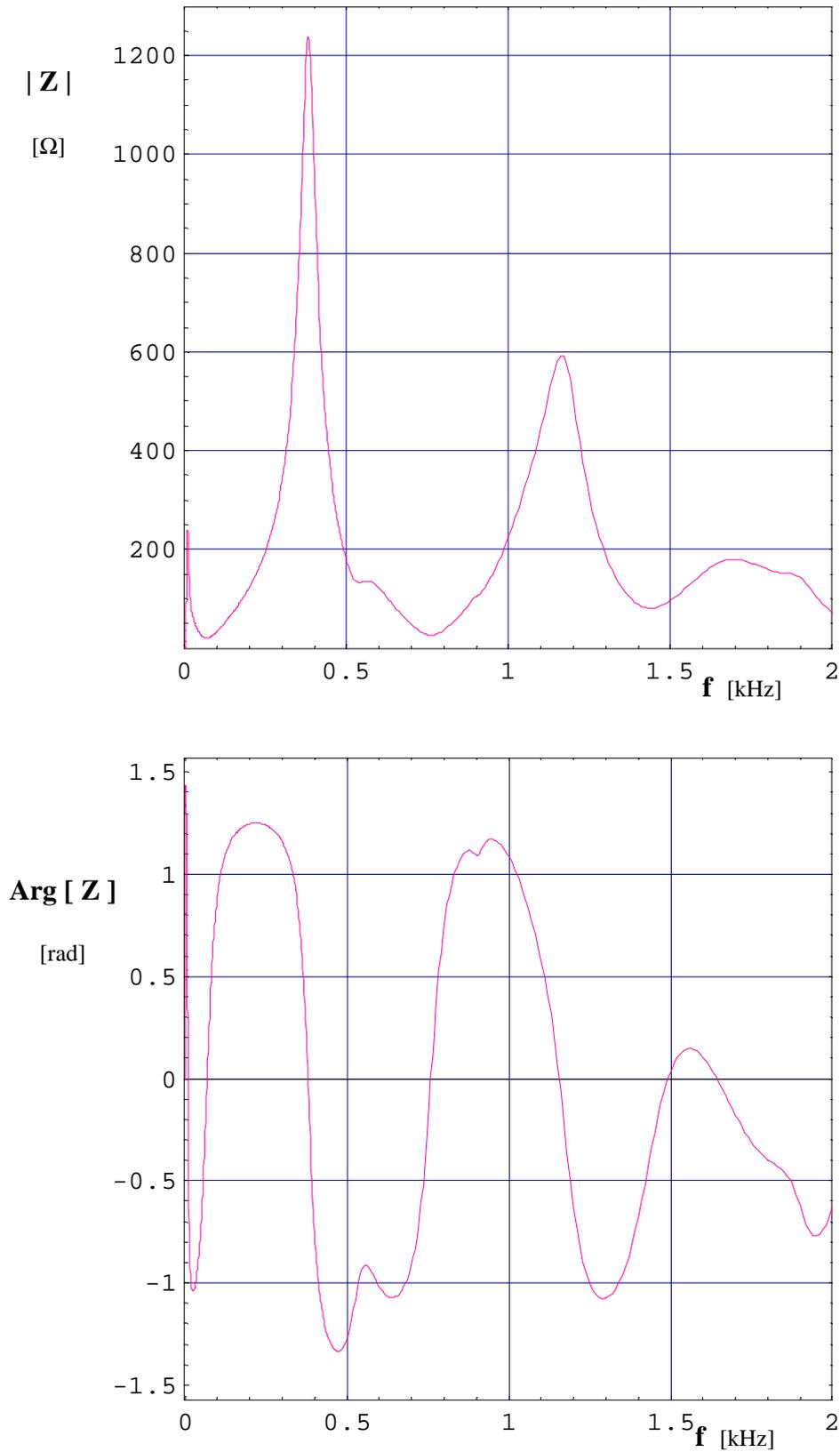


Fig. 3 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

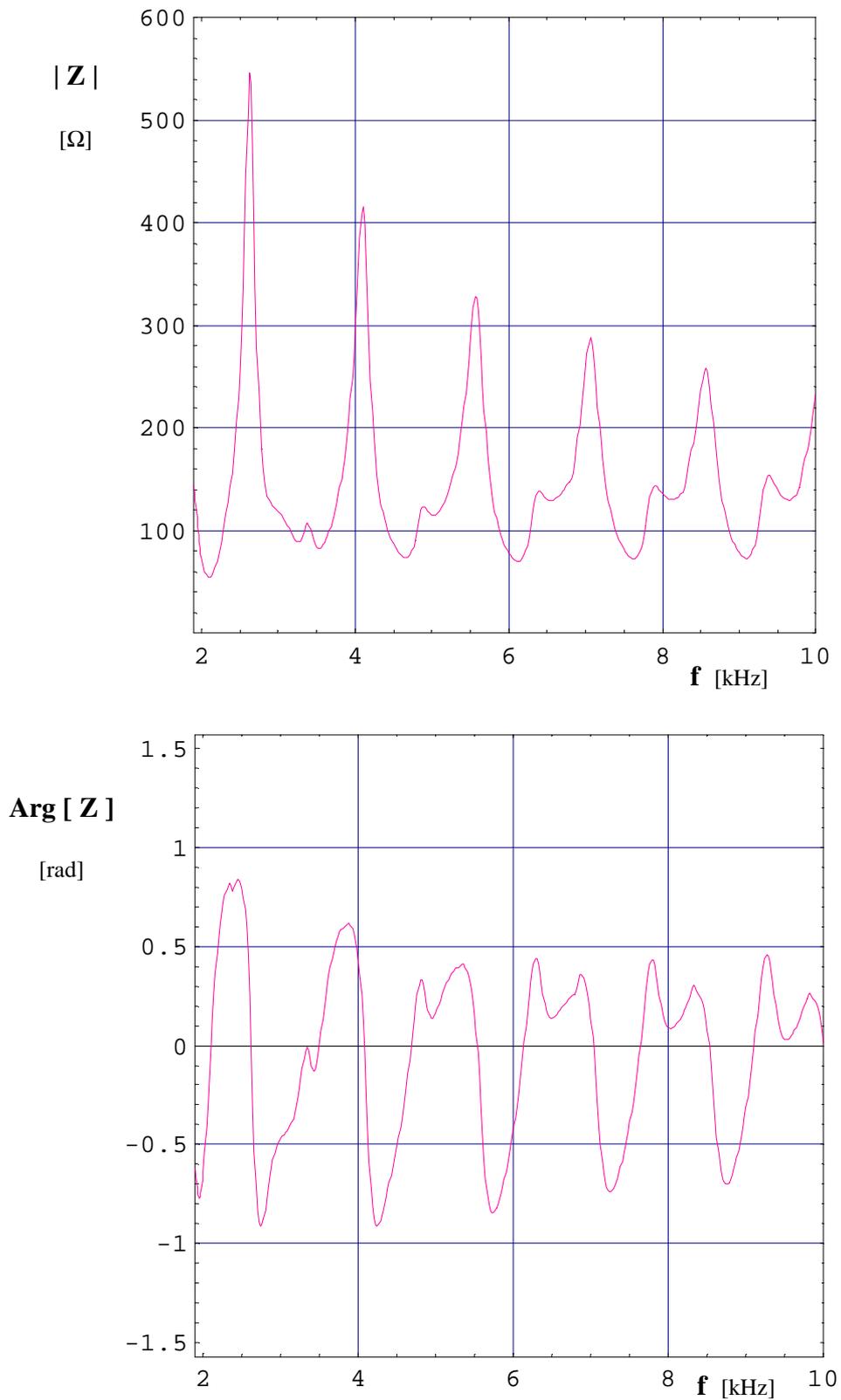


Fig. 4 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

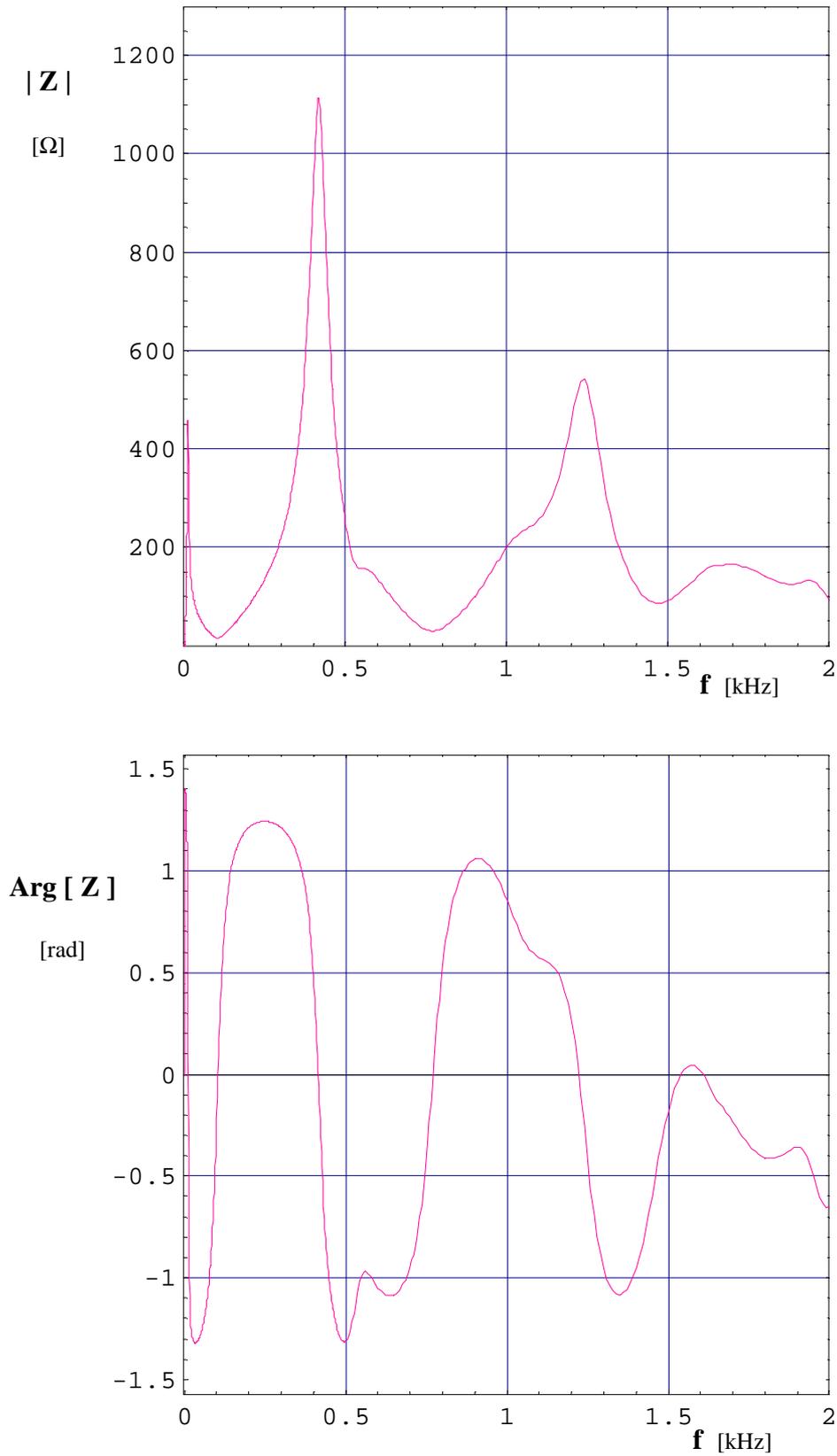


Fig. 5 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

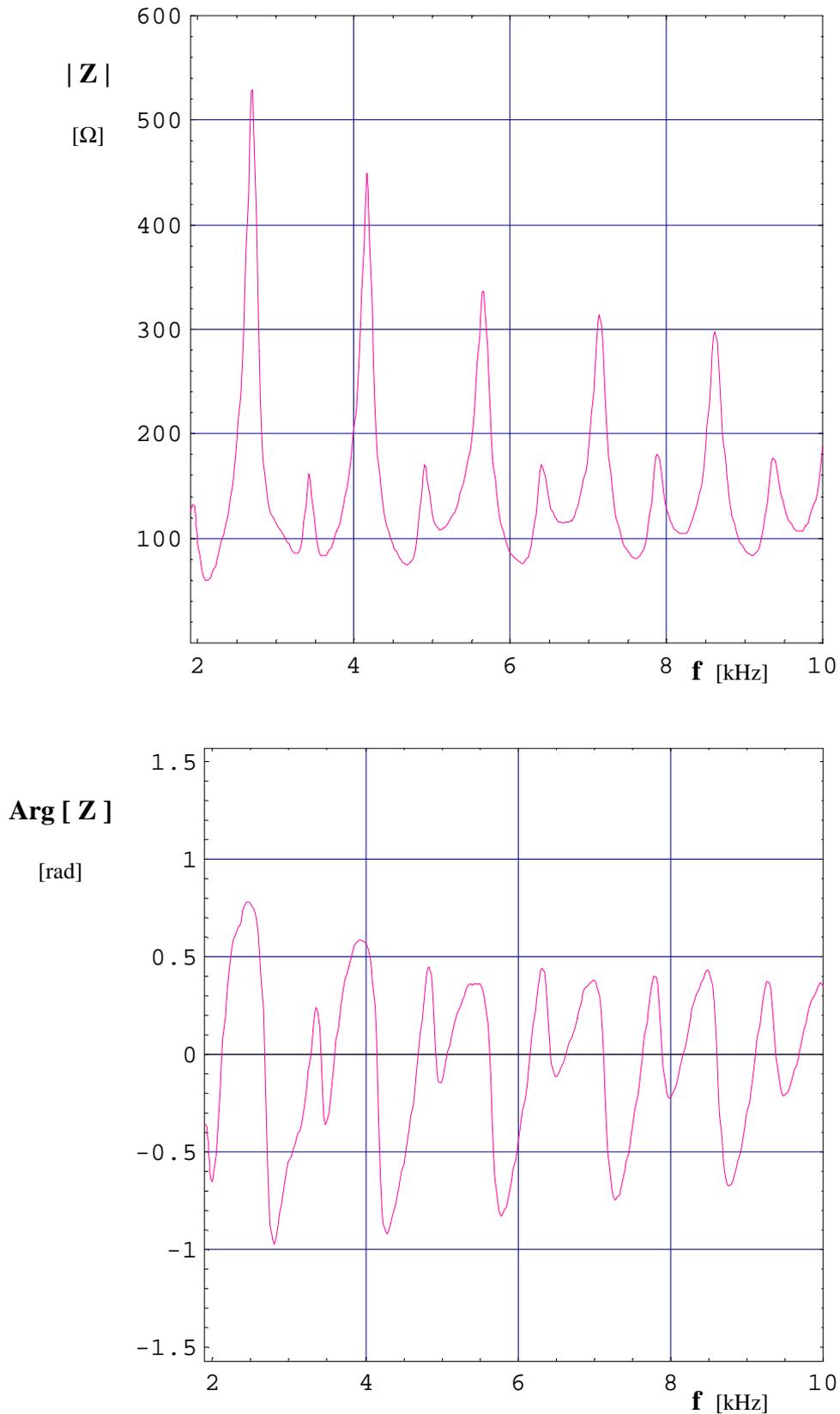


Fig. 6 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

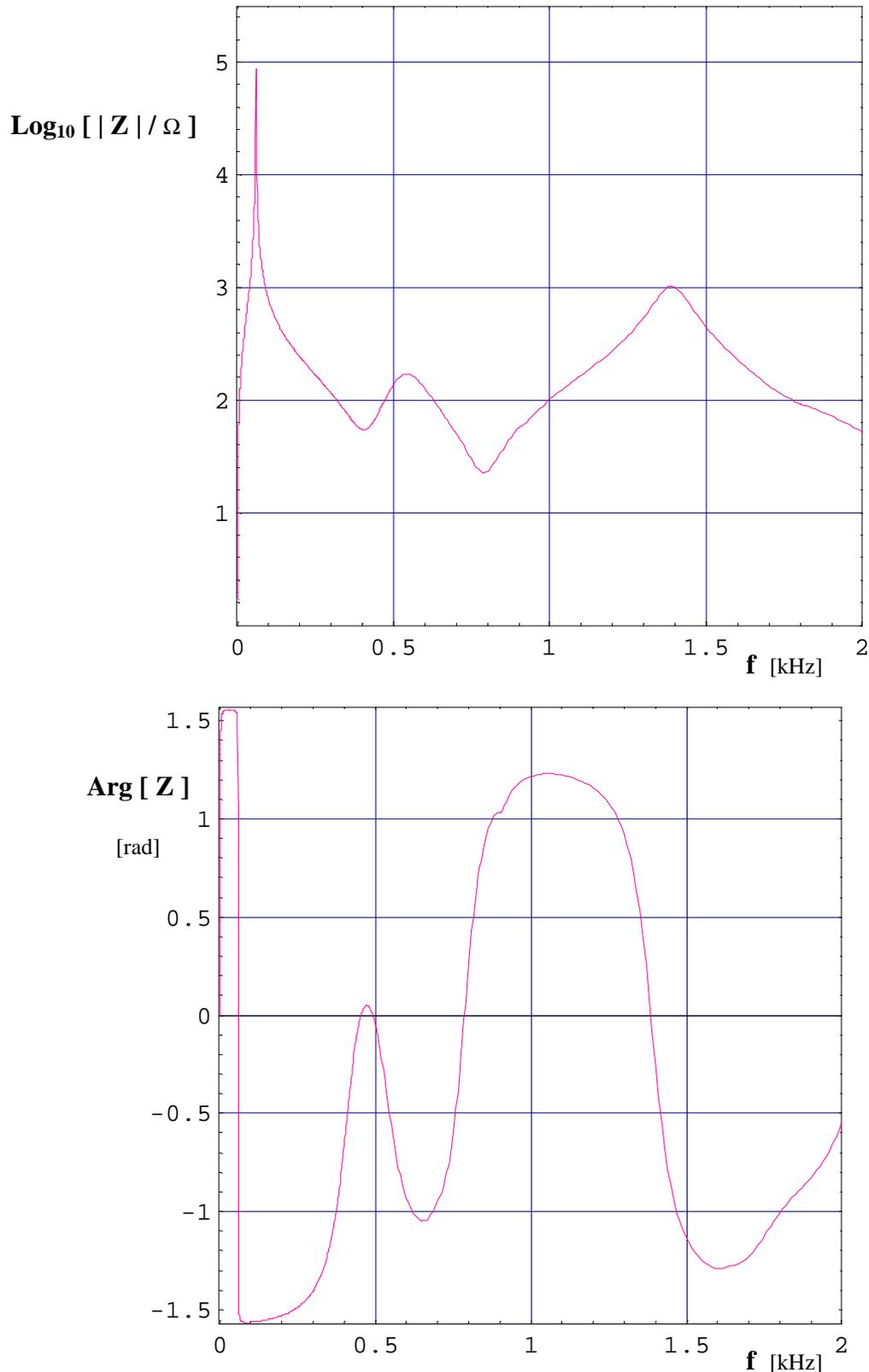


Fig. 7 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz]. Escala logarítmica de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

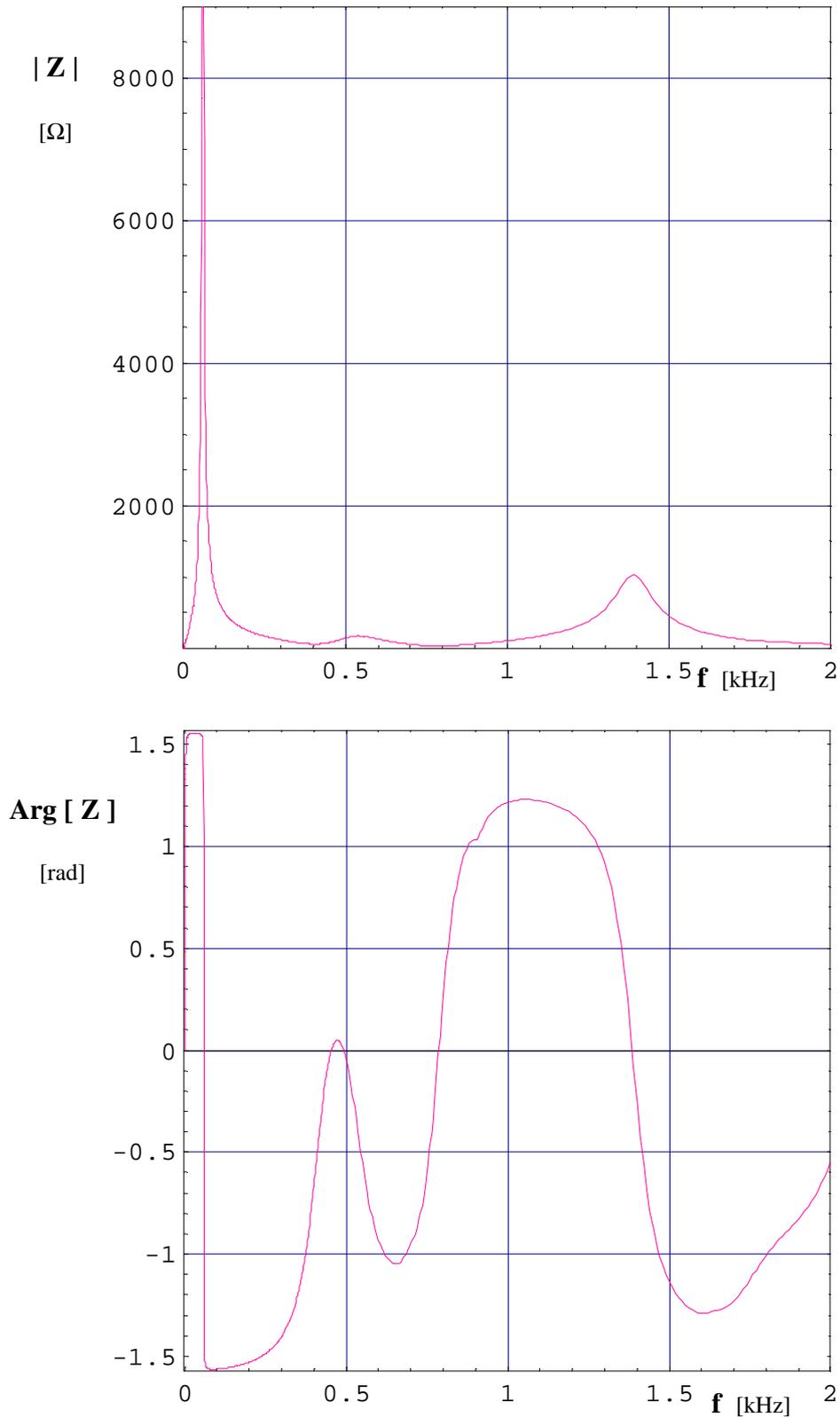


Fig. 8 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala linear de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

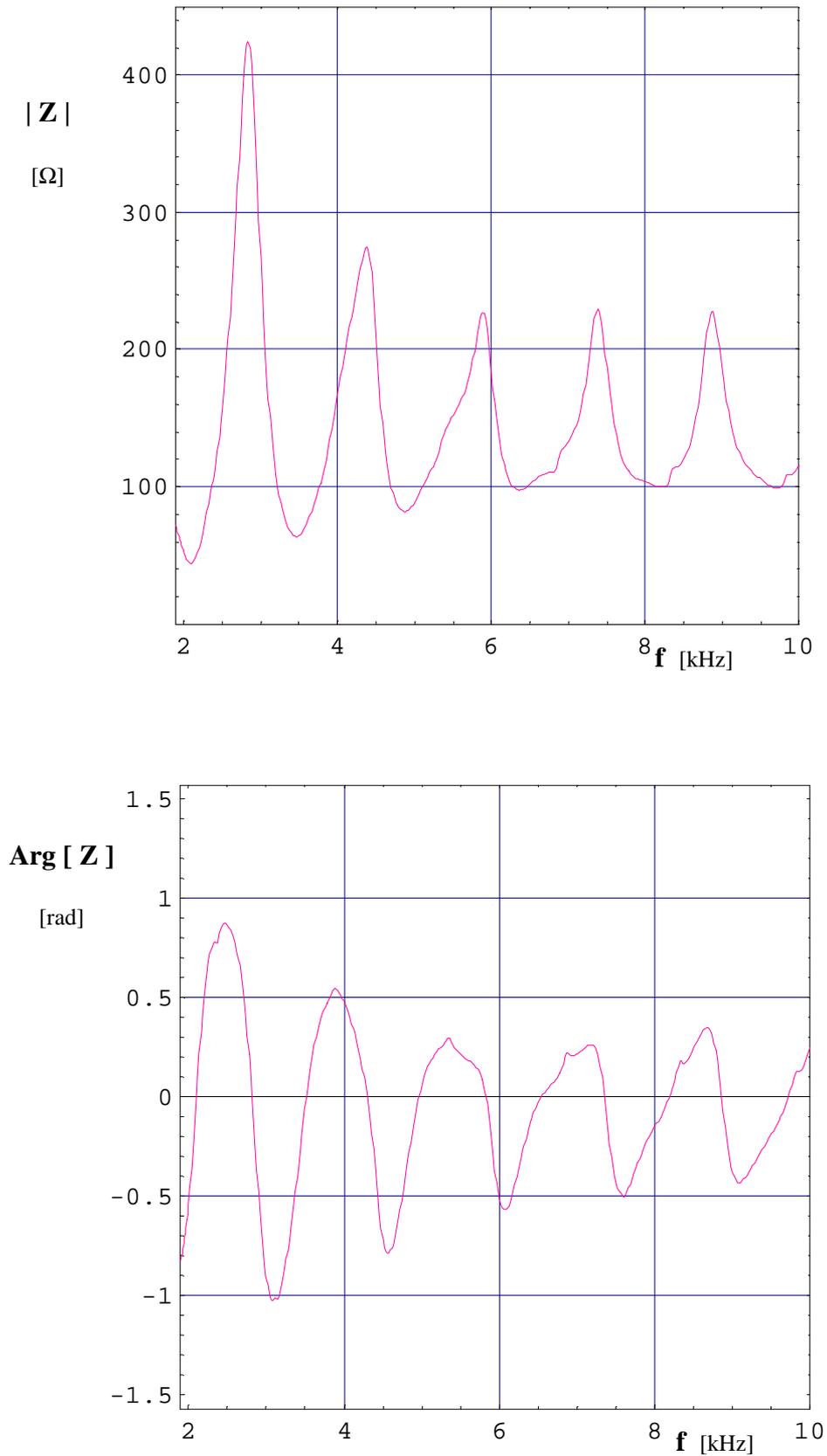


Fig. 9 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases

Impedância medida num ponto a 267 km do terminal 1

Linha LNC 1

L = 400 km

L₁ = 267 km

Com 52% de compensação em derivação, distribuída igualmente entre as duas extremidades da LT, com reatores de neutro de 800 Ω, e sem compensação em série .

Com disjuntores das duas extremidades fechados nas três fases

$$Z [60 \text{ Hz }] = 8,53844 + i 12,6372 \ \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e disjuntor da extremidade 2 fechado nas outras duas fases

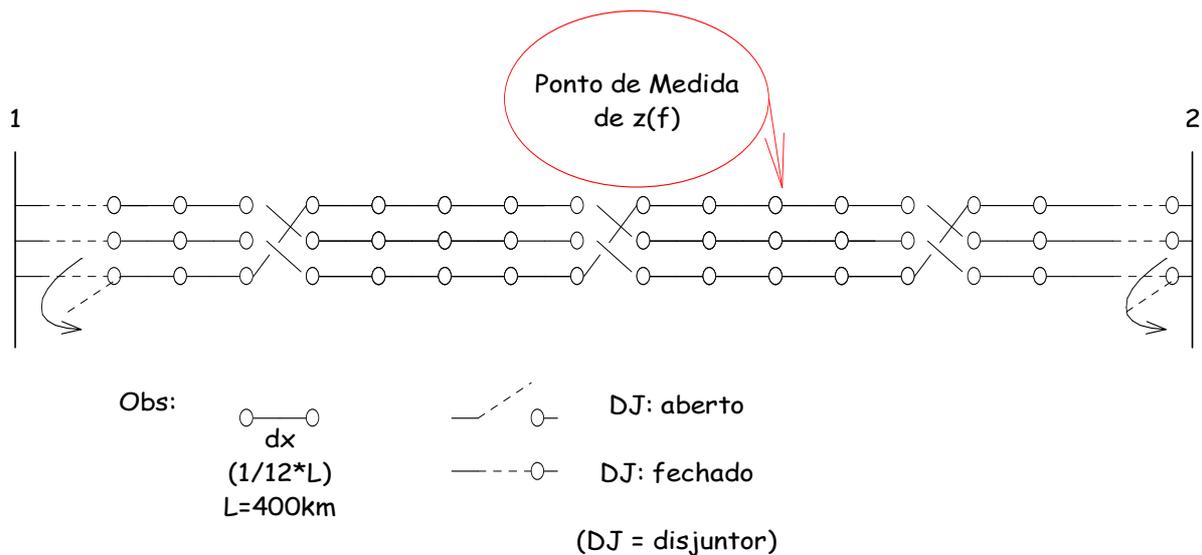
$$Z [60 \text{ Hz }] = 17,2903 - i 11,2322 \ \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 fechado nas três fases, e disjuntor da extremidade 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 16,4909 - i 37,8778 \ \Omega$$

Com disjuntores das extremidades 1 e 2 abertos na fase a que se refere o valor de Z , e fechados nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 6199,68 - i 32633,8 \ \Omega$$



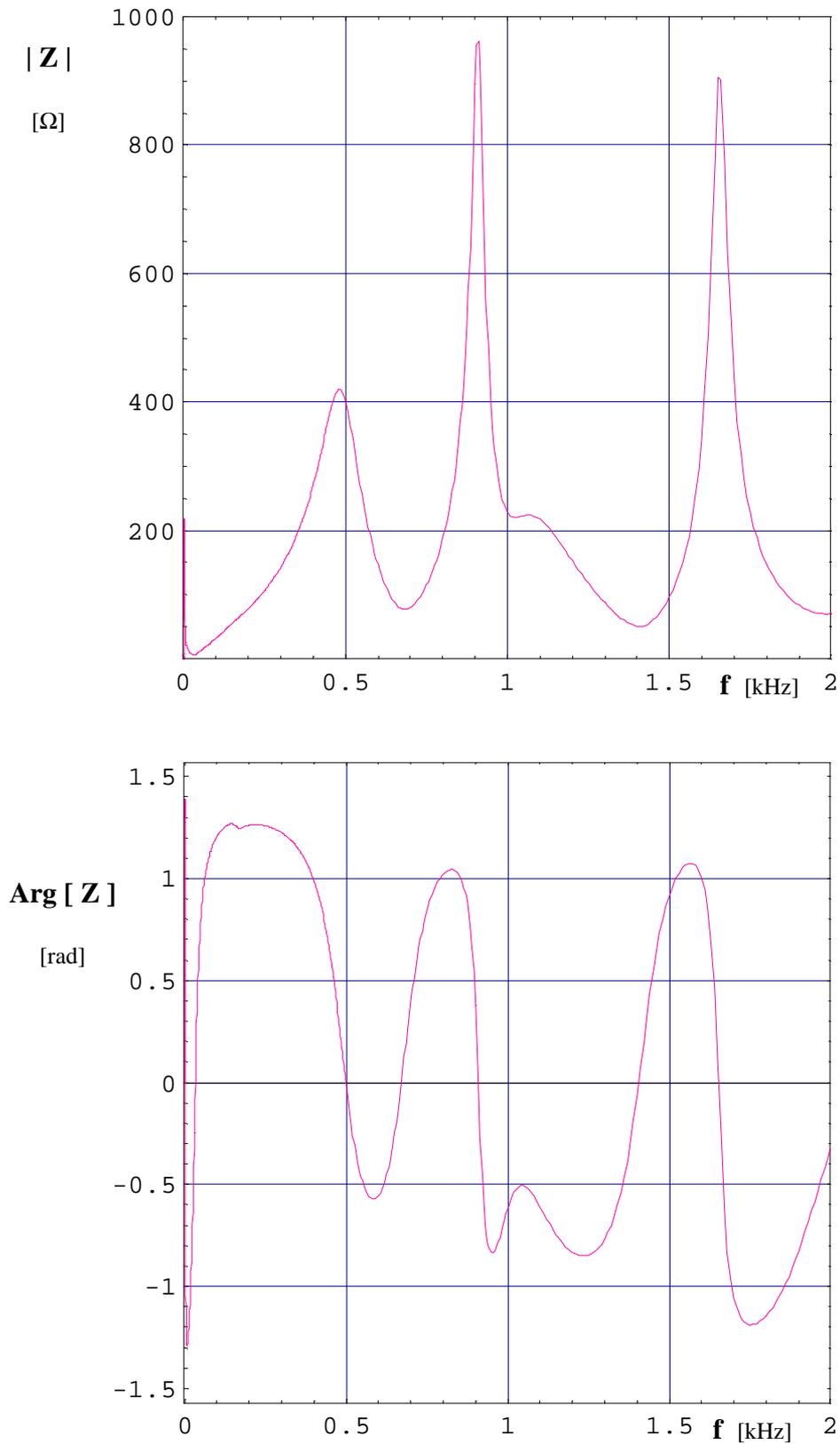


Fig. 1 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0,2kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

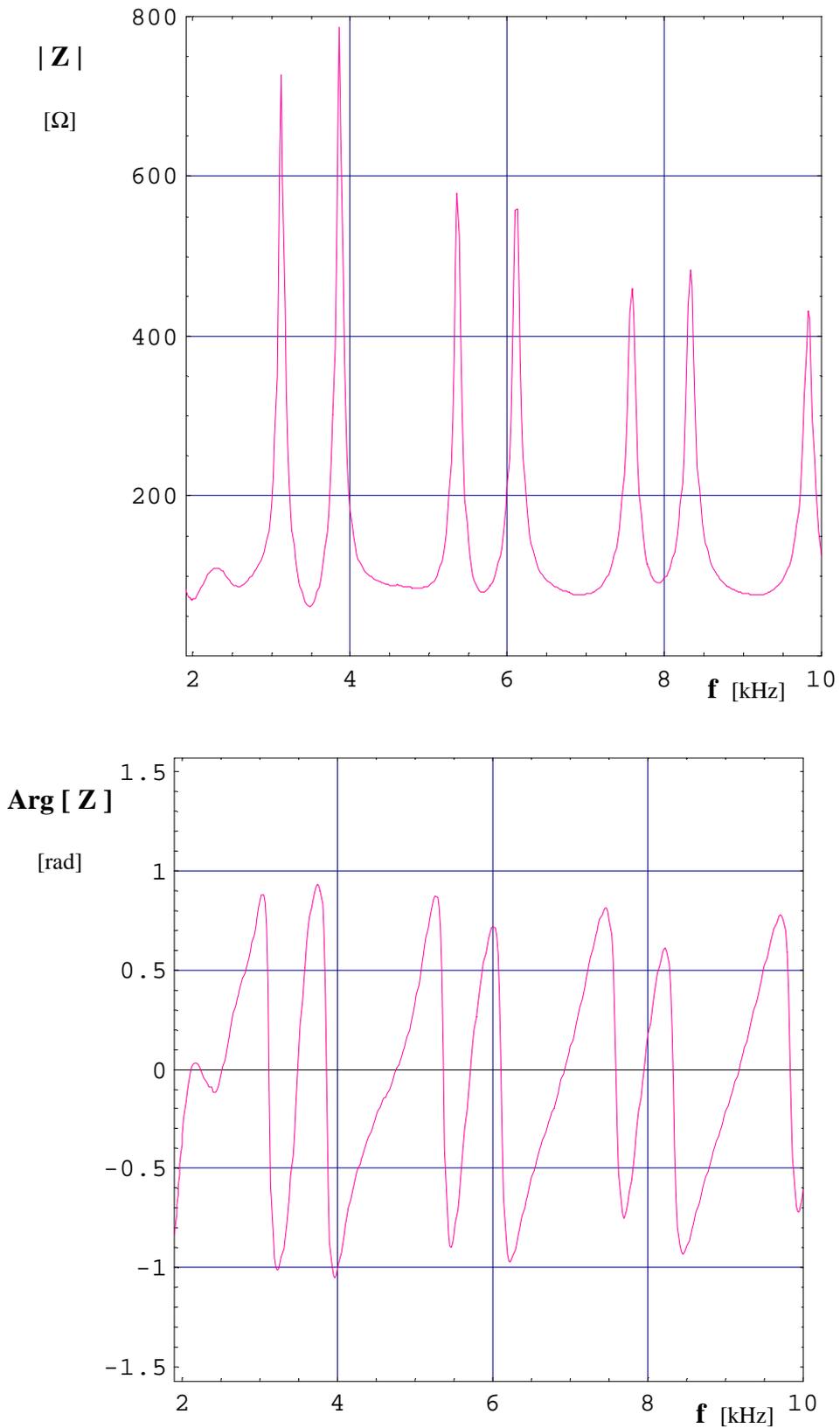


Fig. 2 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

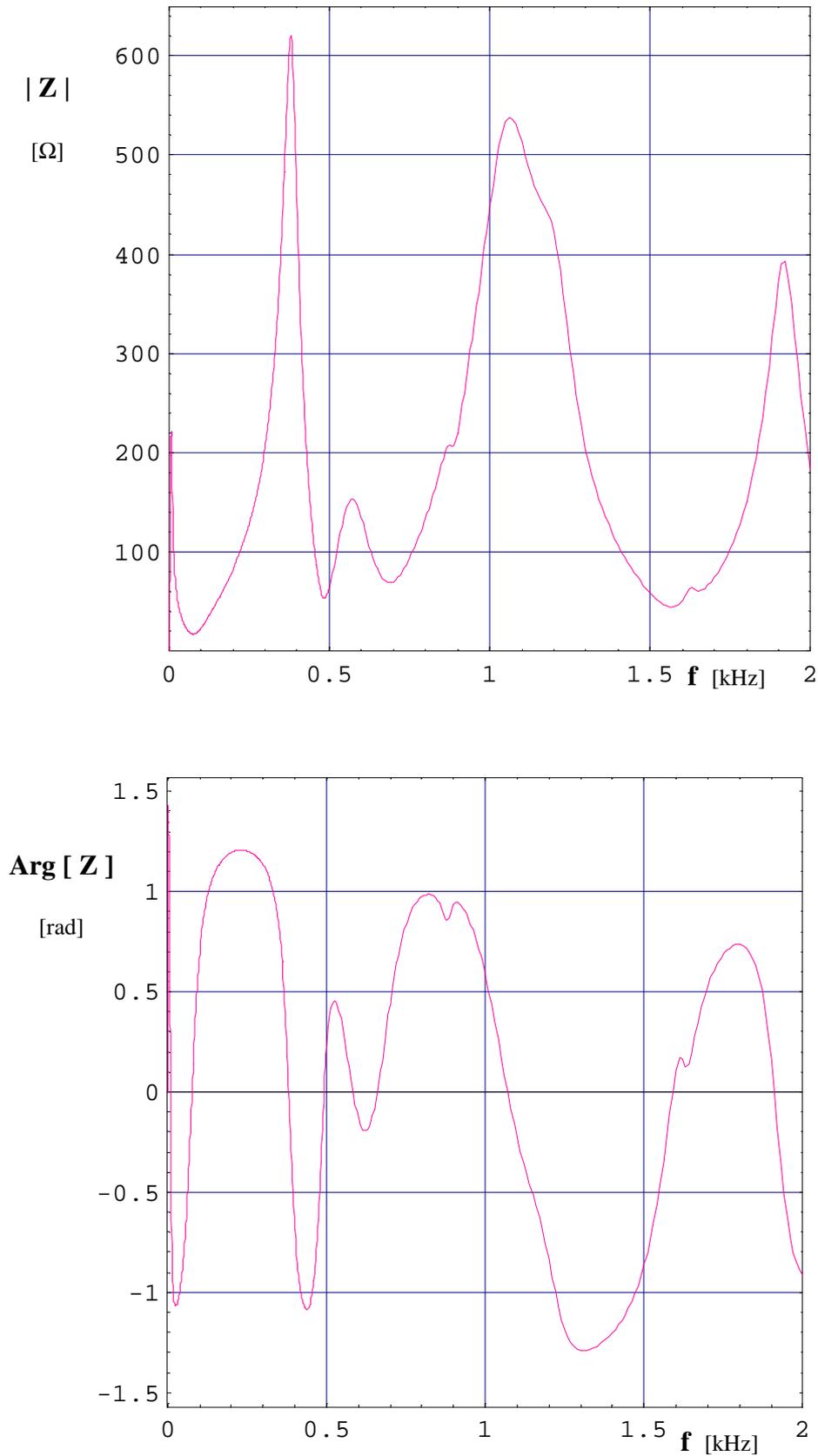


Fig. 3 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] .Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

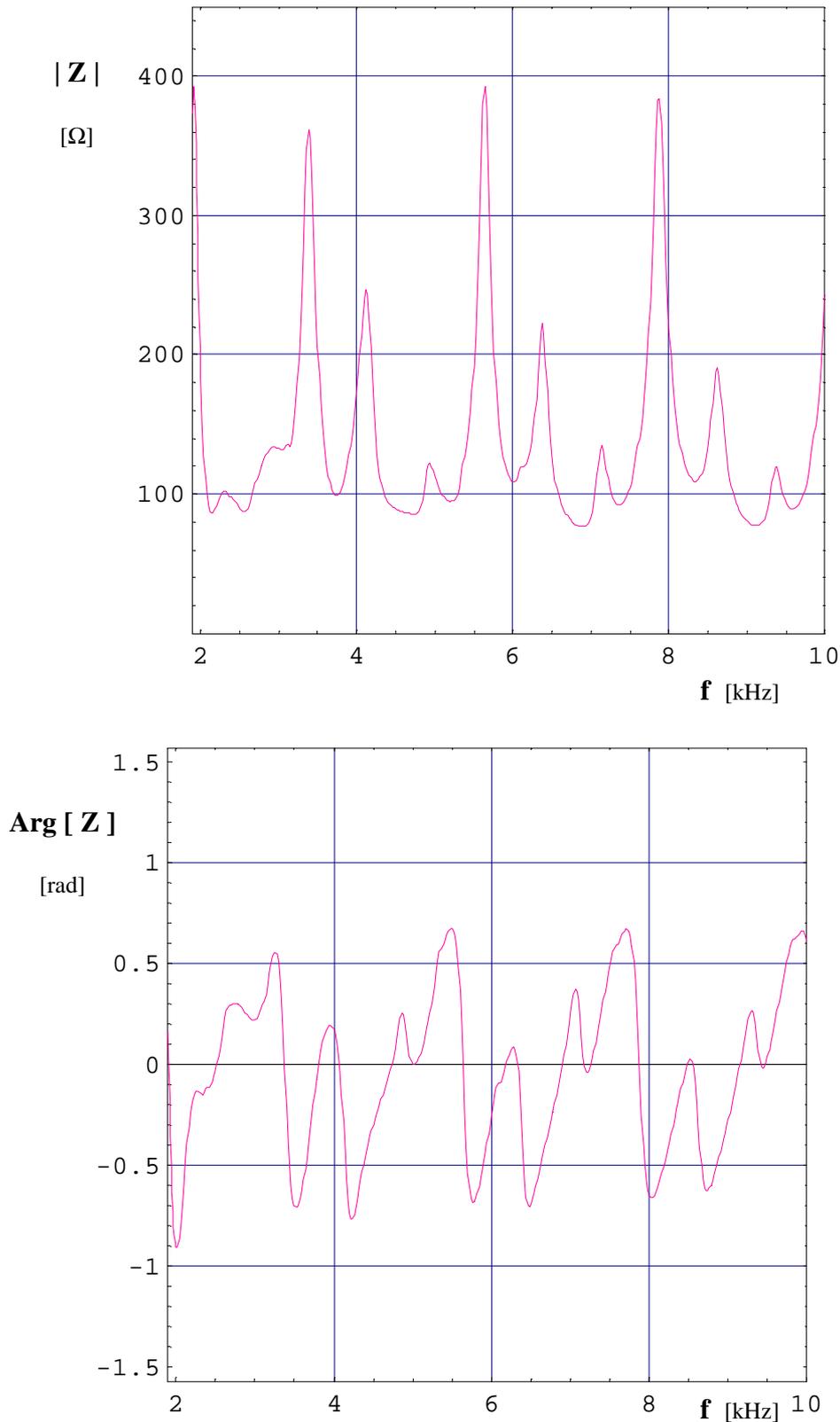


Fig. 4 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

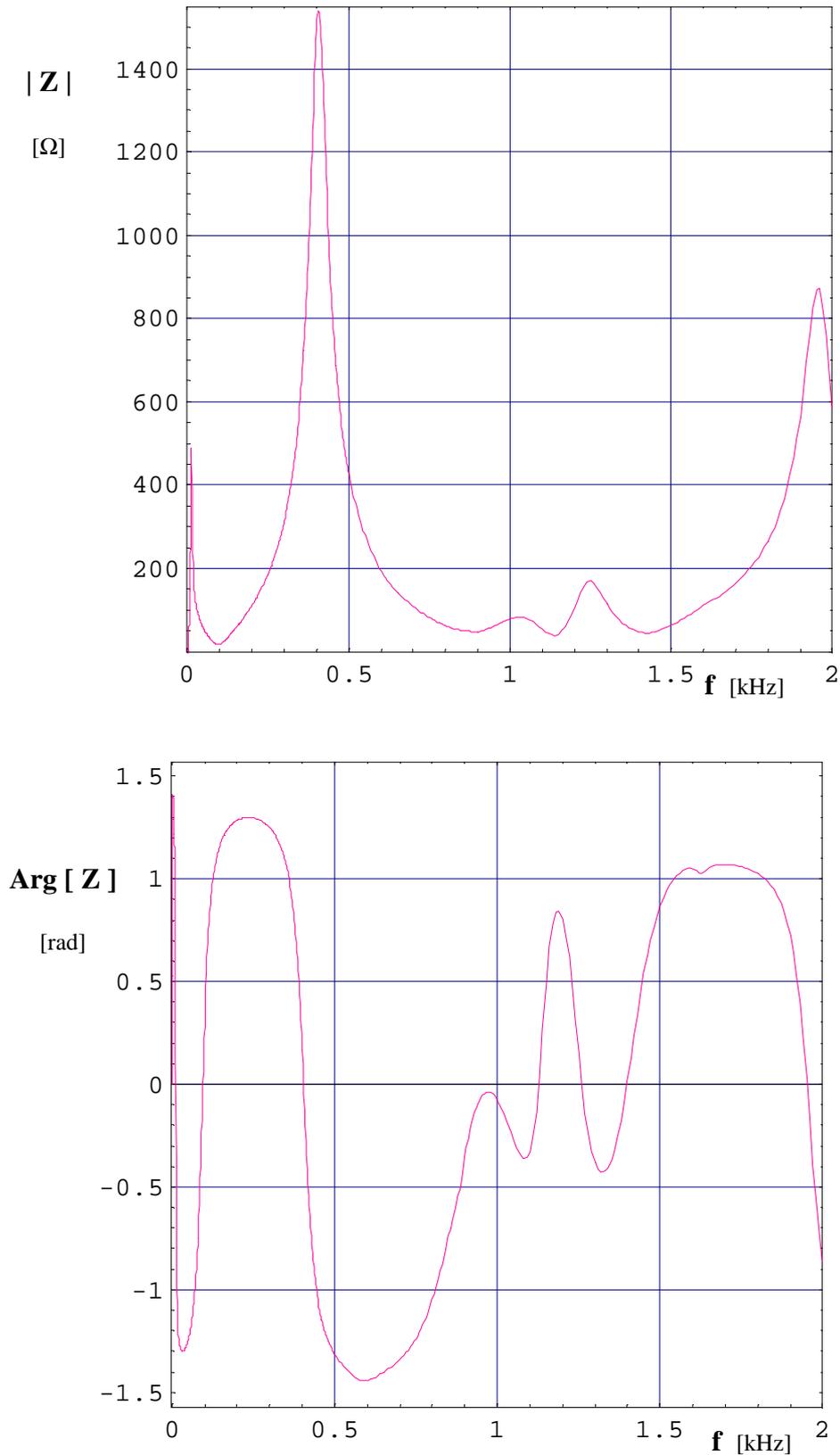


Fig. 5 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] .Disjuntor do terminal 1 fechado. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. nas três fases.

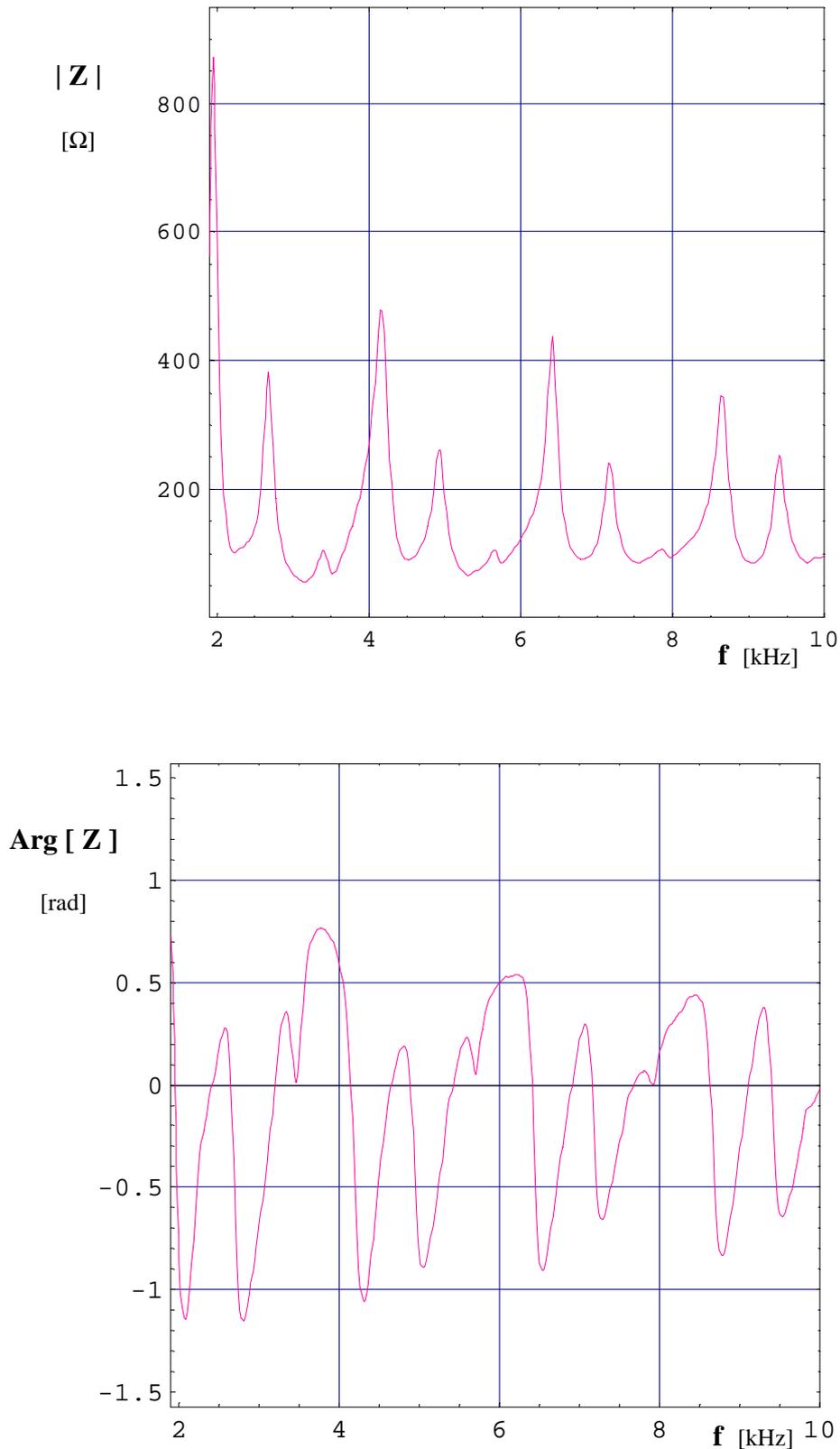


Fig. 6 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

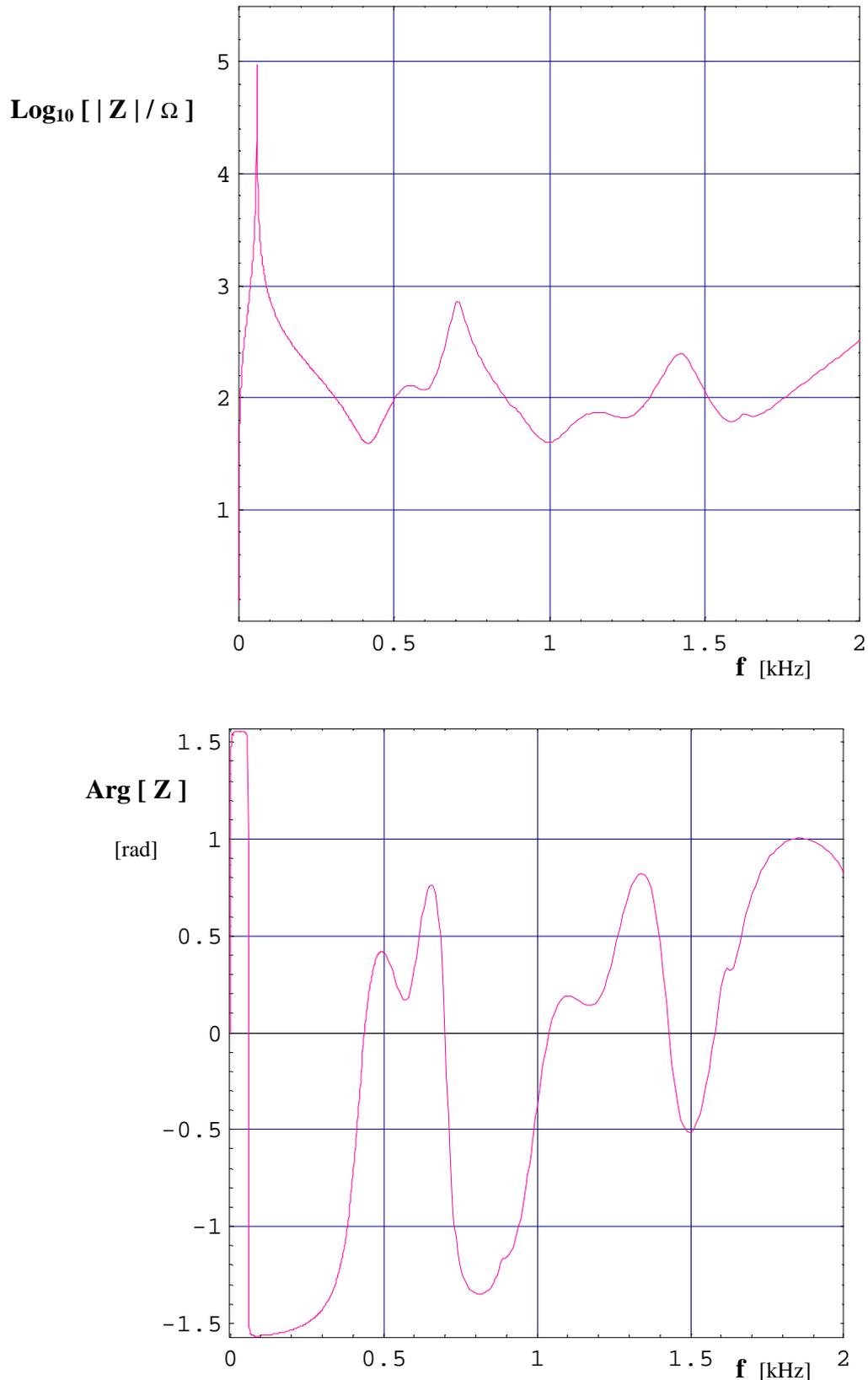


Fig. 7 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala logarítmica de $| Z |$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

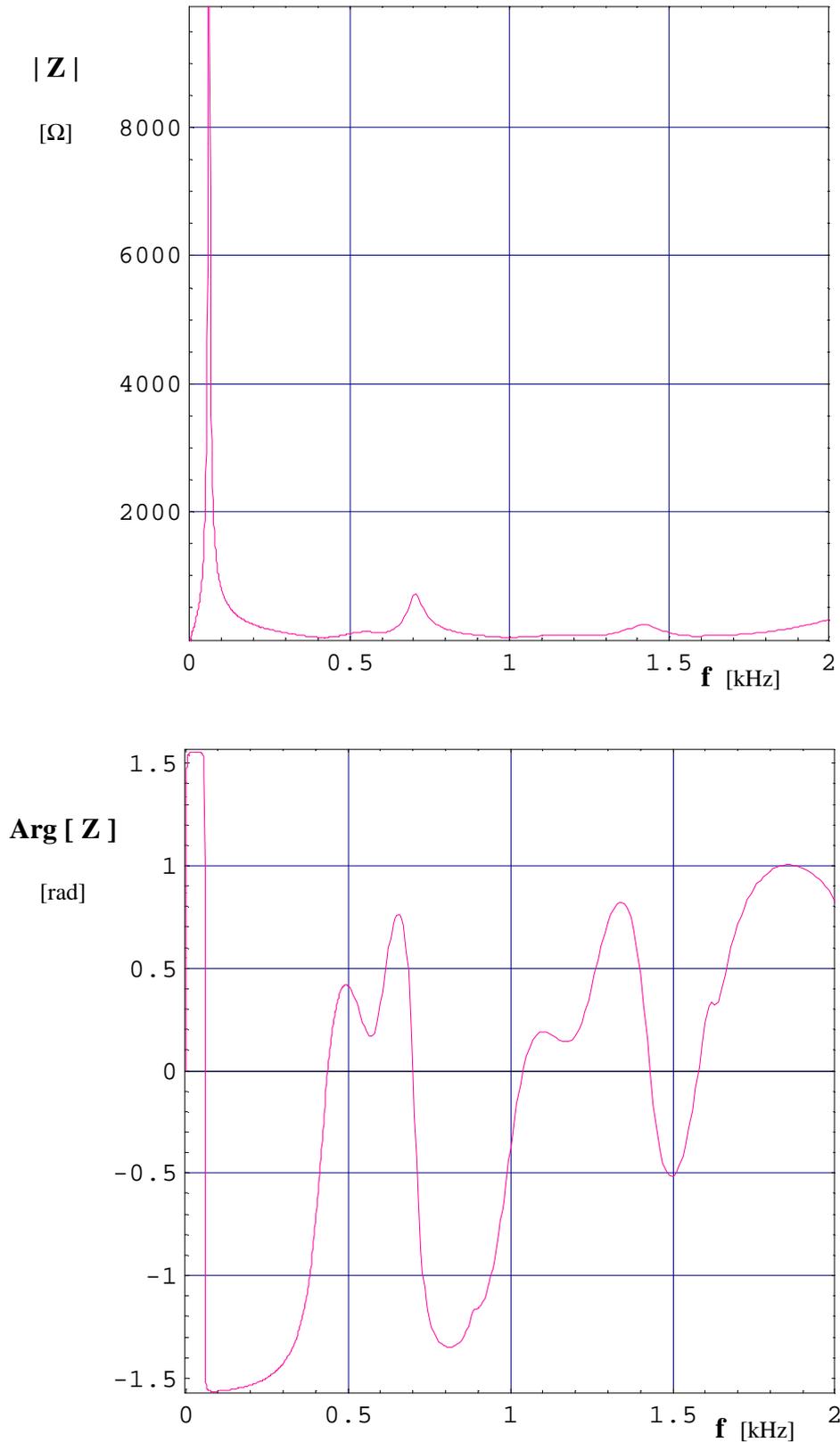


Fig. 8 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala linear de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

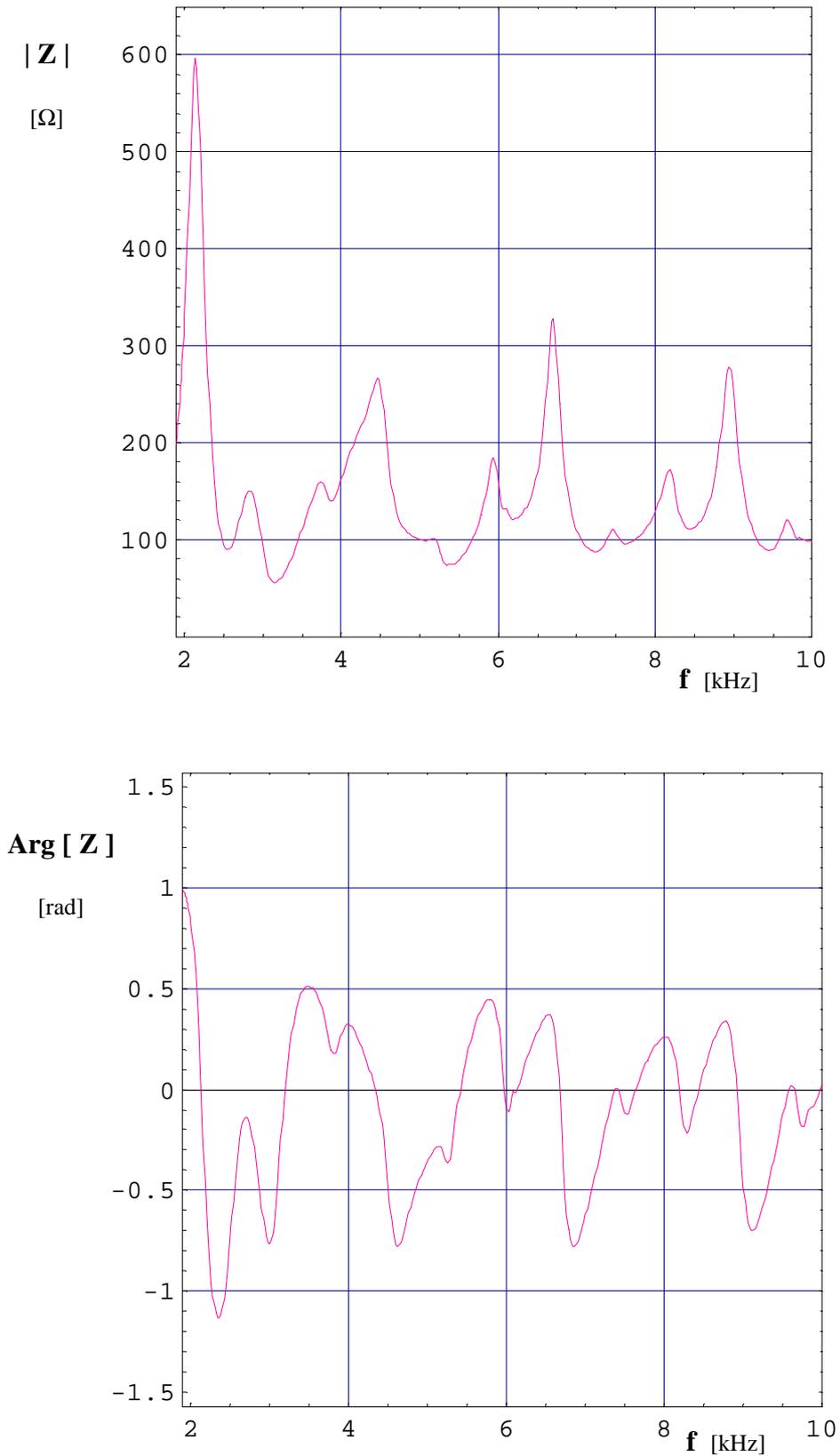


Fig. 9 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

Impedância medida num ponto a 334 km do terminal 1

Linha LNC 1
 $L = 400 \text{ km}$
 $L_1 = 334 \text{ km}$

Com 52% de compensação em derivação, distribuída igualmente entre as duas extremidades da LT, com reatores de neutro de 800Ω , e sem compensação em série .

Com disjuntores das duas extremidades fechados nas três fases

$$Z [60 \text{ Hz }] = 6,438889 + i 7,61669 \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e disjuntor da extremidade 2 fechado nas outras duas fases

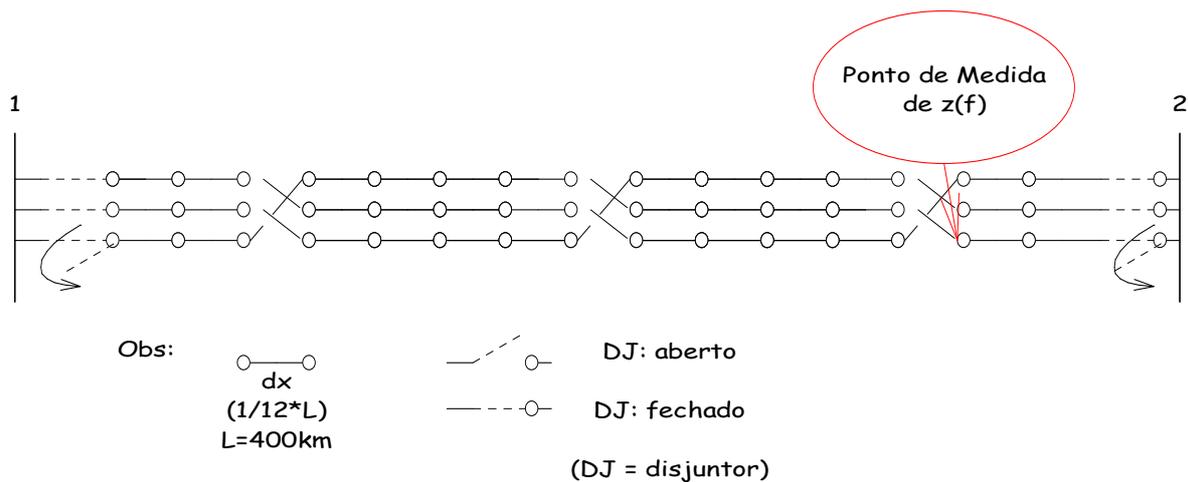
$$Z [60 \text{ Hz }] = 13,237 - i 18,3663 \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 fechado nas três fases, e disjuntor da extremidade 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 17,2576 - i 39,3381 \Omega$$

Com disjuntores das extremidades 1 e 2 abertos na fase a que se refere o valor de Z , e fechados nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 6311,17 - i 33352,4 \Omega$$



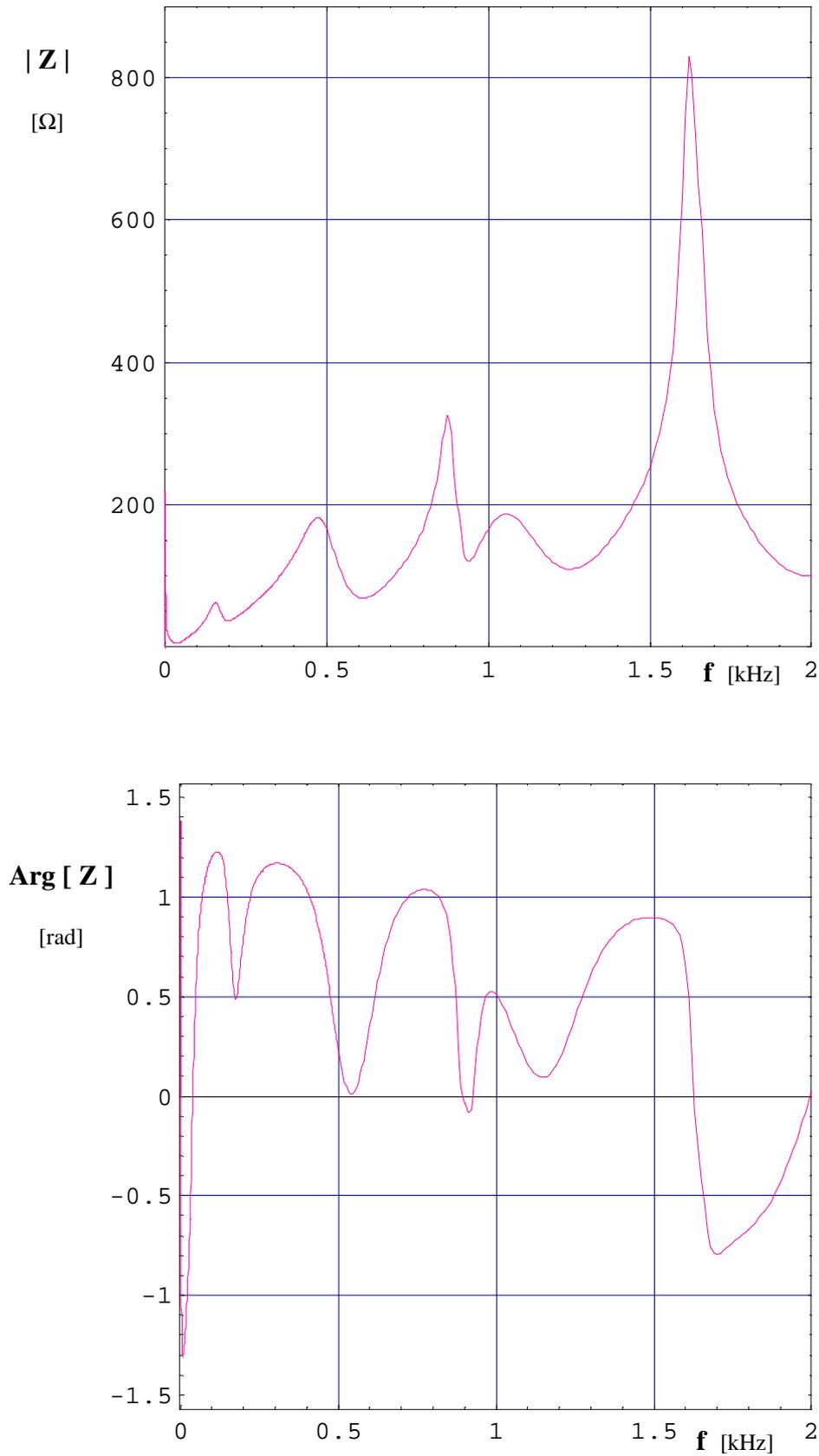


Fig. 1 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

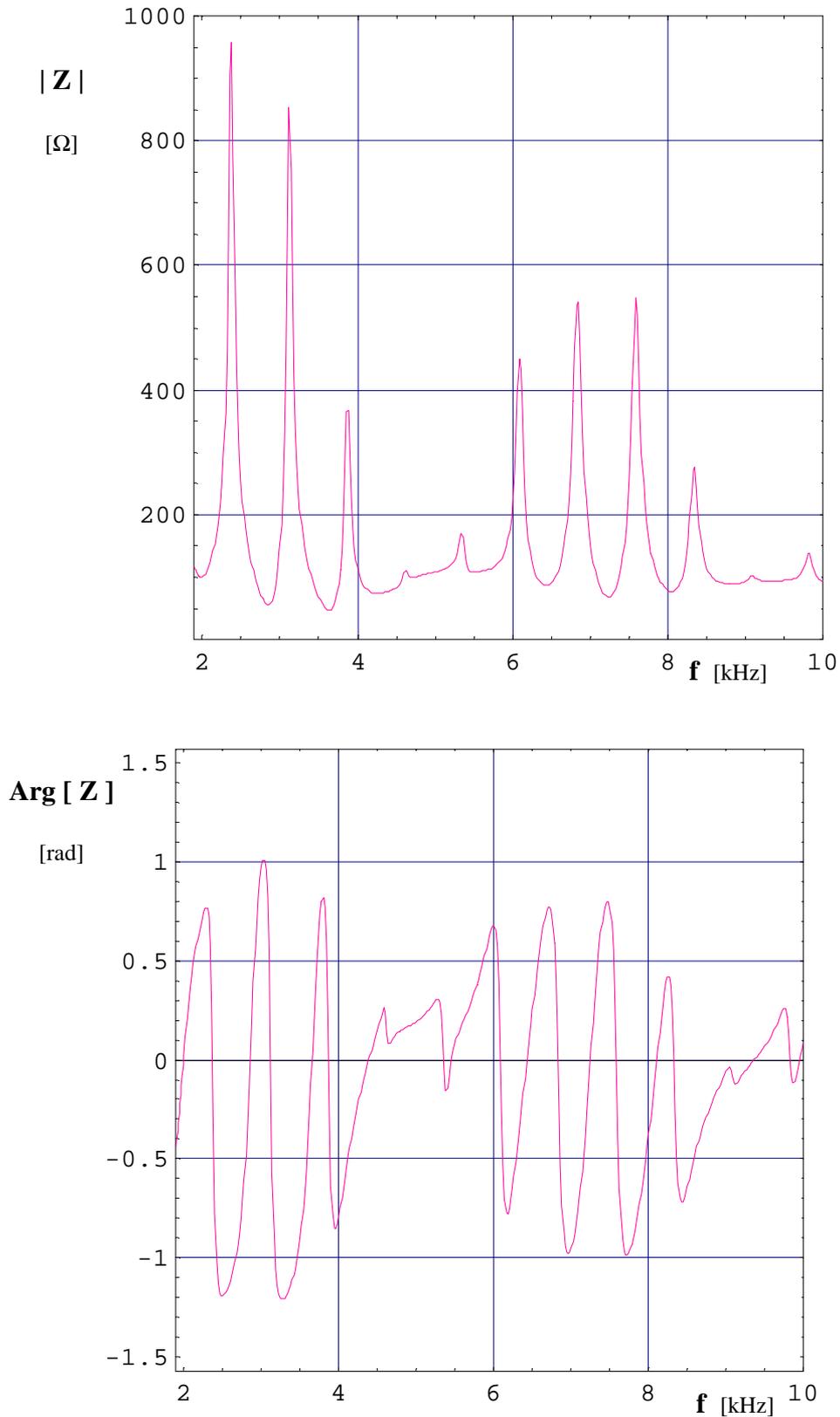


Fig. 2 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

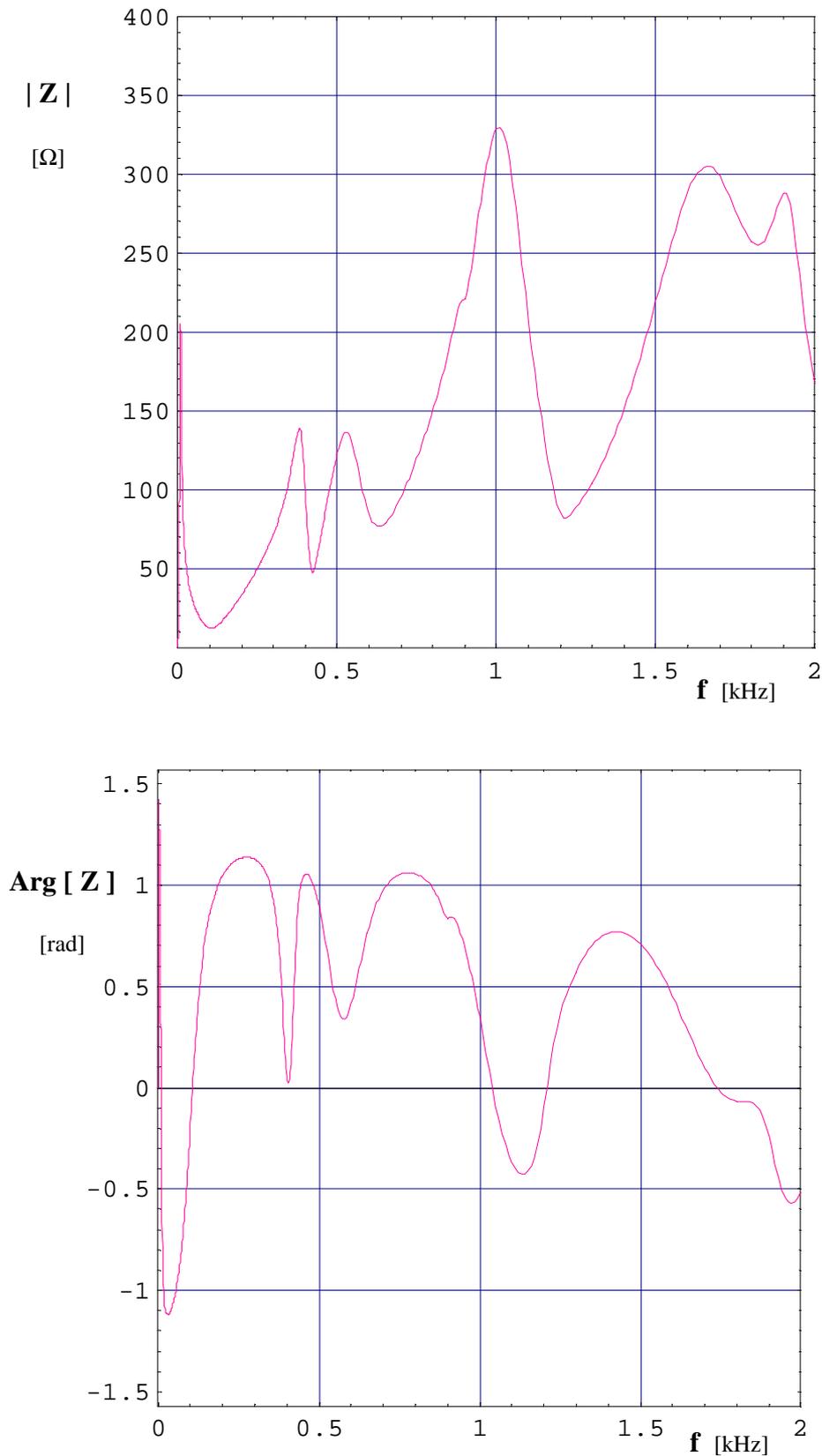


Fig. 3 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

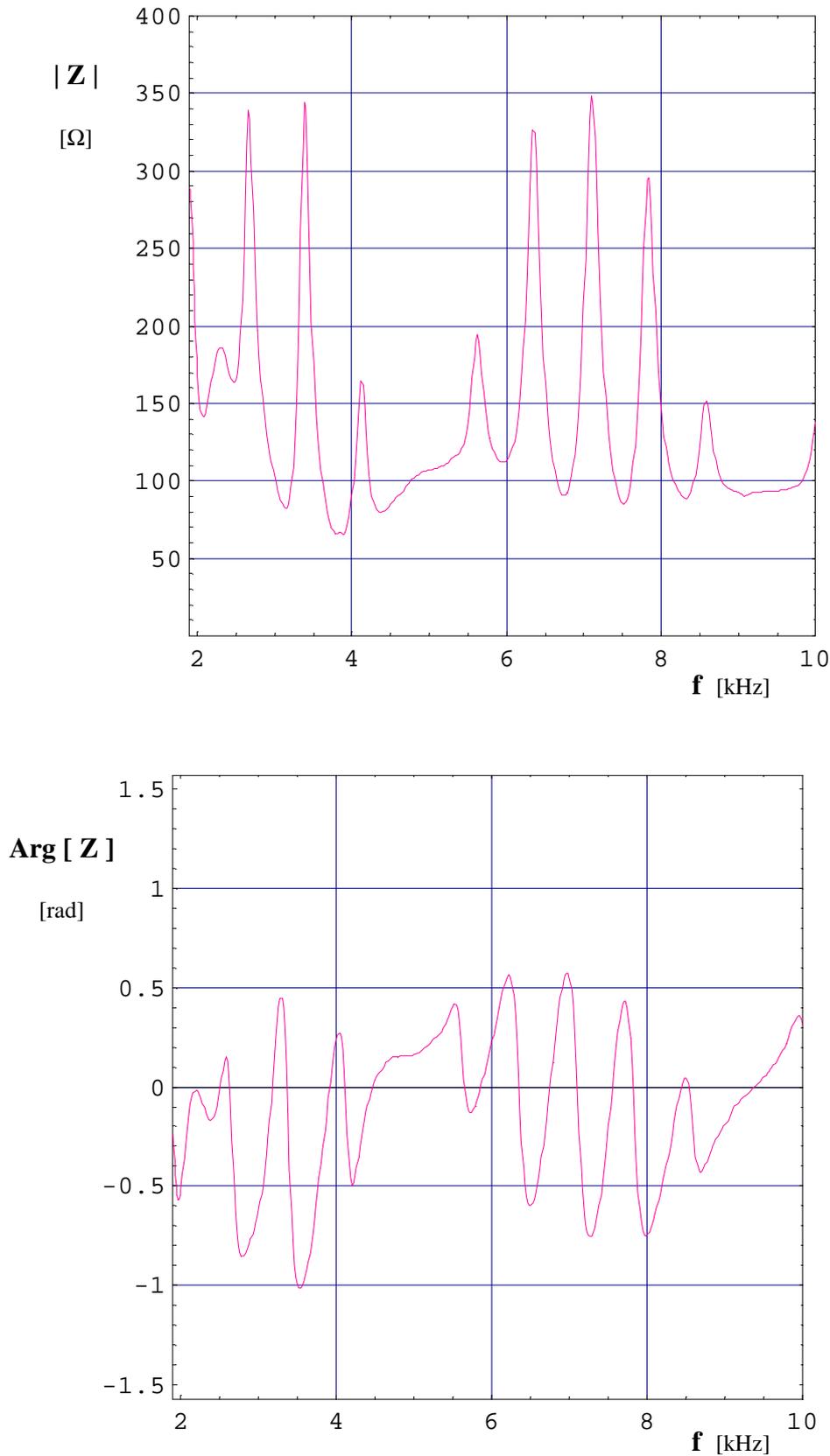


Fig. 4 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

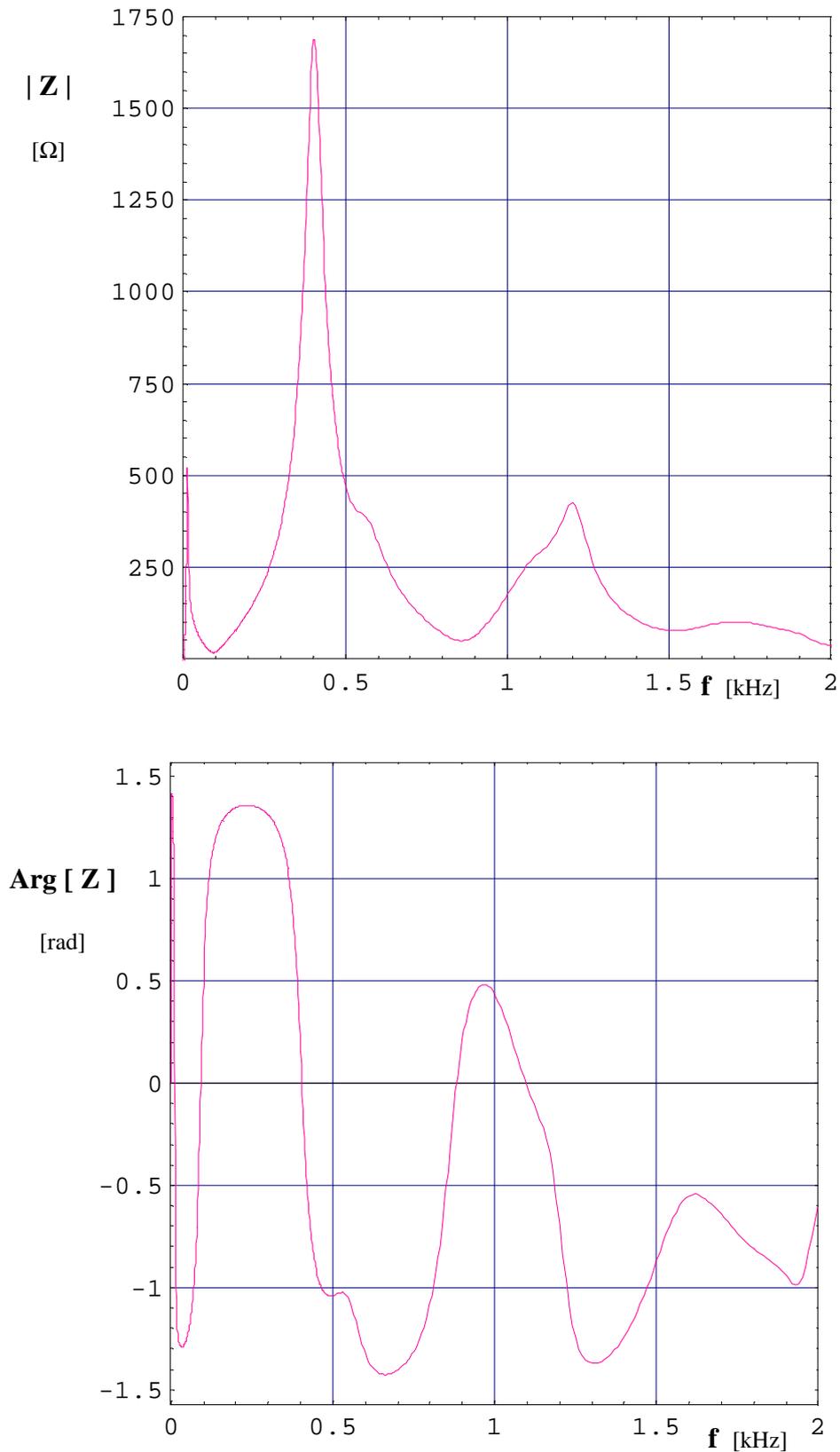


Fig. 5 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] .Disjuntor do terminal 1 fechado. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. nas três fases.

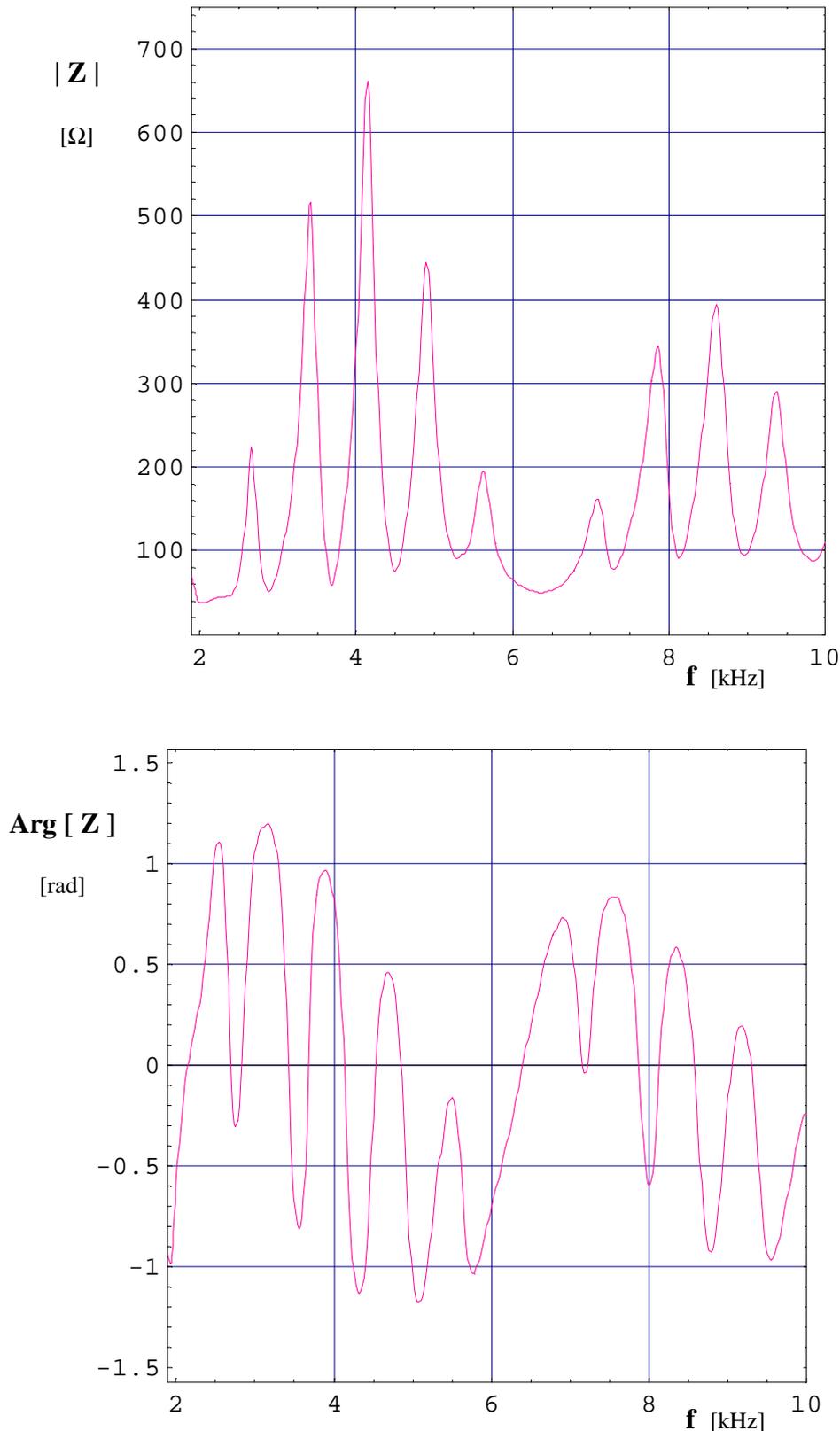


Fig. 6 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

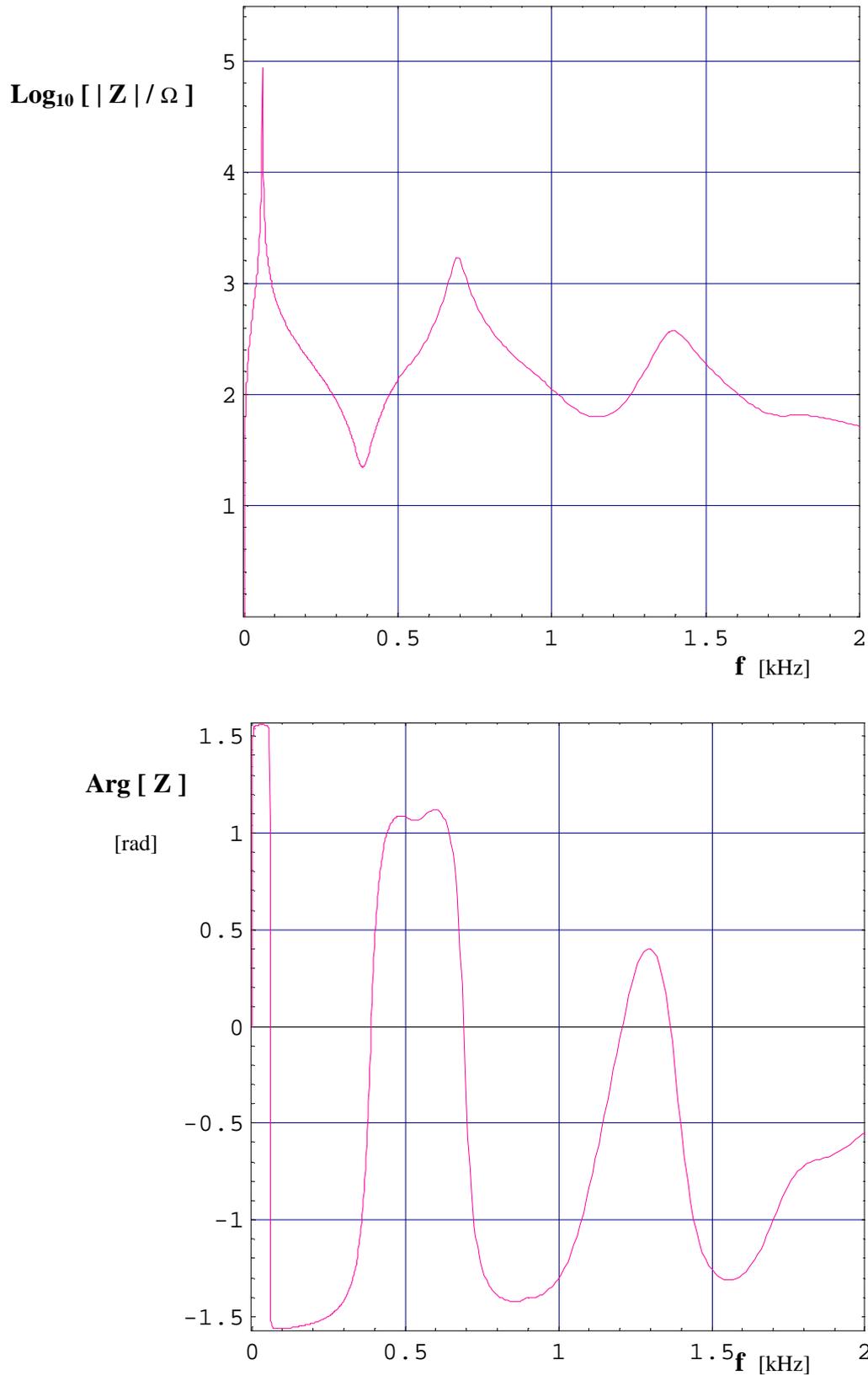


Fig. 7 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz]. Escala logarítmica de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

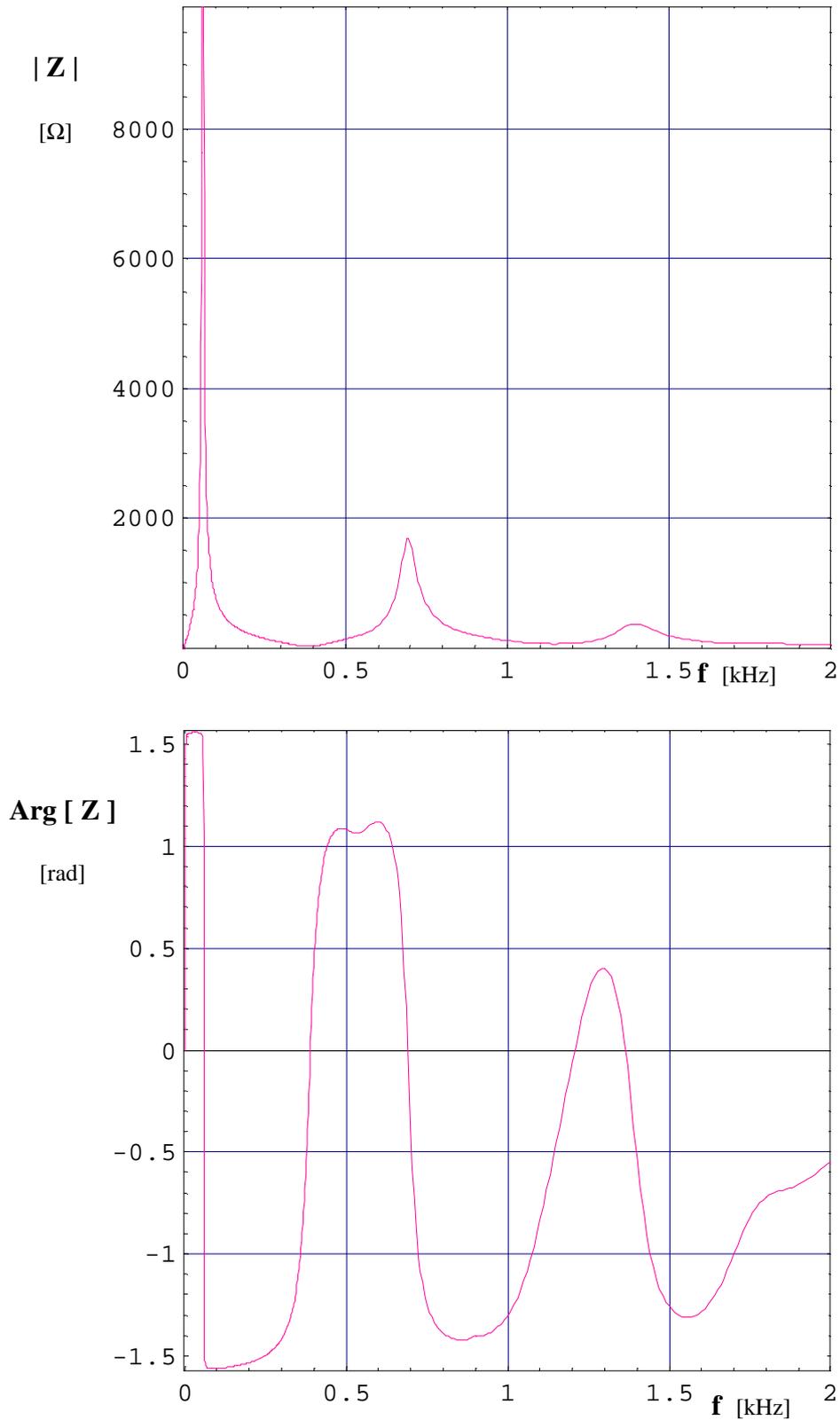


Fig. 8 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala linear de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

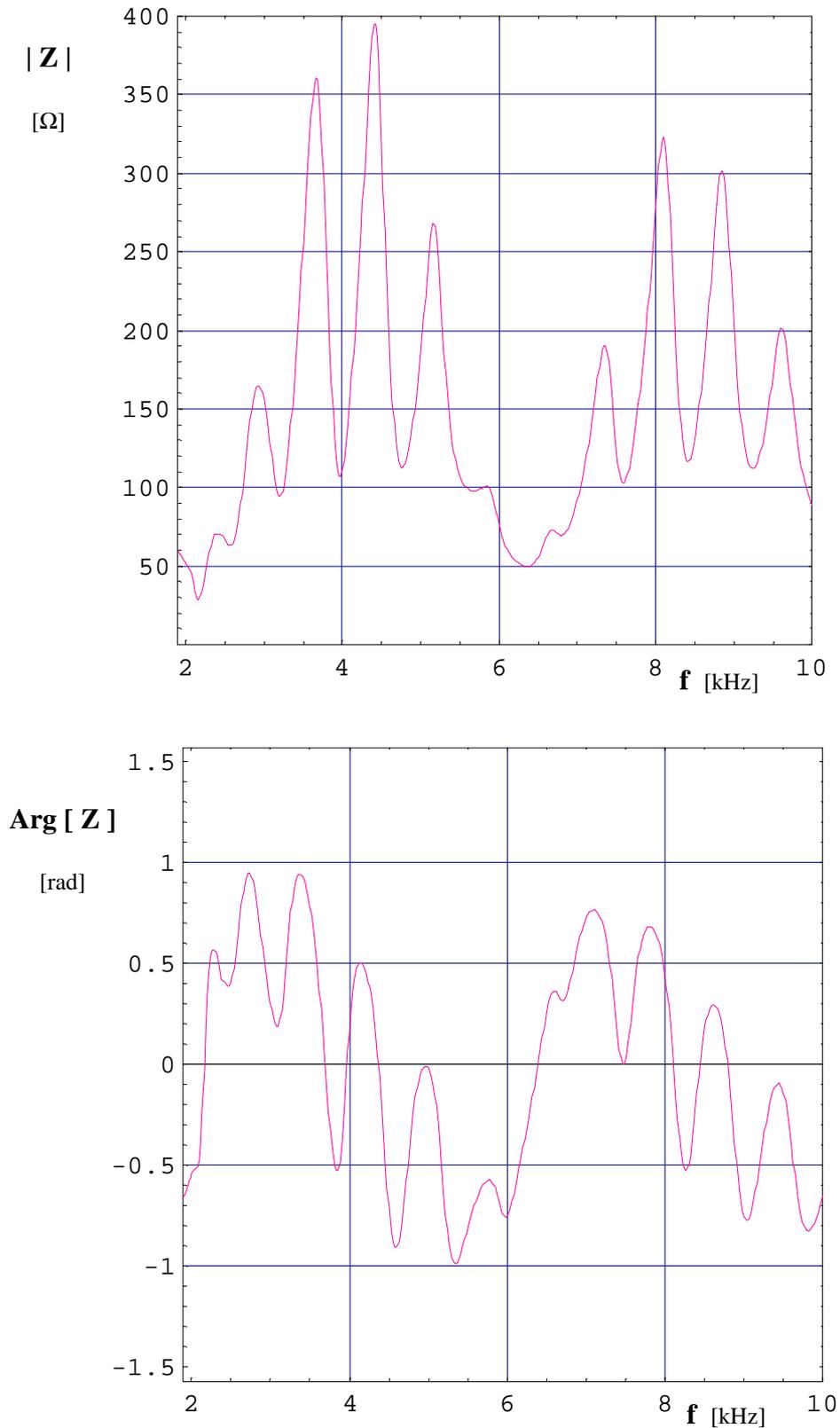


Fig. 9 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

Impedância medida num ponto a 400 km do terminal 1 (terminal 2).

Linha LNC 3

$L = 400 \text{ km}$

$L_1 = 400 \text{ km}$

Com 52% de compensação em derivação, distribuída igualmente entre as duas extremidades da LT, com reatores de neutro de 800Ω , e sem compensação em série .

Com disjuntores das duas extremidades fechados nas três fases

$$Z [60 \text{ Hz }] = 3,65049 - i 0,323765 \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e disjuntor da extremidade 2 fechado nas outras duas fases fechado nas três fases,.

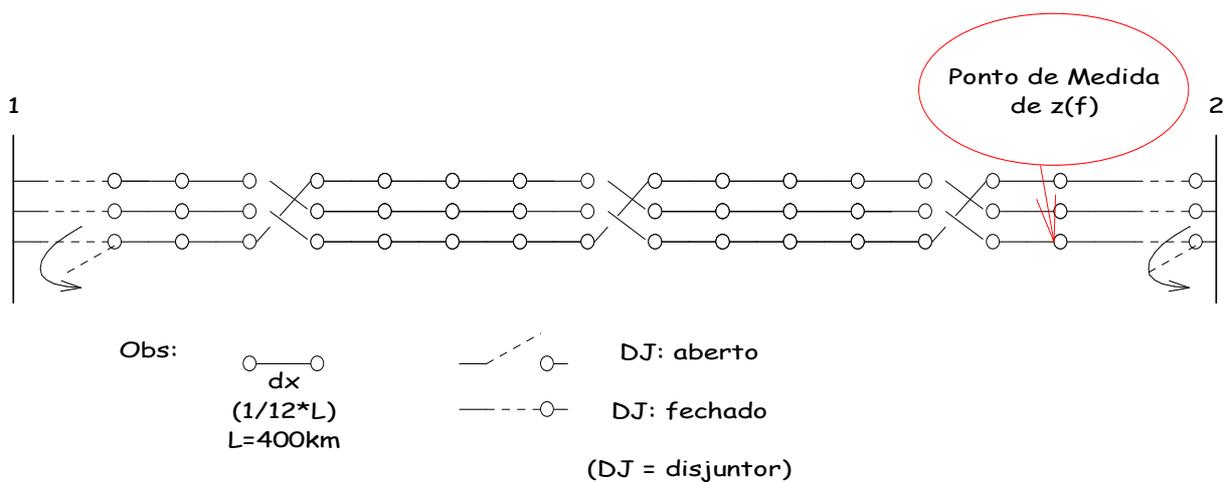
$$Z [60 \text{ Hz }] = 9,95982 - i 31,051 \Omega$$

Com disjuntor da extremidade 1 fechado nas três fases, e disjuntor da extremidade 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z , e fechado nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 14,6116 - i 3,09714 \Omega$$

Com disjuntores das extremidades 1 e 2 abertos na fase a que se refere o valor de Z , e fechados nas outras duas fases.

$$Z [60 \text{ Hz }] = 6324,12 - i 32866,7 \Omega$$



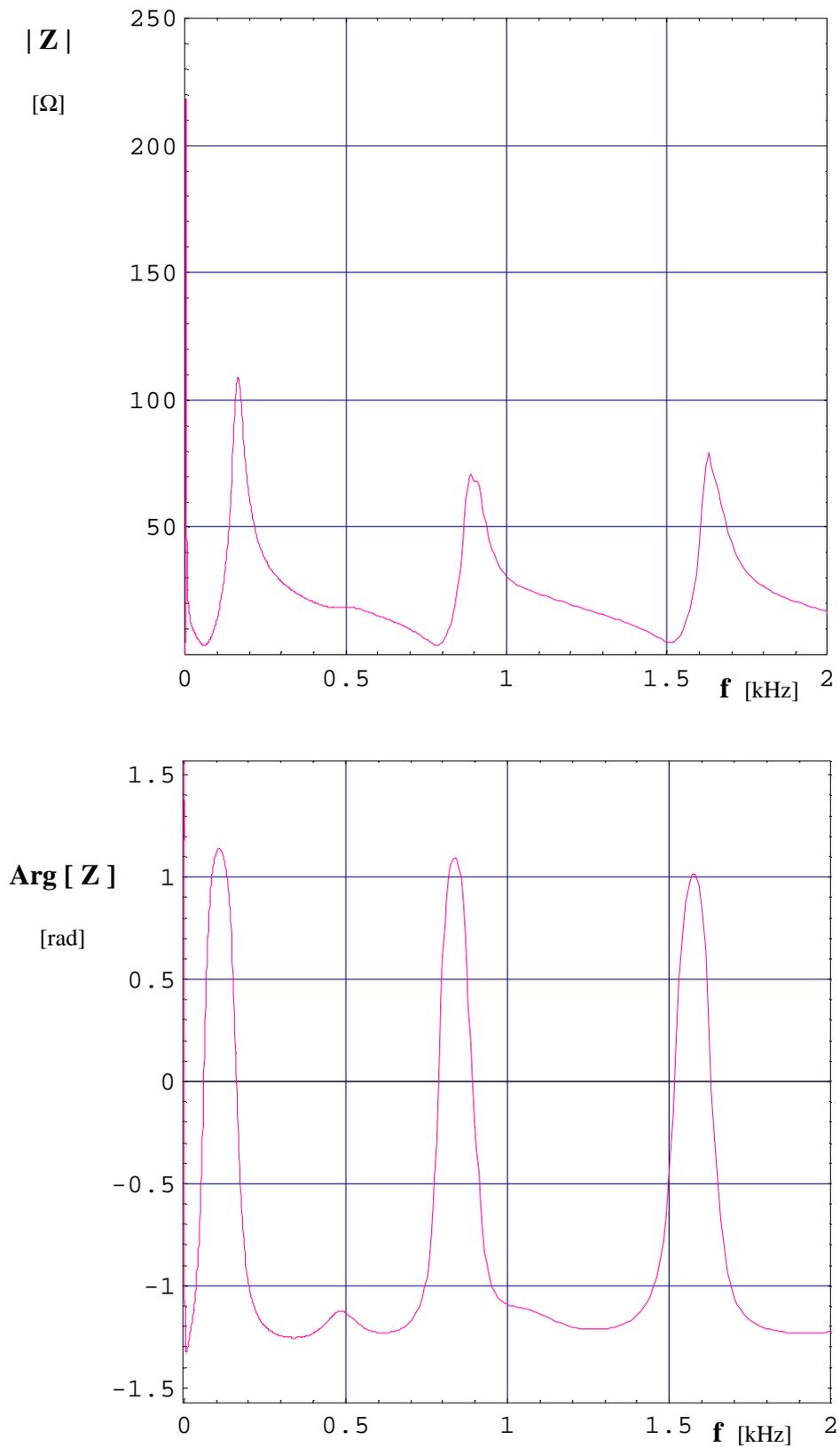


Fig. 1 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

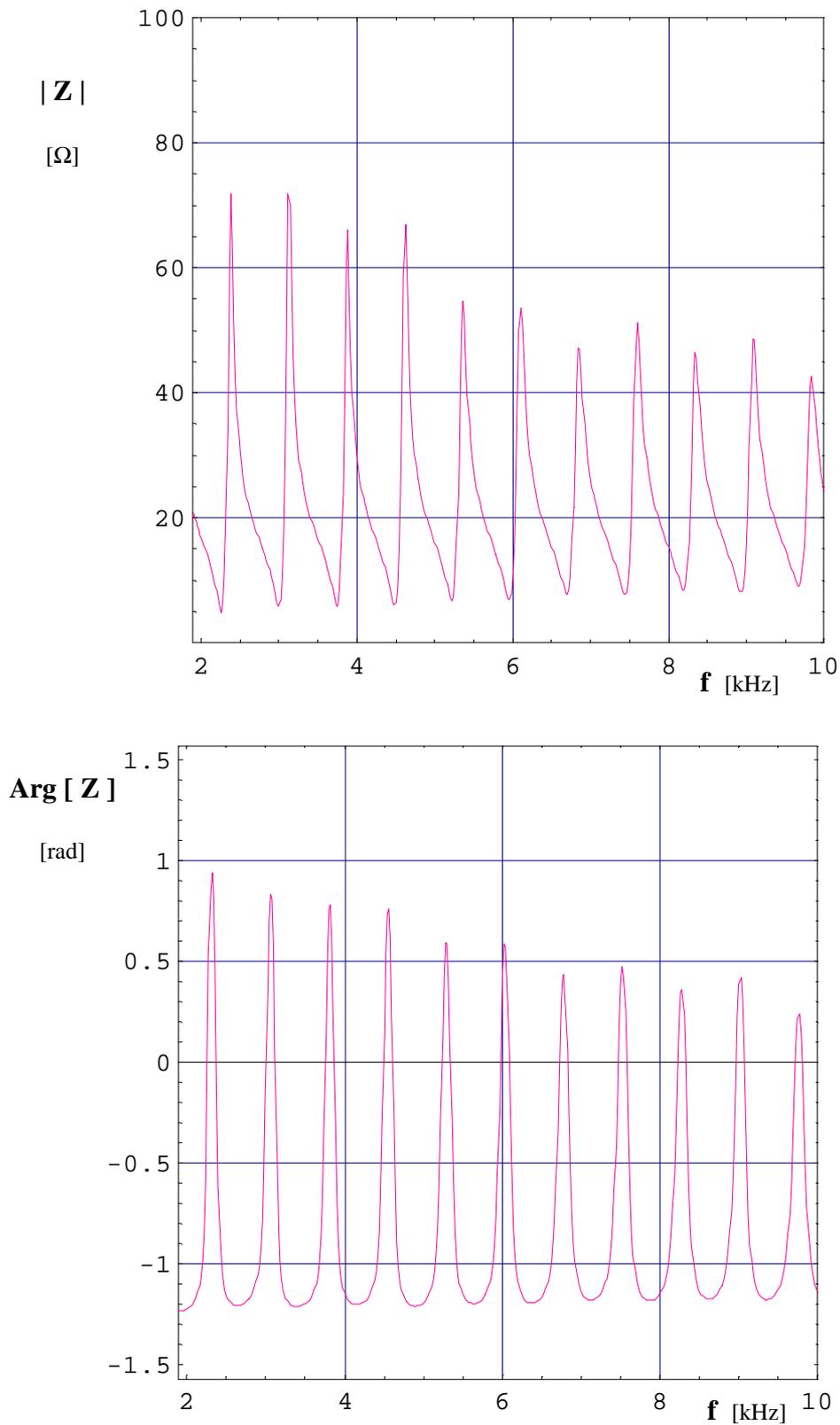


Fig. 2 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntores nas duas extremidades da linha fechados nas três fases.

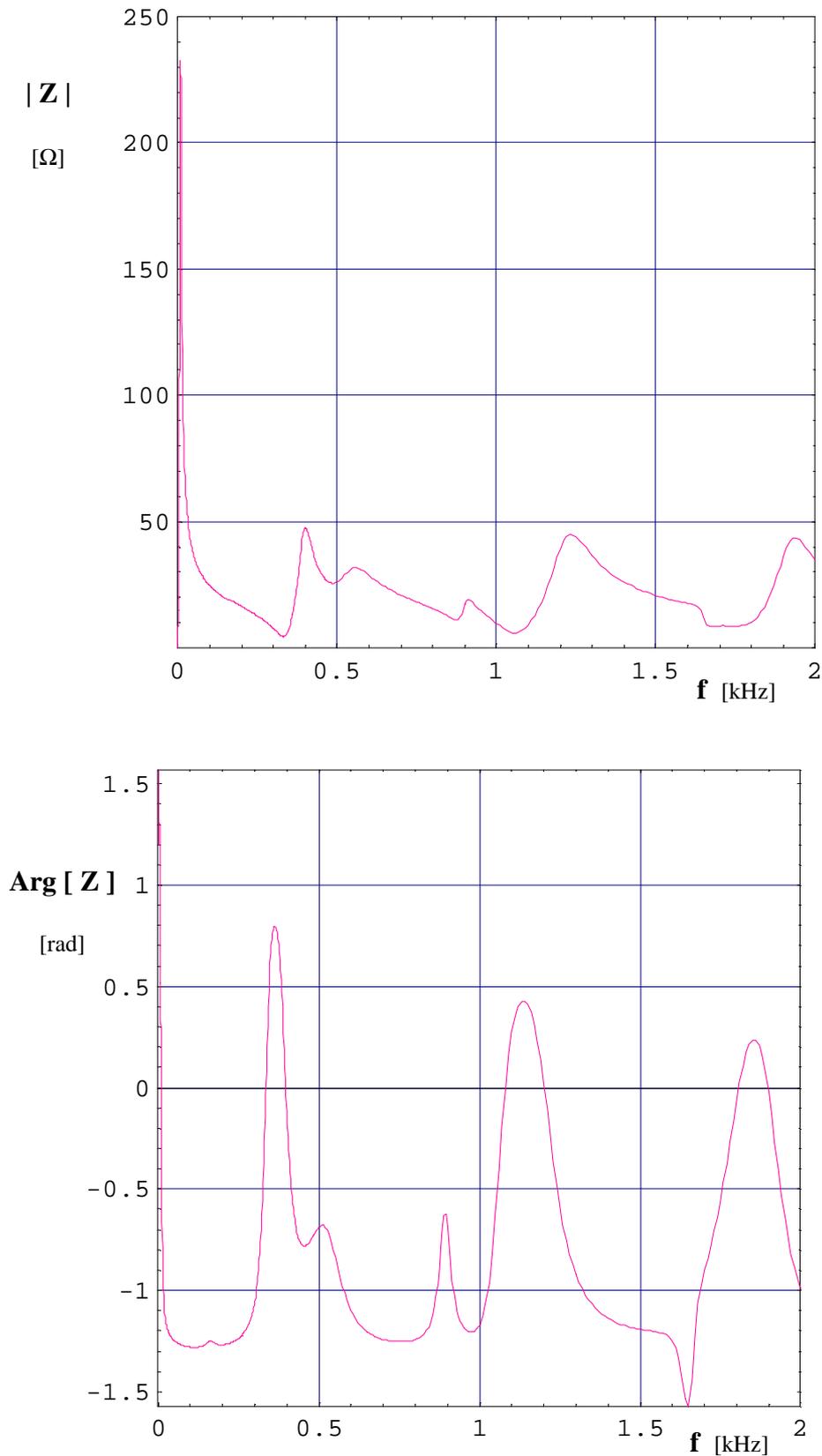


Fig. 3 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] .Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

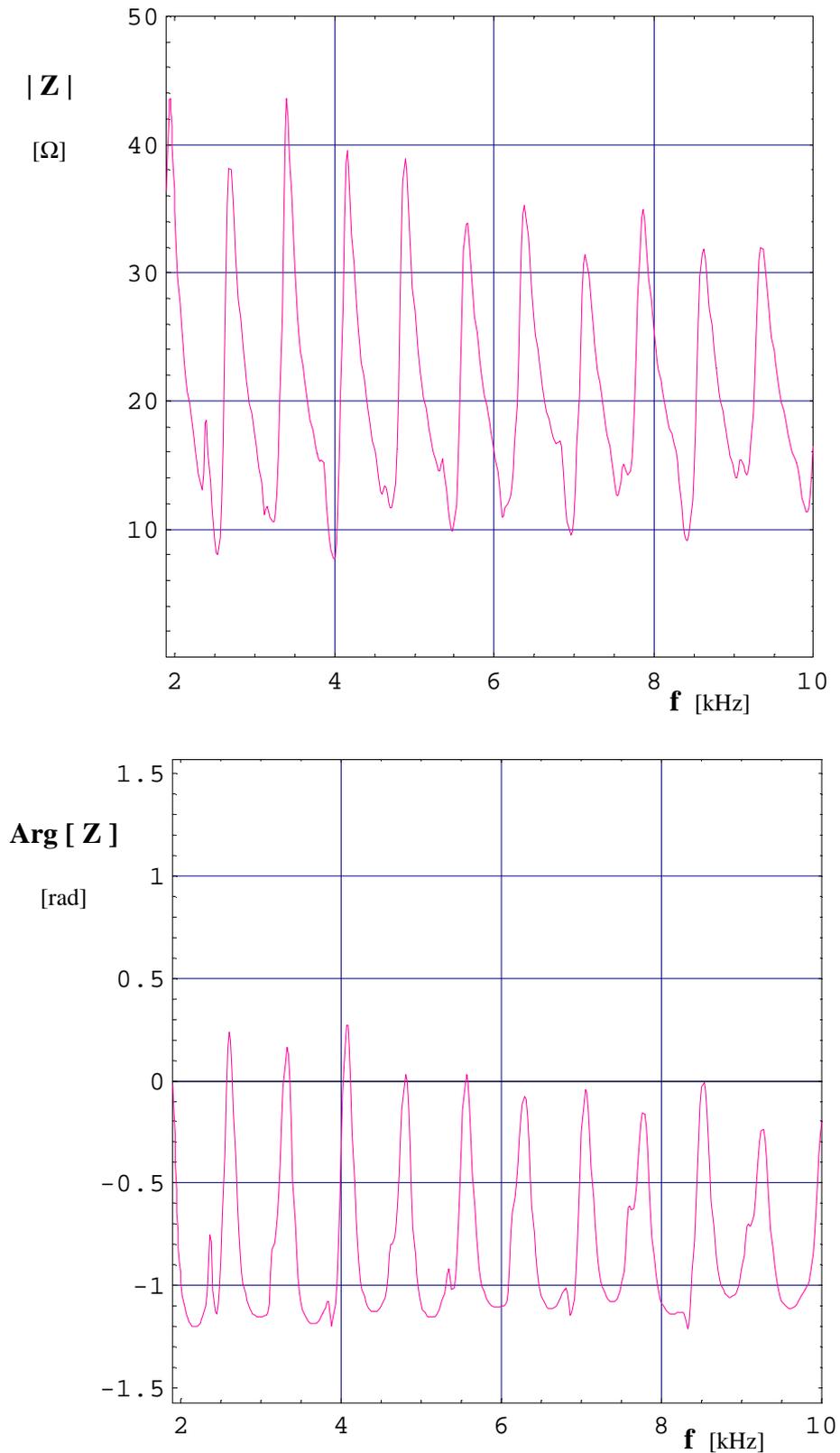


Fig. 4 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 fechado nas três fases.

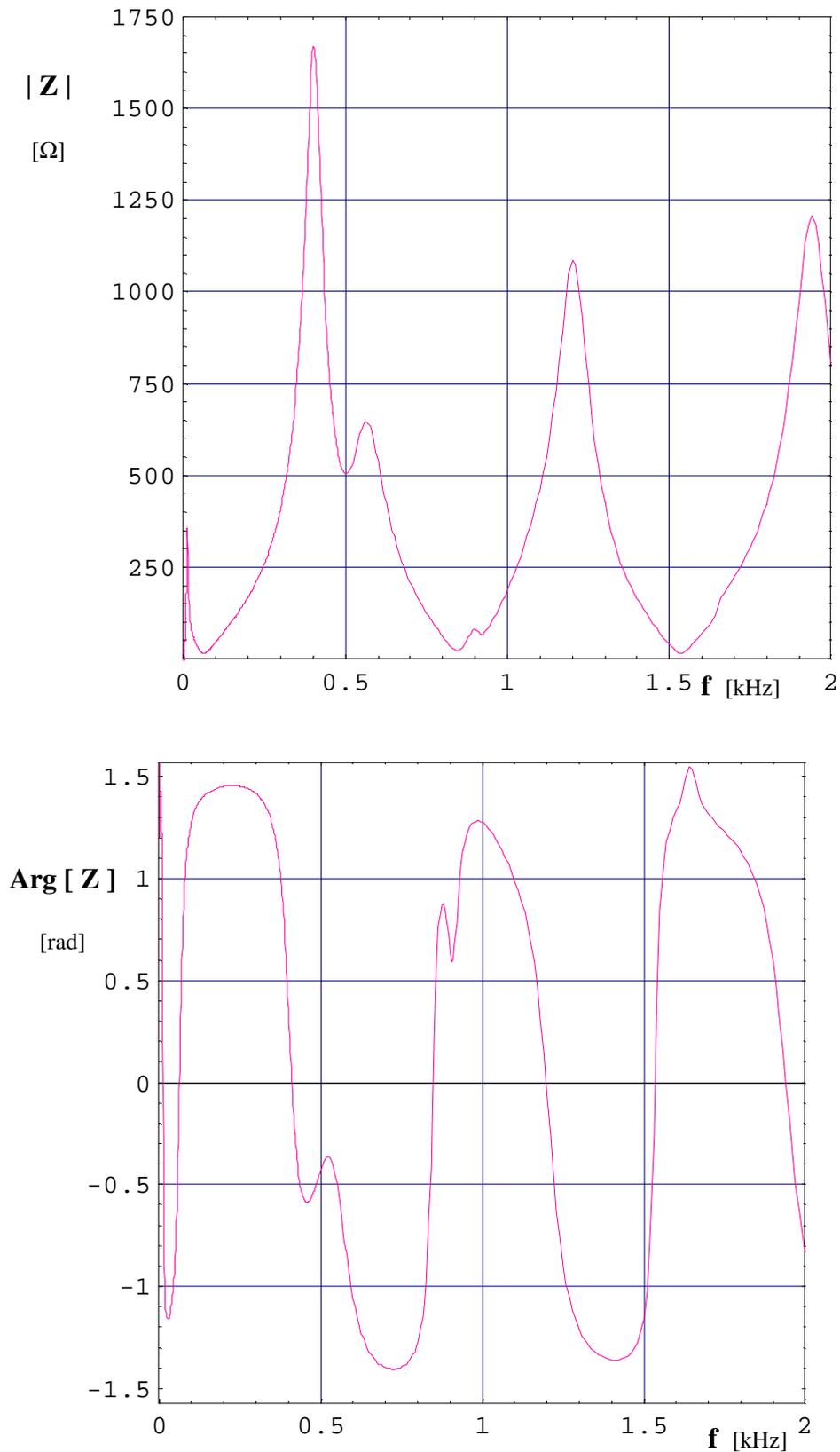


Fig. 5 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] .Disjuntor do terminal 1 fechado. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. nas três fases.

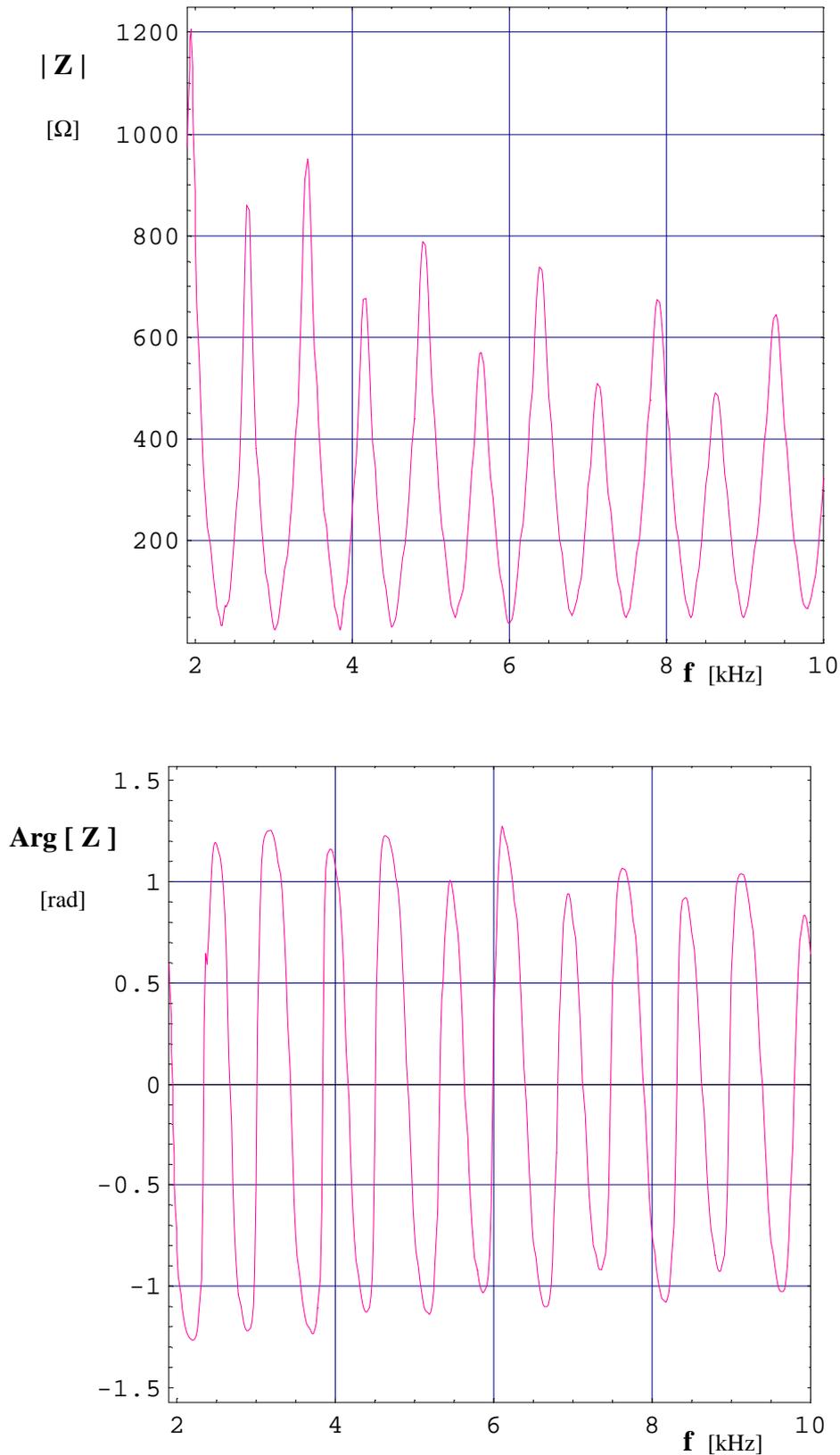


Fig. 6 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 fechado nas três fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

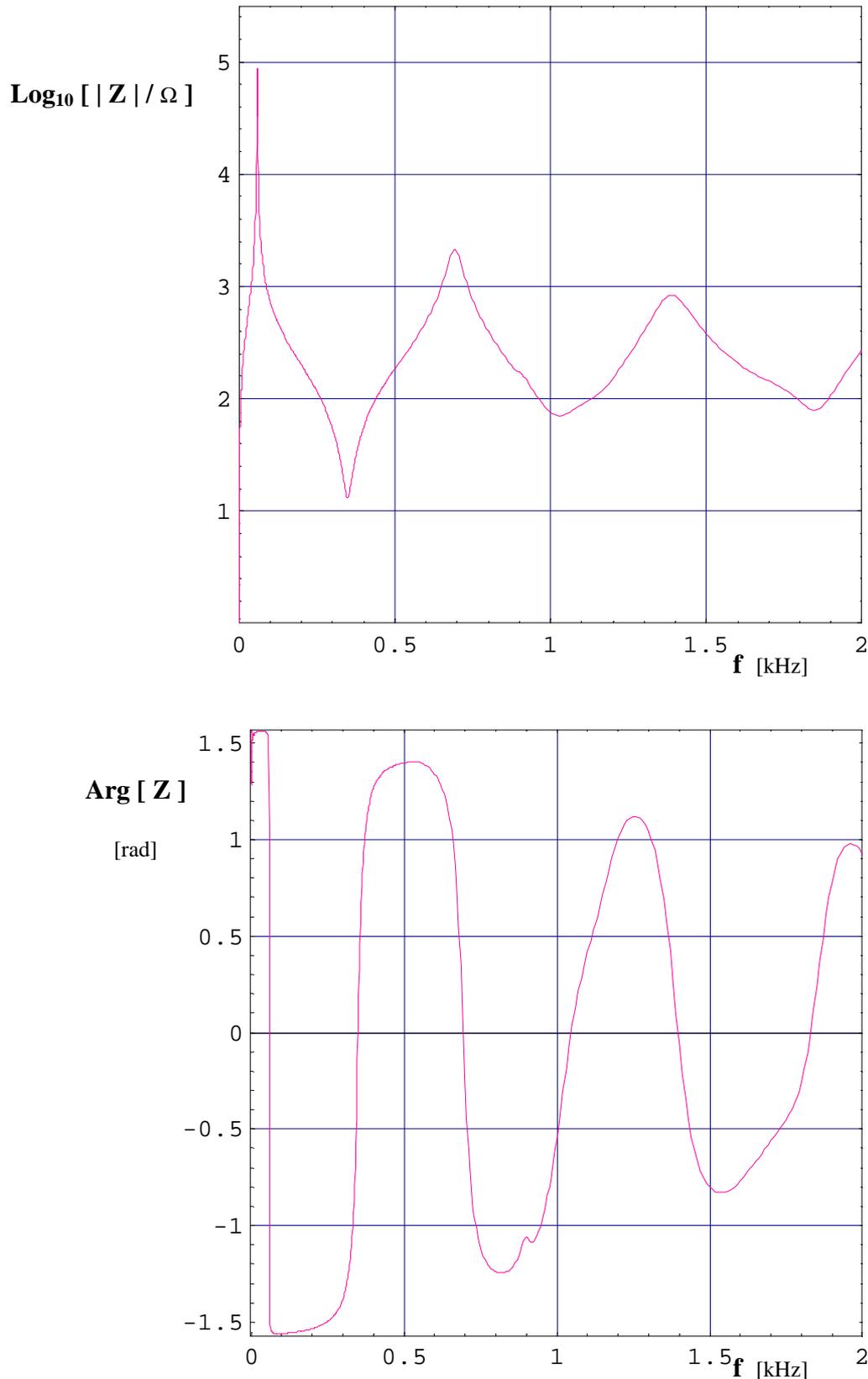


Fig. 7 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala logarítmica de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

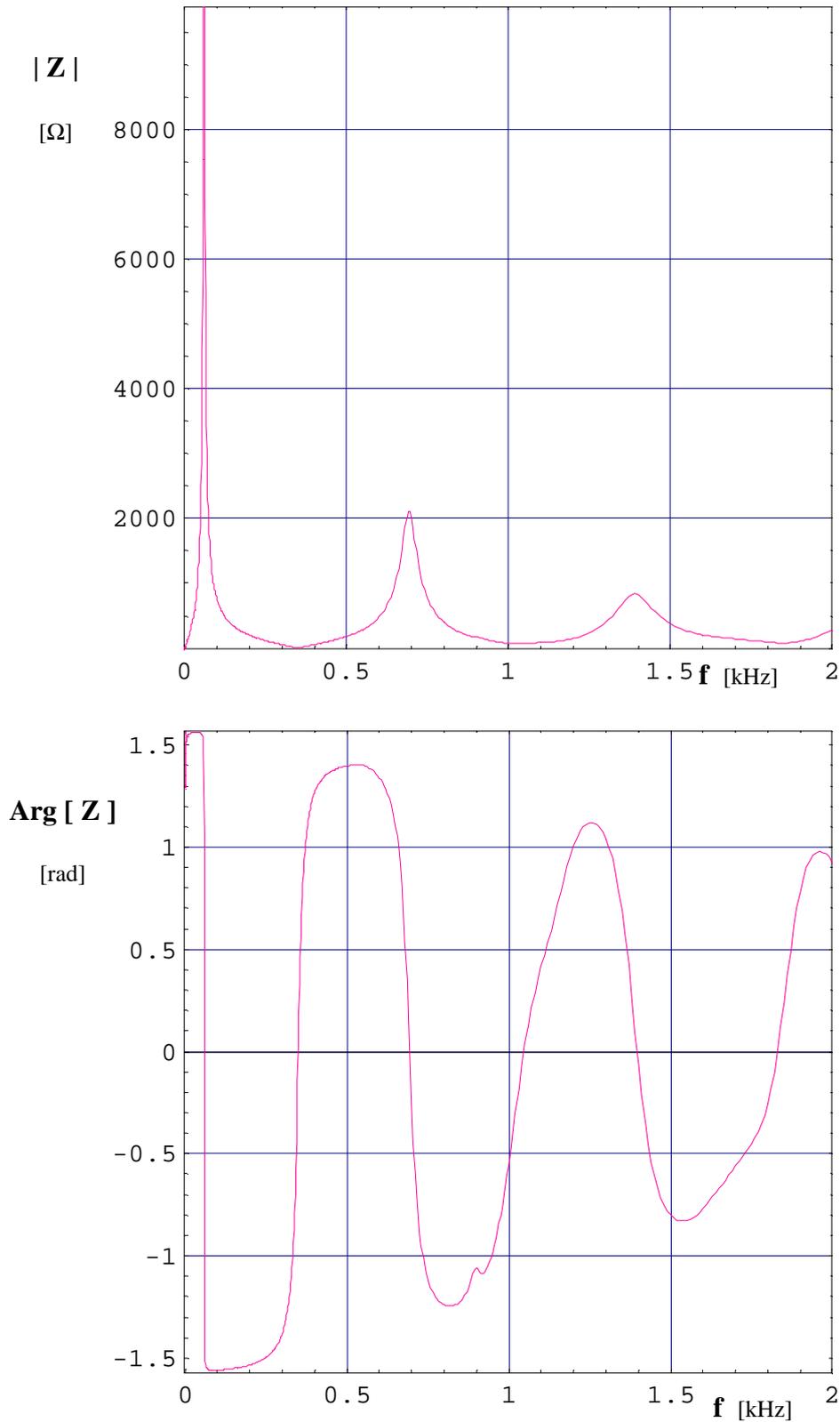


Fig. 8 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [0 , 2 kHz] . Escala linear de $|Z|$. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

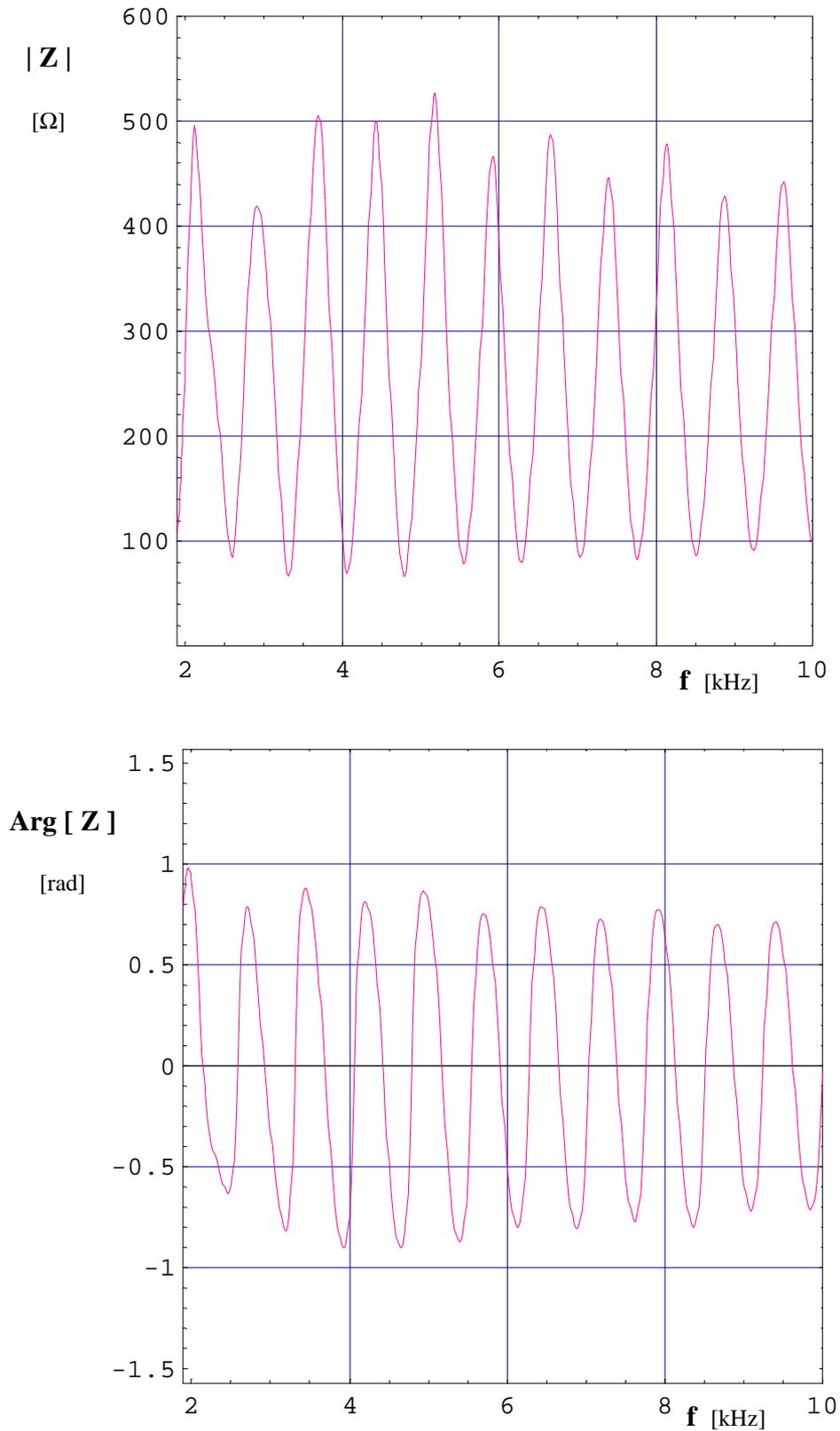


Fig. 9 – Impedância fase-terra, Z , no ponto considerado, em função da frequência, f , na gama [2 kHz, 10 kHz]. Disjuntor do terminal 1 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases. Disjuntor do terminal 2 aberto na fase a que se refere o valor de Z e fechado nas outras duas fases.

Cálculos do Critério 2 :

a. **CONJUNTO 1 DE READORES**

	<i>Term. Emissor</i>	<i>Term. Receptor</i>
XL(Ω)	4.55 + 1365.05 ĩ	5.46 + 1638.06 ĩ
Xn(Ω)	3.19695 + 799.237 ĩ	0.327612 + 81.903 ĩ
XL(Ω)	5.46 + 1638.06 ĩ	3.79167 + 1137.54 ĩ
Xn(Ω)	2.66413 + 666.031 ĩ	3.83634 + 959.084 ĩ
XL(Ω)	3.79167 + 1137.54 ĩ	5.46 + 1638.06 ĩ
Xn(Ω)	3.83634 + 959.084 ĩ	2.66413 + 666.031 ĩ
XL(Ω)	5.46 + 1638.06 ĩ	4.55 + 1365.05 ĩ
Xn(Ω)	0.327612 + 81.903 ĩ	3.19695 + 799.237 ĩ

Cálculos de Ajuste do Sistema :

XL (TE)	XL (TR)	V (TE)	I (TE)
Xn (TE)	Xn (TR)	V (TR)	I (TR)
4.55 + 1365.05 ĩ	5.46 + 1638.06 ĩ	550201.	1482.56
3.19695 + 799.237 ĩ	0.327612 + 81.903 ĩ	489587.	1544.8
5.46 + 1638.06 ĩ	3.79167 + 1137.54 ĩ	549610.	1469.18
2.66413 + 666.031 ĩ	3.83634 + 959.084 ĩ	483948.	1558.17
3.79167 + 1137.54 ĩ	5.46 + 1638.06 ĩ	548876.	1501.23
3.83634 + 959.084 ĩ	2.66413 + 666.031 ĩ	488408.	1541.07
5.46 + 1638.06 ĩ	4.55 + 1365.05 ĩ	550533.	1468.
0.327612 + 81.903 ĩ	3.19695 + 799.237 ĩ	487542.	1552.24

XL : reator de linha considerado (Ω)

Xn : reator de neutro (Ω)

V : tensão fase-fase (V)

I : corrente (A)

TE : terminal emissor

TR : terminal receptor

Arco Secundário para Defeito Fase-Terra no meio da LT

"Tensão nas extremidades abertas, durante o arco secundário (TE, TR) , em V"
{ {60033,9; 61992,2}, {59764,7; 61222,5}, {60890,1; 61709,9}, {57403,3 ; 61802,7} }

" Arco secundário em A "
{8,7488; 19,5954; 29,5729; 33,9483}

TRT do Arco Secundário para Defeitos Fase-Terra nas extremidades e meio da LT

TRT terminal emissor

{551153., 157785., 446627., 3.97195 × 10⁶}

TRT terminal receptor

{99847.6, 100971., 102738., 106598.}

TRT 1/2 lt

{603511., 214570., 393212., 3.96387 × 10⁶}

b. CONJUNTO 2 DE REATORES

	<i>Terminal Emissor(TE)</i>	<i>Terminal Receptor (TR)</i>
$X_L(\Omega)$	4.55 + 1365.05 \dot{i}	4.55 + 1365.05 \dot{i}
$X_n(\Omega)$	3.19695 + 799.237 \dot{i}	3.19695 + 799.237 \dot{i}
$X_L(\Omega)$	5.46 + 1638.06 \dot{i}	5.46 + 1638.06 \dot{i}
$X_n(\Omega)$	2.66413 + 666.031 \dot{i}	0.327612 + 81.903 \dot{i}
$X_L(\Omega)$	3.79167 + 1137.54 \dot{i}	3.79167 + 1137.54 \dot{i}
$X_n(\Omega)$	3.83634 + 959.084 \dot{i}	3.83634 + 959.084 \dot{i}
$X_L(\Omega)$	5.46 + 1638.06 \dot{i}	5.46 + 1638.06 \dot{i}
$X_n(\Omega)$	0.327612 + 81.903 \dot{i}	2.66413 + 666.031 \dot{i}

Arco Secundário para Defeito Fase-Terra no meio da LT

"Tensão nas extremidades abertas, durante o arco secundário (TE, TR) , em V"
{ {60229,; 61520,8}, {59410,5; 62153,7}, {61178,8; 60872,8}, {57274,3 ; 62188,} }

" Arco secundário em A "
{21,6733; 9,52159; 51,3392; 43,7469 }

TRT do Arco Secundário para Defeitos Fase-Terra nas extremidades e meio da LT

" TRT terminal emissor "
{661937.,142387.,397698.,492001.}
" TRT terminal receptor "
{98245.7,100782.,103590.,101878.}
" TRT 1/2 lt "
{731326.,95373.,345306.,440585.}

Cálculos do Critério 3

- Valores de Reatores em Derivação considerados :

$X_L(1) = 3,79 + i 1137,54 \Omega$, a 60Hz (242 Mvar / 525 kV).

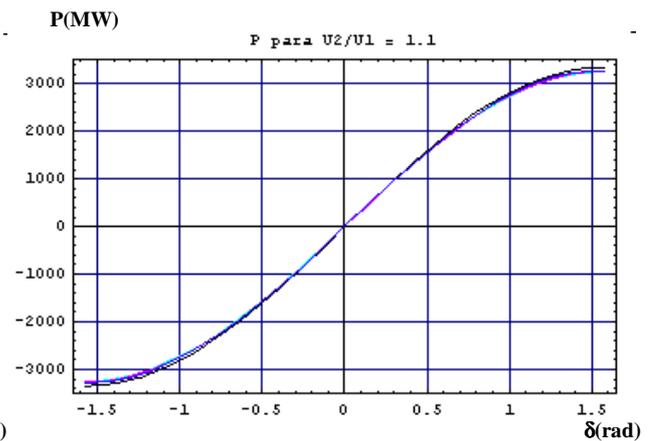
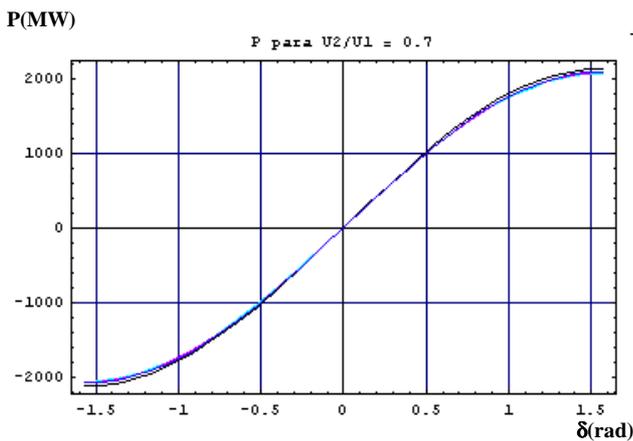
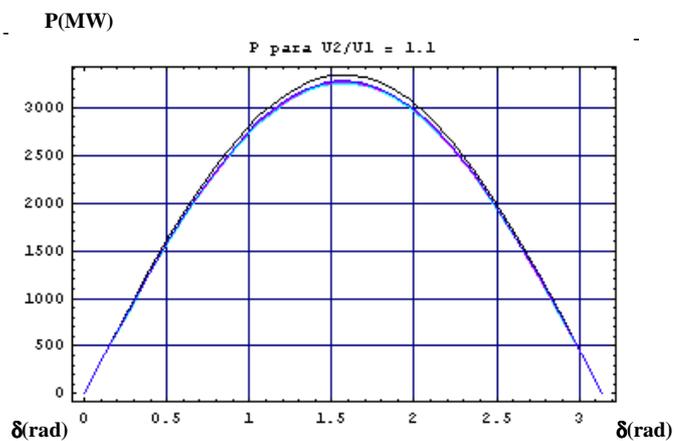
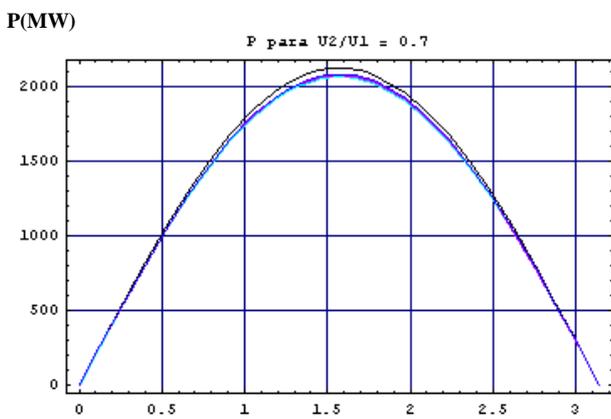
$X_L(2) = 4,55 + i 1365,05 \Omega$, a 60Hz (202 Mvar / 525 kV).

$X_L(3) = 5,46 + i 1638,06 \Omega$, a 60Hz (168 Mvar / 525 kV).

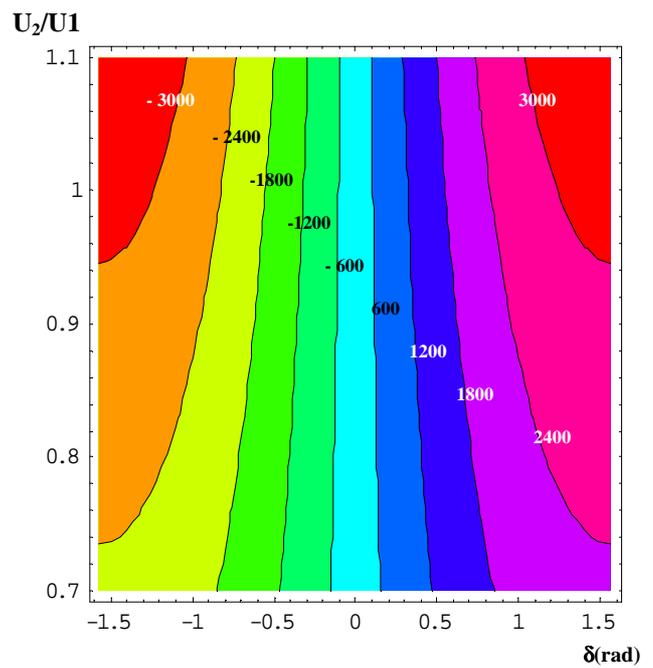
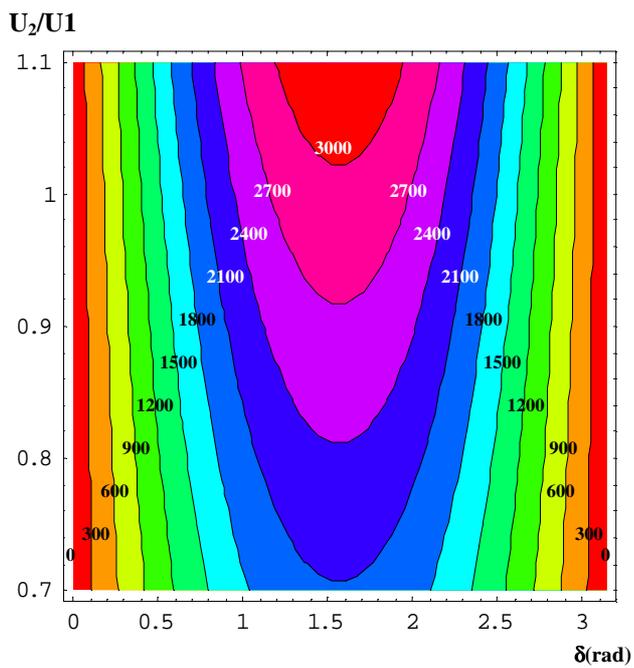
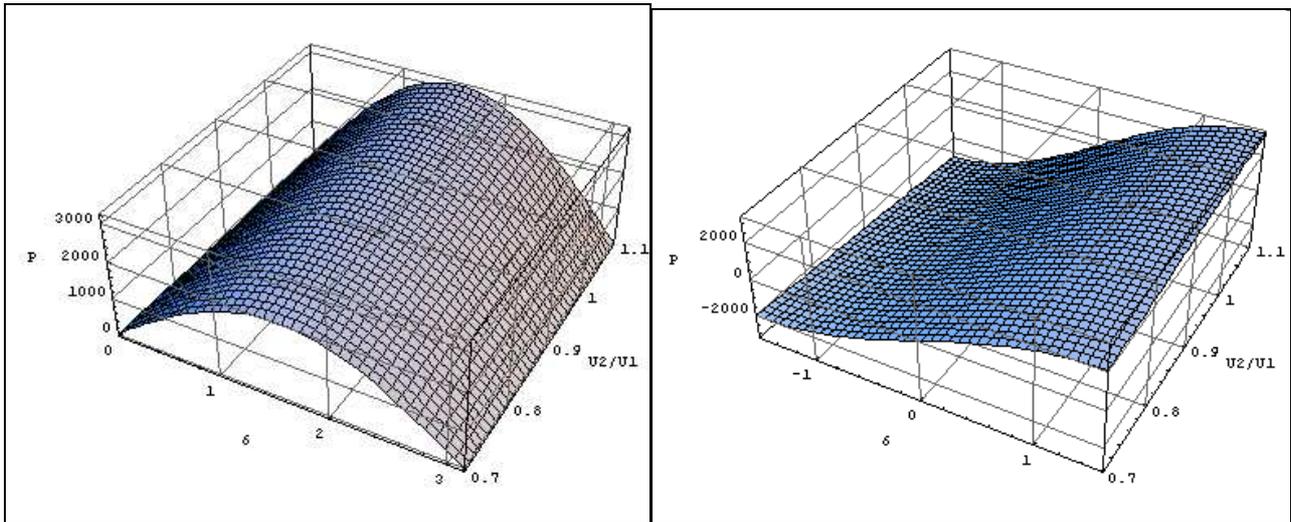
- Para reatores iguais instalados nas duas extremidades da LT, $X_L(1)$, $X_L(2)$ e $X_L(3)$ representam 62%, 52% e 43% de compensação em derivação.

- Os gráficos a seguir ilustram os valores de potência ativa (P), reativa (Q) em função da defasagem angular entre terminais 1 e 2, e perfil de tensão ao longo da LT.

Gráficos Relacionados a Potência Transmitida do Terminal 1 para o Terminal 2



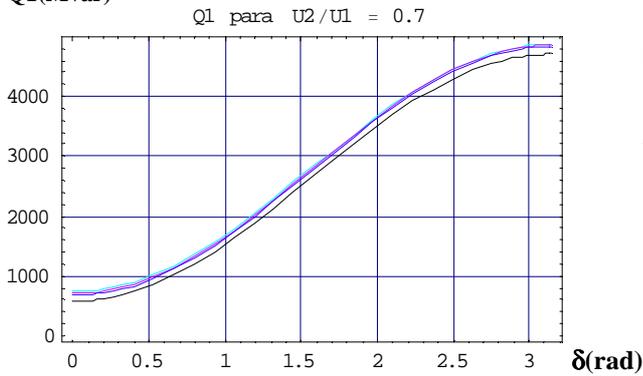
--- :sem compensação , - - - : com compensação, XL1 , - - - : com compensação, XL2 , - - - : com compensação, XL3



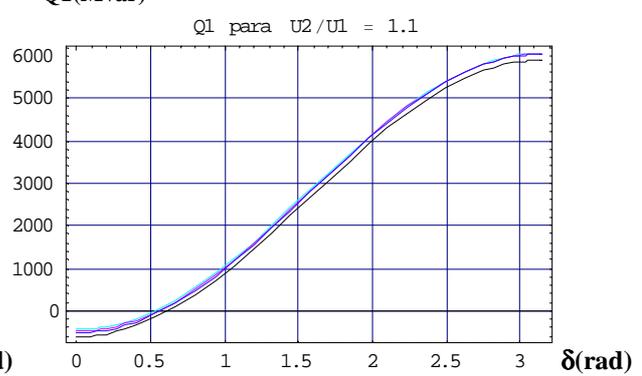
Curvas de nível acima referentes à Potência Ativa (P) transmitida a partir do Terminal 1, para vários valores de defasagem angular entre terminais e relações entre as tensões terminais (U_1 : tensão no terminal 1 , U_2 : tensão no terminal 2)

Gráficos Relacionados a Potência Reativa no Terminal 1

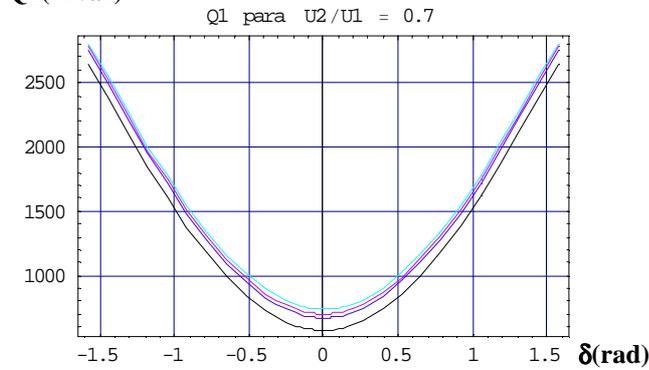
Q1(Mvar)



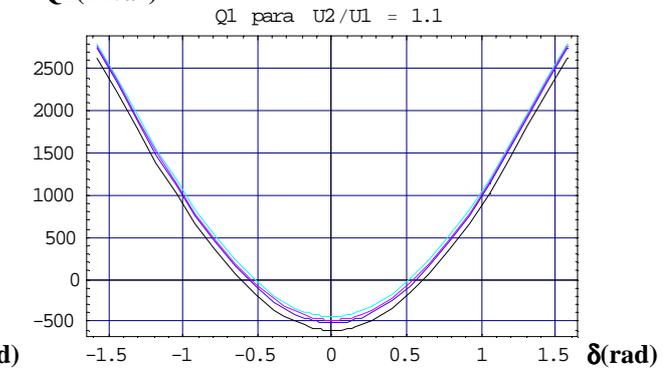
Q1(Mvar)



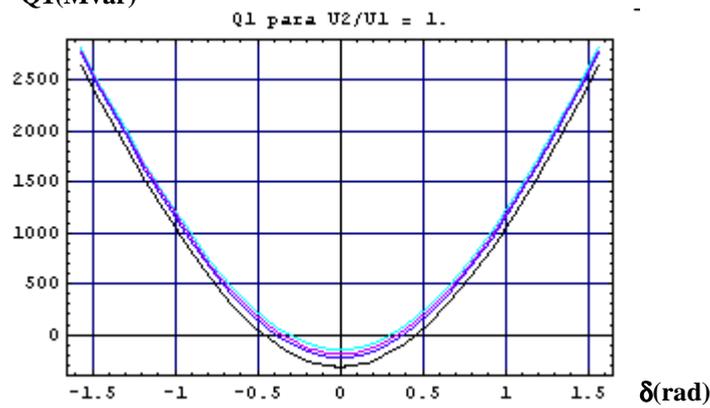
Q1(Mvar)



Q1(Mvar)

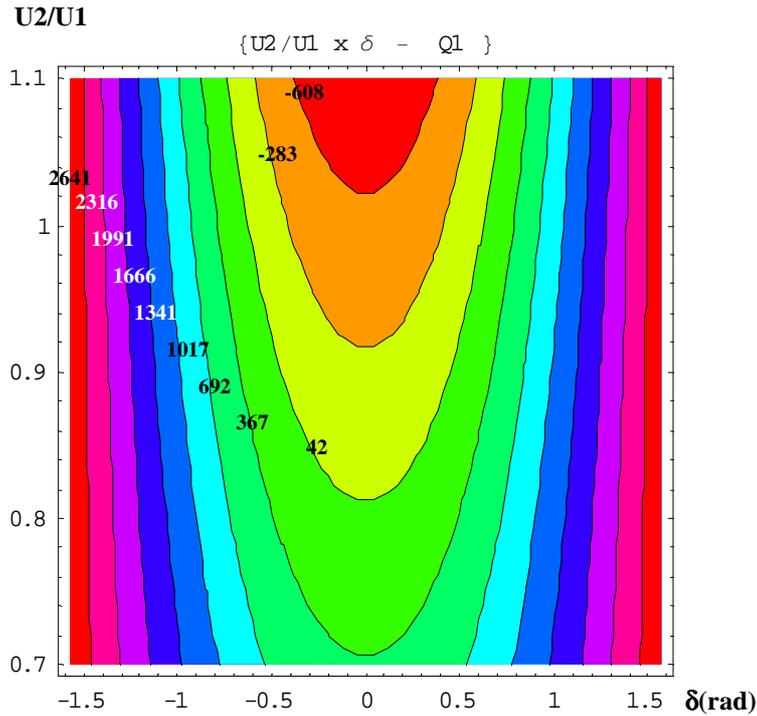


Q1(Mvar)

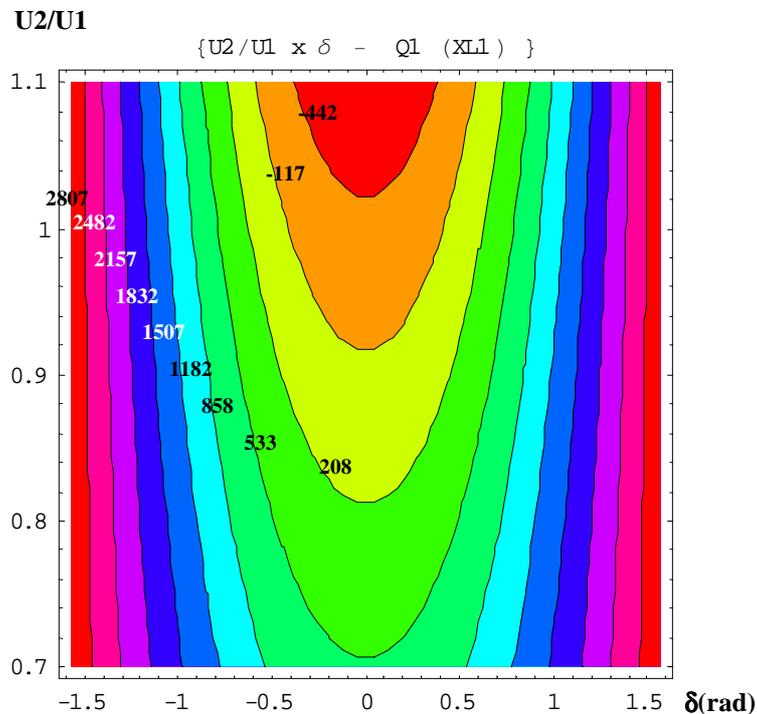


Q1 : Potência Reativa Absorvida no Terminal 1

--- : sem compensação , - - - : com compensação, XL1, - - - : com compensação, XL2, , - - - : com compensação, XL3

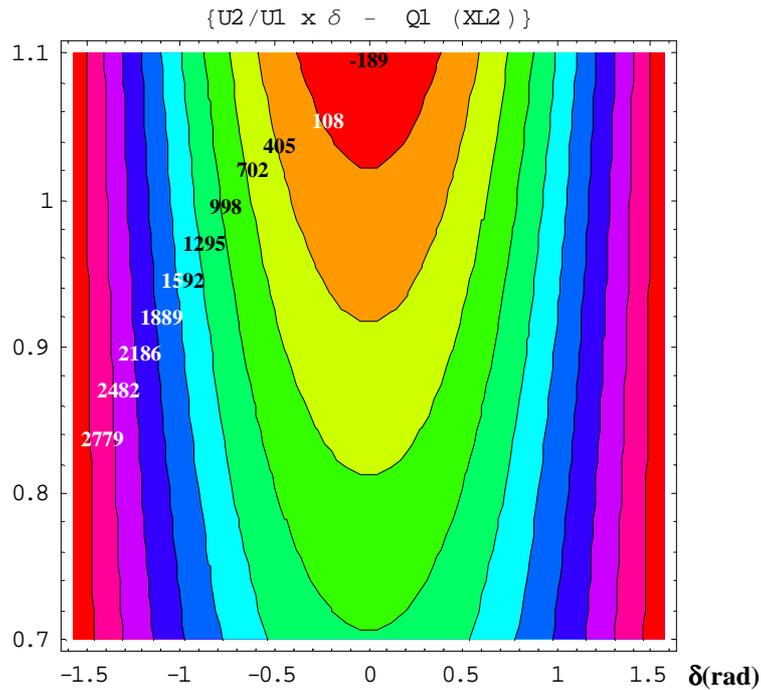


Curva de nível acima referente à Potência Reativa ($Q1$) absorvida no Terminal 1, para vários valores de defasagem angular entre terminais e relações entre as tensões terminais ($U1$: tensão no terminal 1, $U2$: tensão no terminal 2), sem compensação na LT.

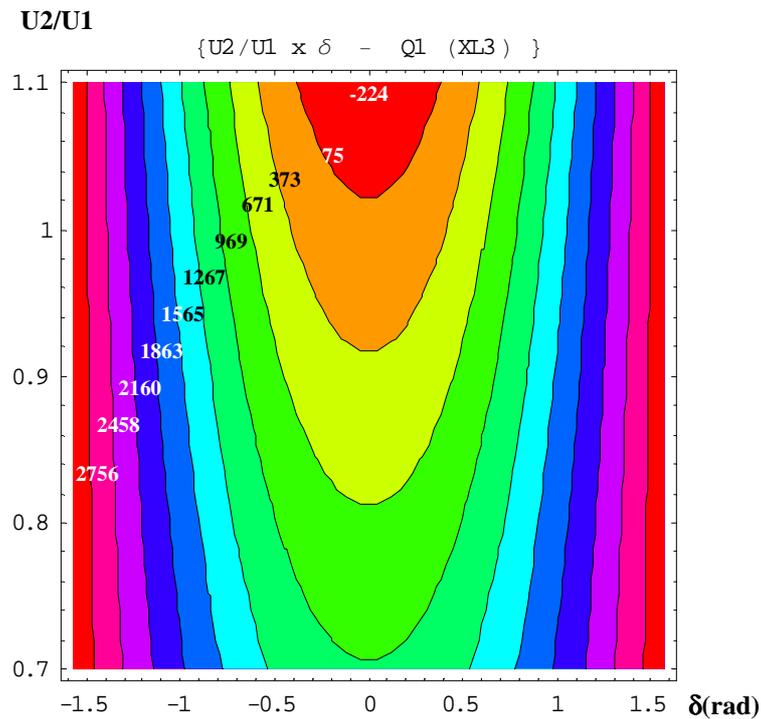


Curva de nível acima referentes à Potência Reativa ($Q1$) absorvida no Terminal 1, para vários valores de defasagem angular entre terminais e relações entre as tensões terminais ($U1$: tensão no terminal 1, $U2$: tensão no terminal 2), com compensação na LT – reator de linha 1 .

U2/U1



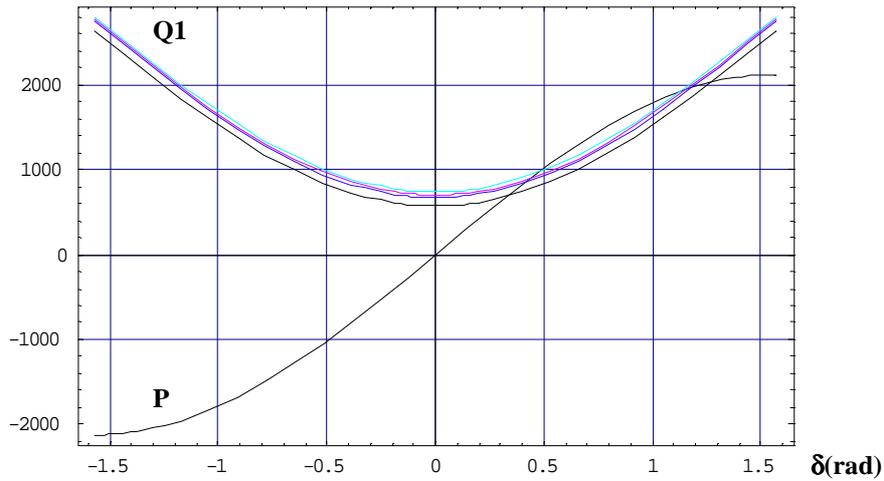
Curva de nível acima referentes à Potência Reativa ($Q1$) absorvida no Terminal 1, para vários valores de defasagem angular entre terminais e relações entre as tensões terminais ($U1$: tensão no terminal 1, $U2$: tensão no terminal 2), com compensação na LT – reator de linha 2 .



Curva de nível acima referentes à Potência Reativa ($Q1$) absorvida no Terminal 1, para vários valores de defasagem angular entre terminais e relações entre as tensões terminais ($U1$: tensão no terminal 1, $U2$: tensão no terminal 2), com compensação na LT – reator de linha 3 .

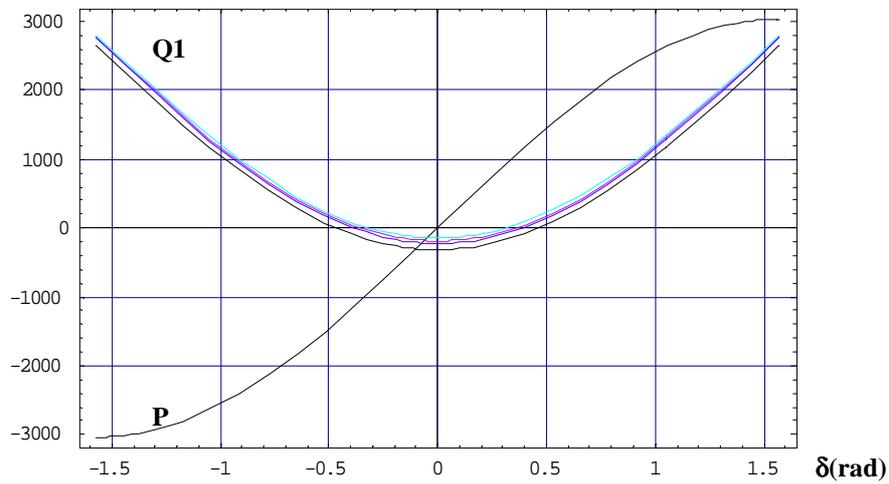
P(MW) , Q1(Mvar)

{U2/U1 = 0.7 }



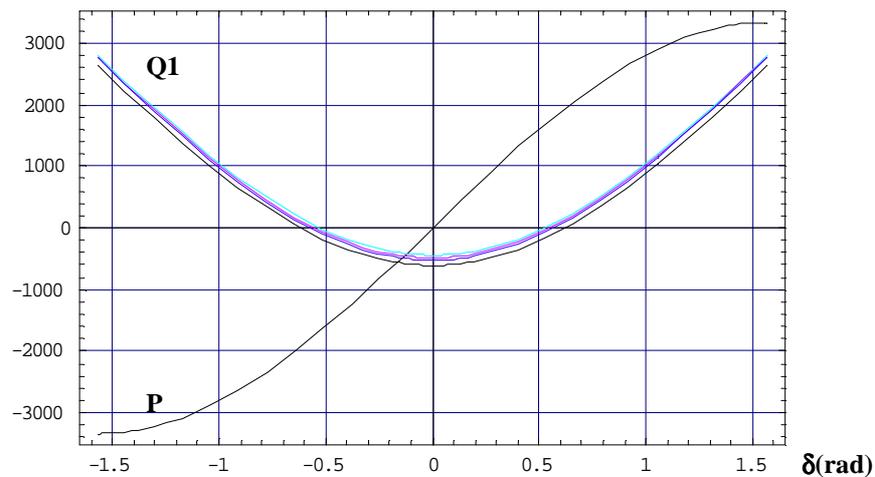
P(MW) , Q1(Mvar)

{U2/U1 = 1. }



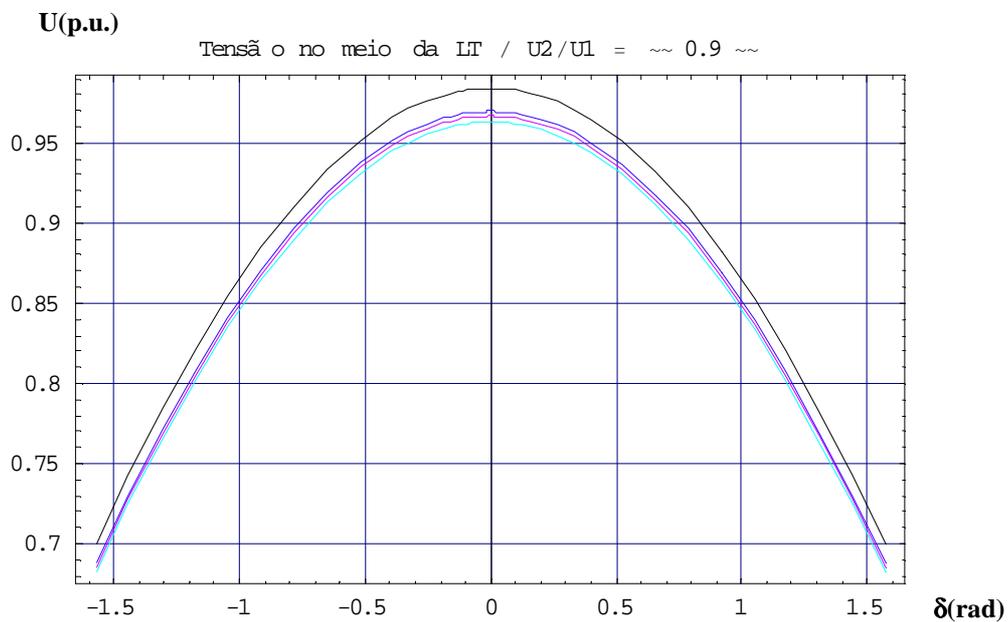
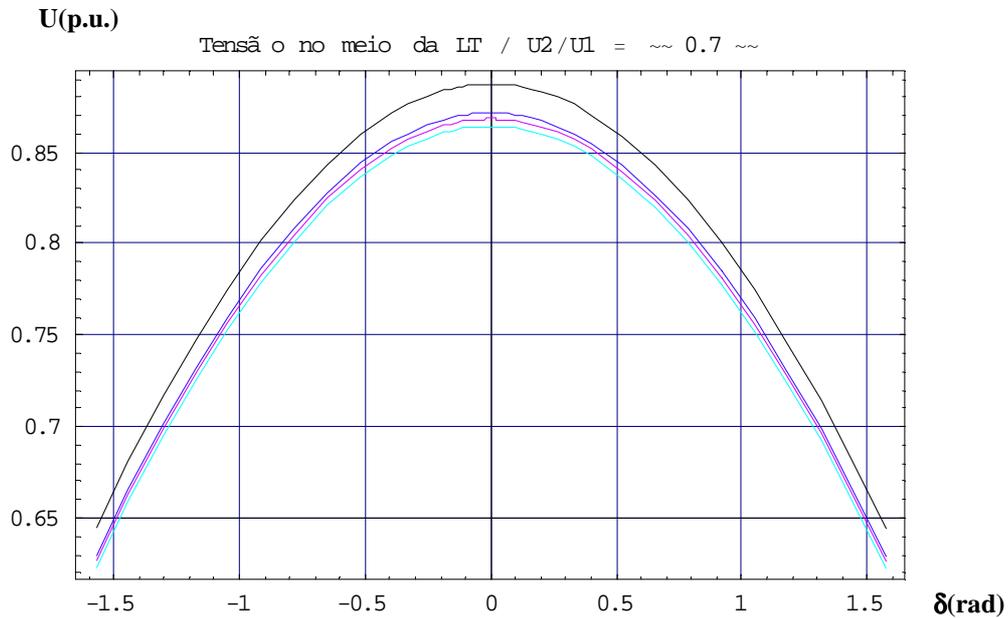
P(MW) , Q1(Mvar)

{U2/U1 = 1.1 }

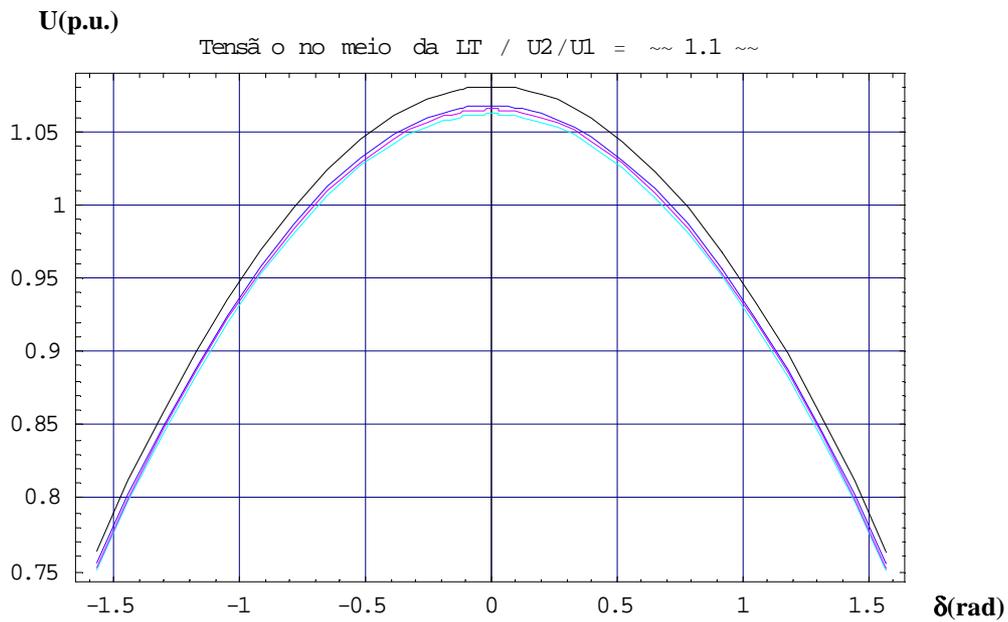
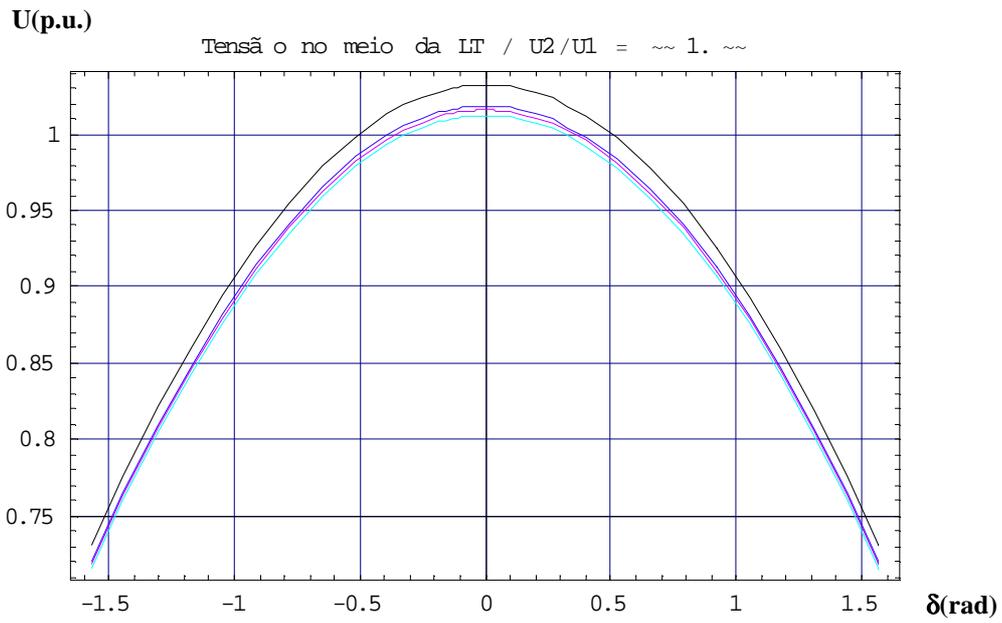


--- : sem compensação , --- : com compensação, XL1, --- : com compensação, XL2, --- : com compensação, XL3

Os gráficos abaixo apresentam a tensão no meio da LT para diferentes relações entre as tensões terminais (U_2/U_1), variando de 0.7 a 1.1, com diferentes ângulos de operação (defasagem angular entre terminais).



--- : sem compensação, --- : com compensação, XL1, --- : com compensação, XL2, --- : com compensação, XL3



--- :sem compensaçã o , - - - : com compensaçã o, XL1, - - - : com compensaçã o, XL2, - - - : com compensaçã o, XL3

ANEXO 2

O Anexo 2 encontra-se dividido em 4 sub-anexos, conforme detalhado a seguir :

*Anexo 2-1
Levantamento do Pior Ponto de Defeito*

*Anexo 2-2
Gráficos: Tensão de Restabelecimento Transitória x Corrente de Arco Secundário
(ANEEL: Critério 1)*

*Anexo 2-3
Variação dos Reatores de Neutro*

*Anexo 2-4
Oscilogramas*

*Anexo 2-5
Resultados da Configuração Final
(Definição das Características Elétricas Básicas dos Reatores de Neutro)*

► Resultados do ANEXO 2-1

*Medições da Corrente de Arco Secundário e Tensão Induzida nas Extremidades da Fase Aberta (**Regime Permanente**, Freqüência Fundamental (60 Hz))*

TABELA	ANO	CONTINGÊNCIA		
A2-1.1	1	T1 – T2A fora de operação, Fluxo: T1 –T2A p: 1200 MVA Defeito ao longo da LT		
<i>LT Terminal 1 - Terminal 2 C1 fora de operação</i>				
<i>Fluxo na LT Terminal 1 - Terminal 2 C2: 1200 MW / Ano 1</i>				
<i>Local do Defeito</i>	VT1 (kVef)	VT2 (kVef)	Iarco (Aef)	
Terminal 1 (T1)	0,94	71,99	94,04	
a 5km de T1	1,60	70,01	89,69	
a 44,67 km de T1	11,20	61,94	89,10	
a 89,05 km de T1	21,59	51,66	87,30	
a 134,05 km de T1	31,59	41,90	84,80	
a 151,05 km de T1	34,96	37,93	84,92	
a 179,55 km de T1 (*)	39,99	31,83	83,18	
a 222,88 km de T1	47,77	22,64	80,76	
a 262,55 km de T1	55,35	15,97	81,87	
a 267,55 km de T1 (**)	55,84	15,63	82,06	
a 86 km de T2	56,45	15,19	82,28	
a 75,83 km de T2	58,56	13,42	82,54	
a 70 km de T2	59,78	12,20	82,48	
a 45,5 km de T2	64,34	7,53	82,20	
a 15,17 km de T2	69,26	1,32	81,42	
a 5 km de T2	71,15	0,42	81,89	
Terminal 2 (T2)	71,64	0,82	82,17	

(*) meio da LT

(**) Terminal Intermediário

TABELA A2-1.1

▶ Resultados do ANEXO 2 - 2

Tensão de Restabelecimento Transitória x Corrente de Arco Secundário (ANEEL:

Critério 1), Regime Transitório (58 Hz < f < 62 Hz)

As figuras apresentadas neste anexo retratam os resultados das simulações para verificação da extinção do arco secundário para tempo morto de 500 ms, de acordo com critério adotado pela ANEEL.

O quadro a seguir reporta as condições de operação e contingências consideradas:

ANO 1 : CARGA PESADA OU CARGA DE EMERGÊNCIA

- Defeito Monofásico em T1
- Defeito Monofásico no meio da LT
- Defeito Monofásico em T2

ANO 2: CARGA PESADA, LT T1 – T2 I FORA DE OPERAÇÃO

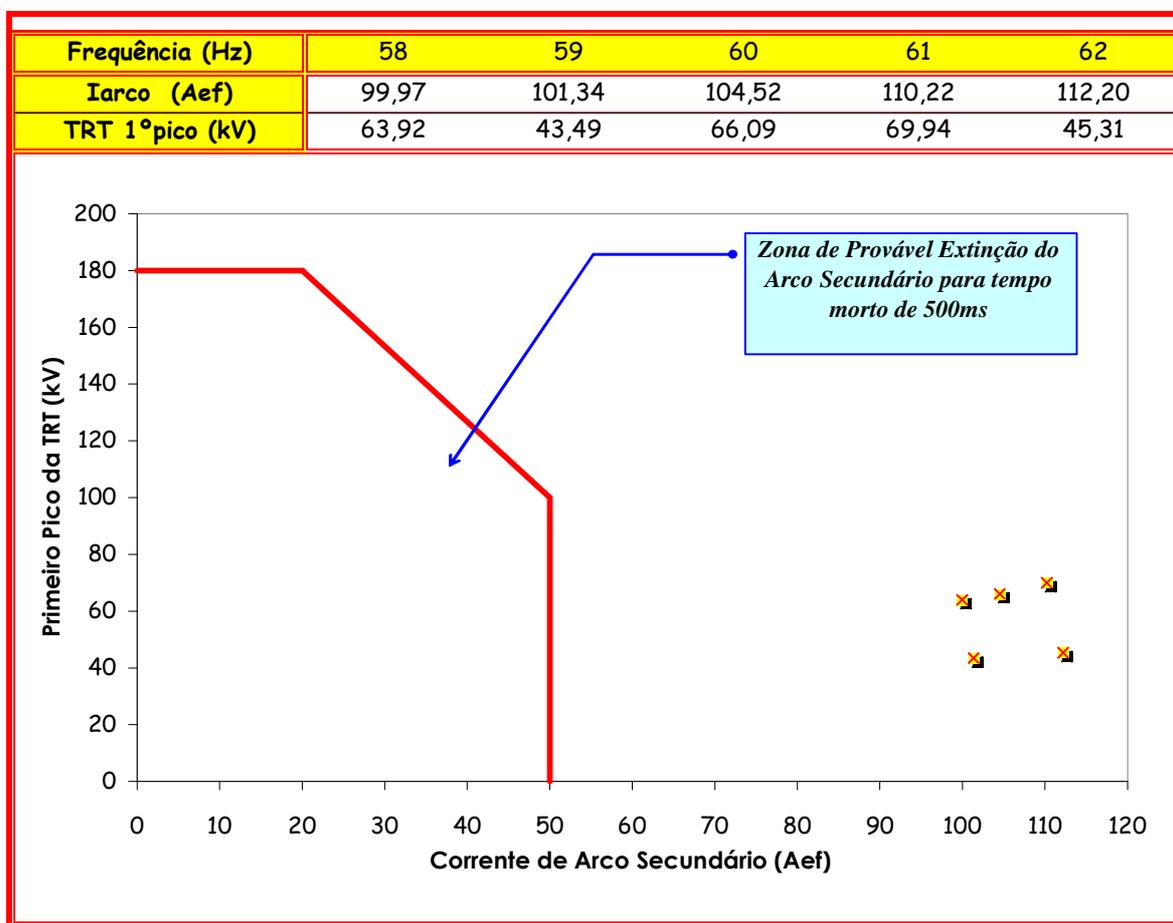
- Defeito Monofásico em T1
- Defeito Monofásico em Tin (LT T1 – Tin)
- Defeito Monofásico em Tin (LT T2 – Tin)
- Defeito Monofásico em T2

QUADRO A2-2.1 – Síntese das Condições de Operação e Contingências Analisadas

As figuras A2-2.1 a A2-2.7 apresentam os resultados correspondentes às condições citadas acima, sem quaisquer dispositivo de mitigação da corrente de arco secundário.

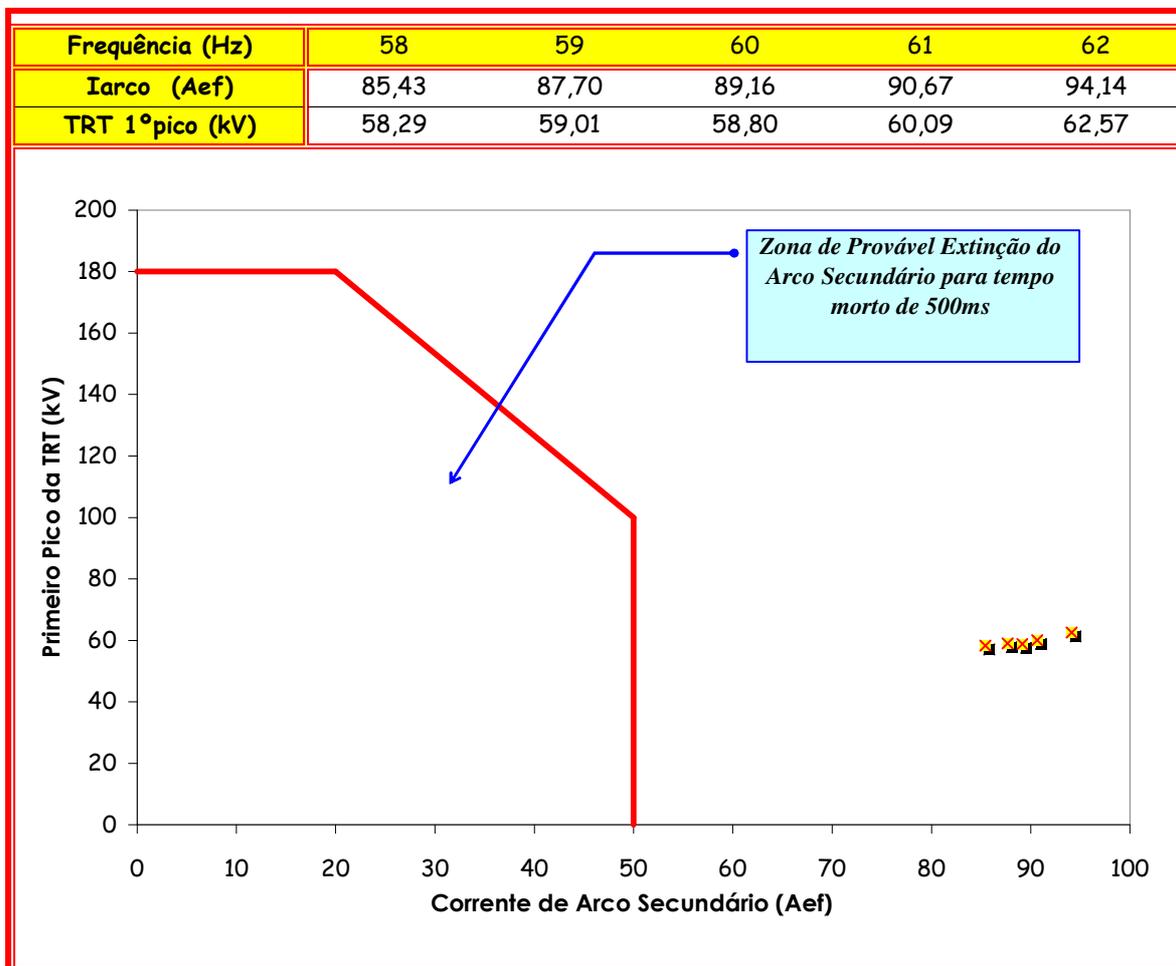
Na figura A2-8 são apresentados os resultados utilizando-se os reatores de neutro apontados nos estudos de regime permanente como soluções potenciais de acordo com os limites adotados como critério para as grandezas aferidas, para o ano 1.

As figuras A2-9 e A2-10 apresentam os resultados dos reatores de neutro para o ano 2 que atendem a 1.



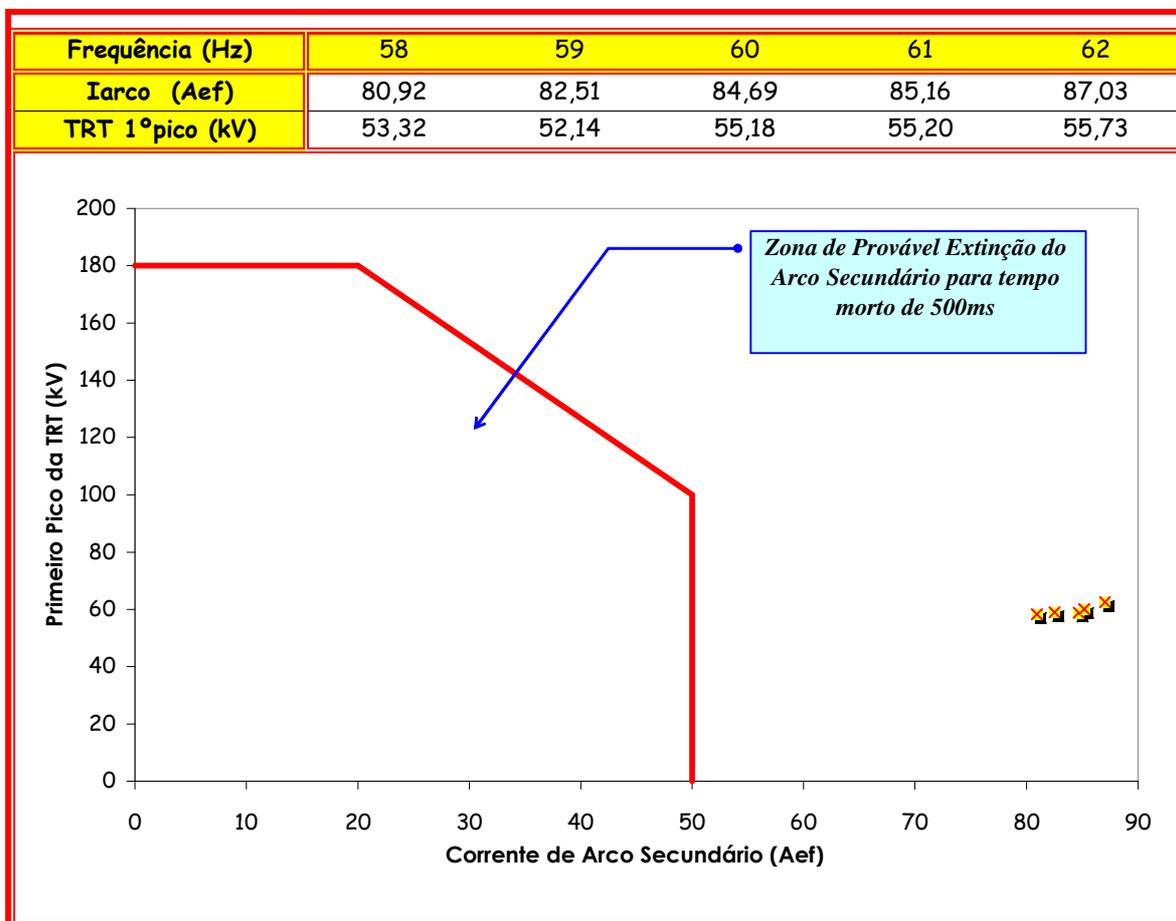
Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
Contingência : Defeito Monofásico em T1
Ano 1, Carga de Emergência

FIGURA A2-2. 1

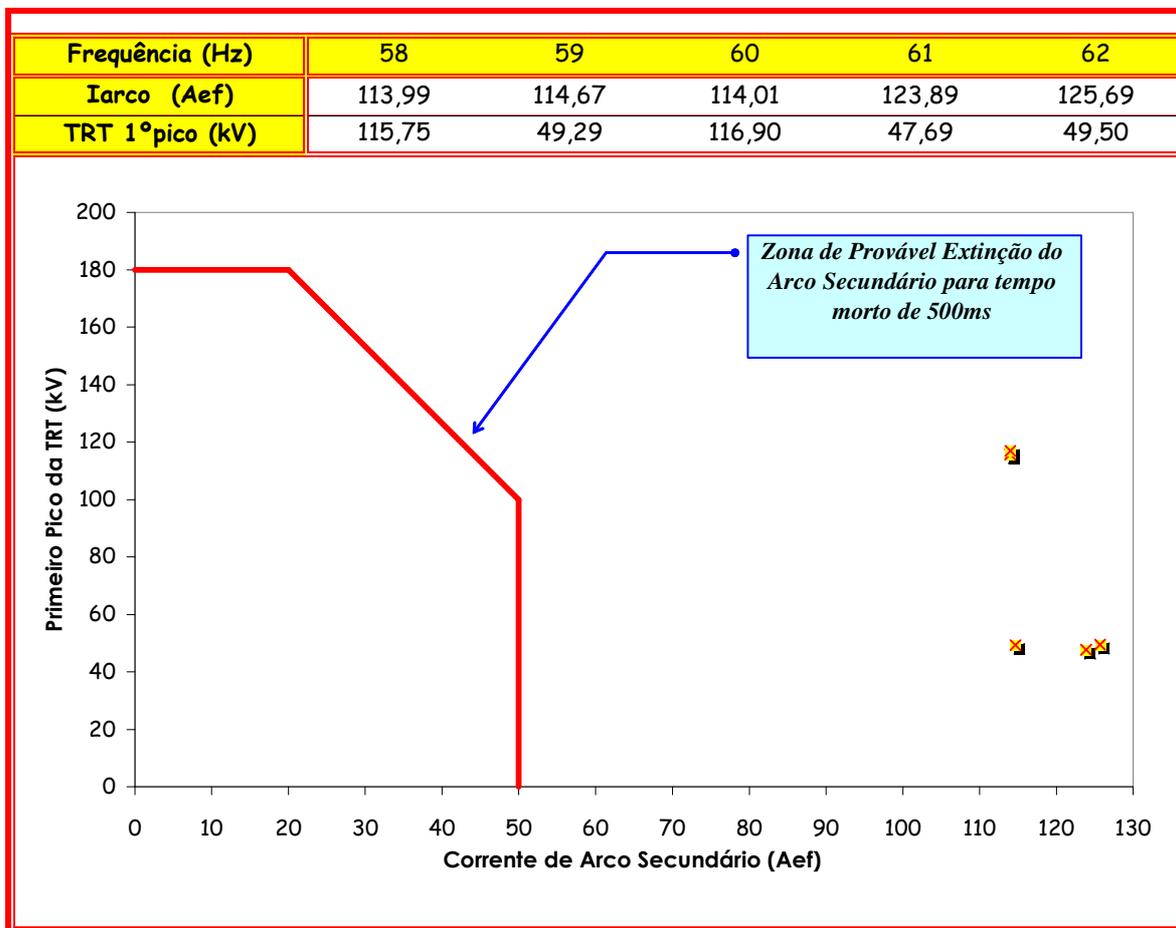


Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
 Contingência : Defeito no meio da LT
 Ano 1, Carga de Emergência

FIGURA A2-2.2



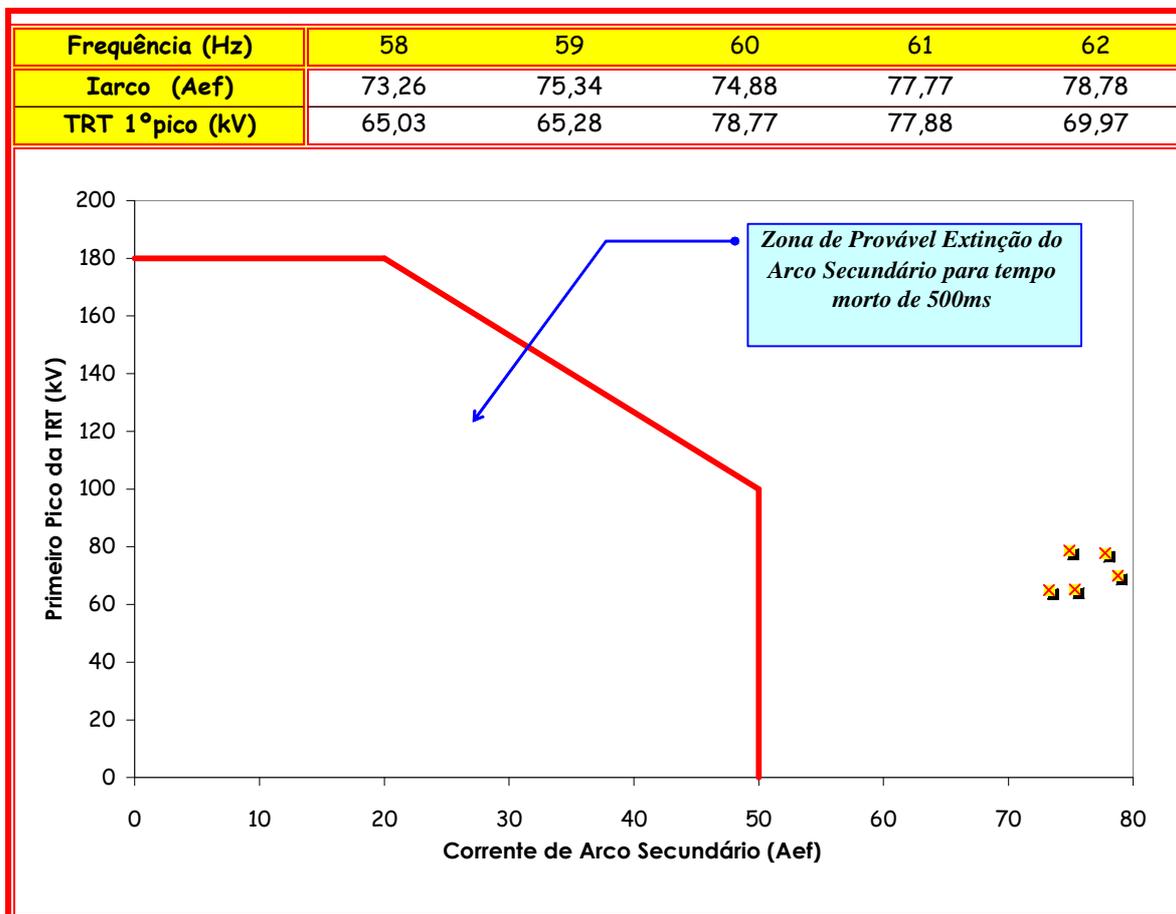
Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
 Contingência : Defeito Monofásico em T2
 Ano 1, Carga de Emergência
FIGURA A2-2.3



Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
Contingência : Defeito Monofásico em T1

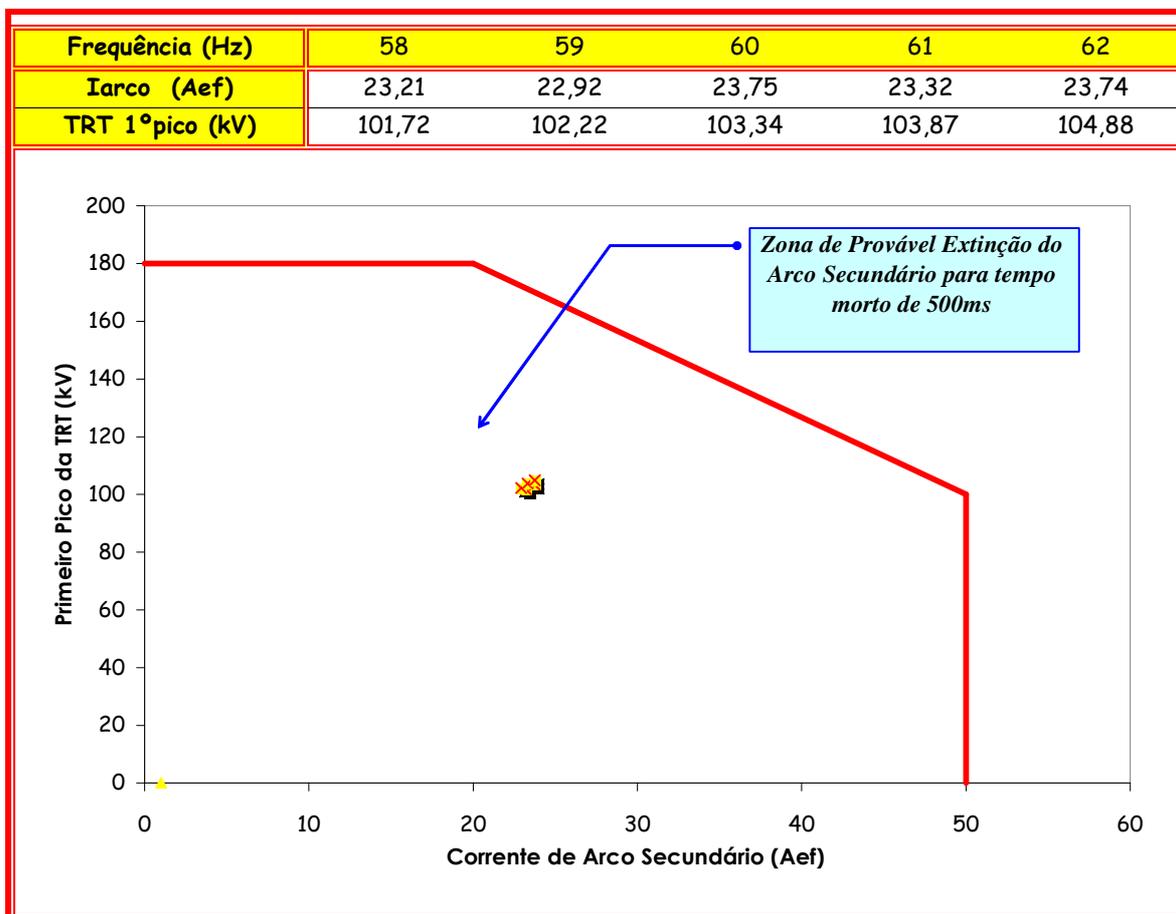
Ano 2

FIGURA A2-2. 4



Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
Contingência : Defeito Monofásico no meio da LT
Ano 2

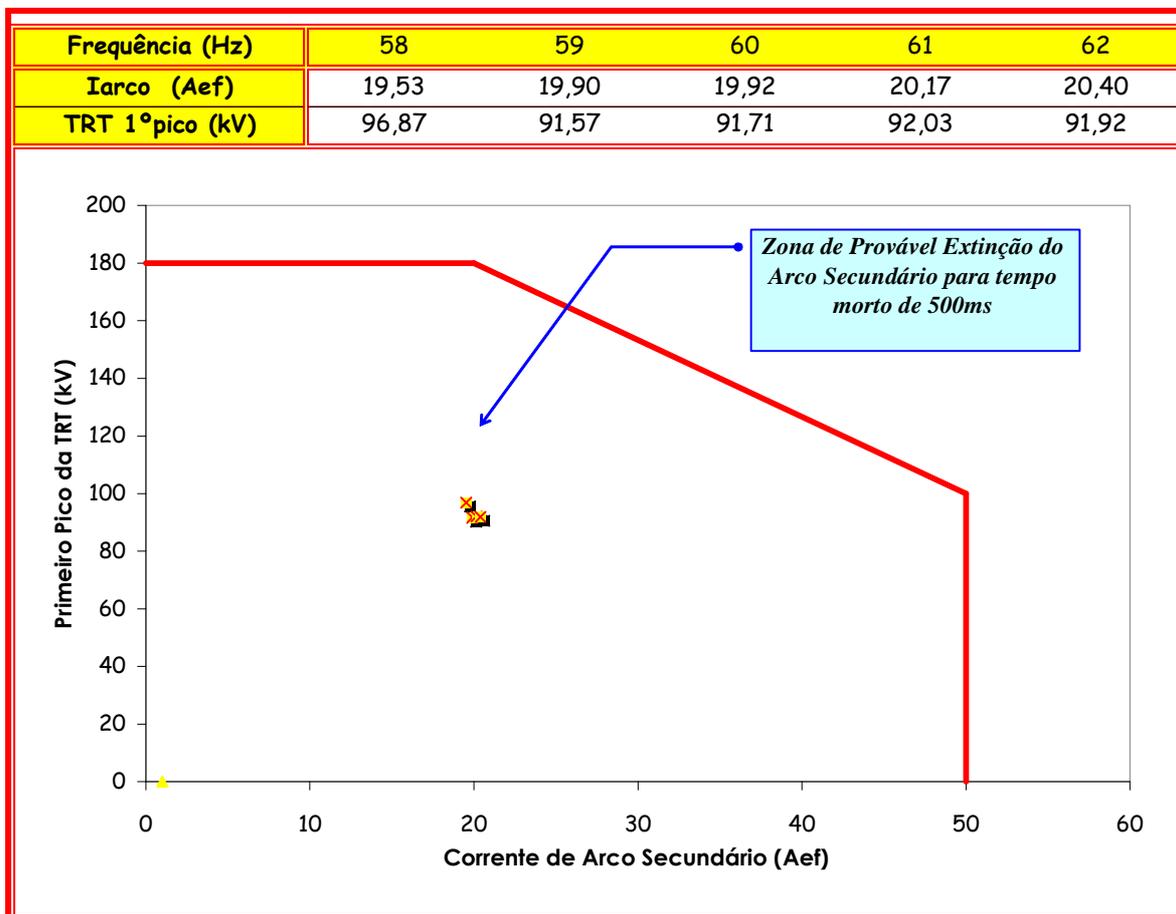
FIGURA A2-2. 5

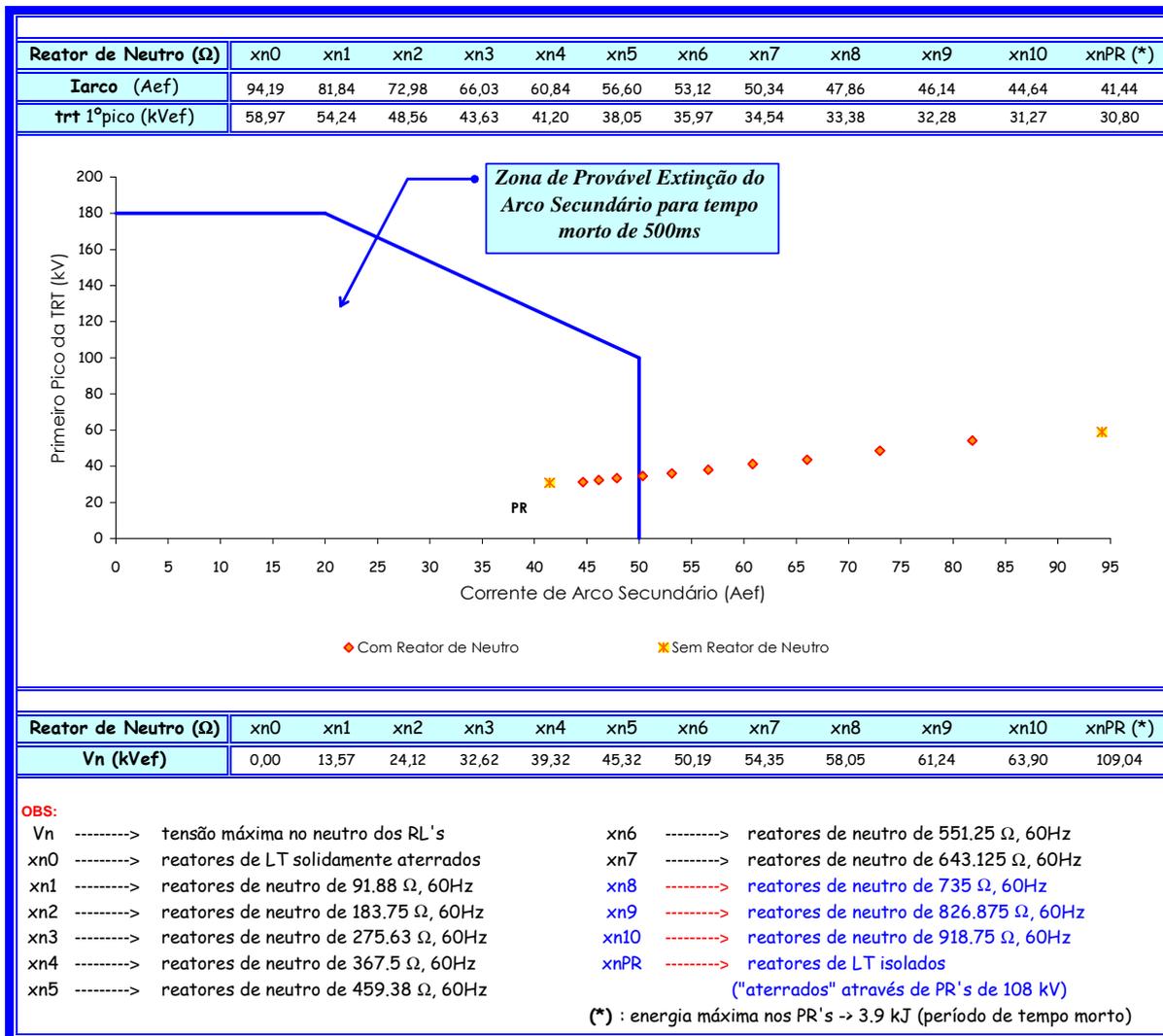


Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
Contingência : Defeito Monofásico em TIn

Ano 2

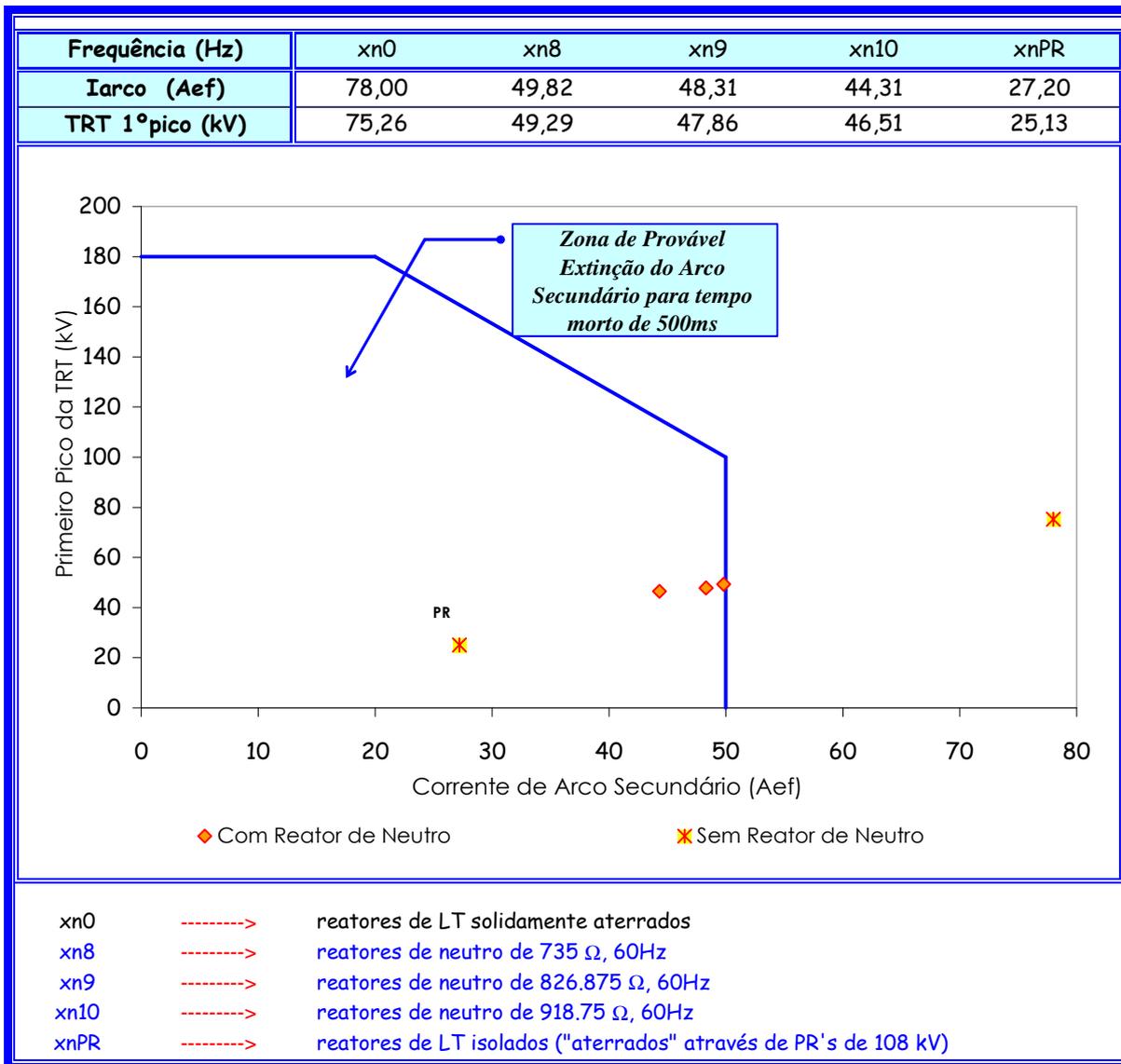
FIGURA A2-2. 6





Obs: Destacados em azul os valores que se encontram dentro da curva limítrofe adotada como critério.

Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
 Contingência : Defeito Monofásico em T1
 Ano 1, Carga Pesada
 Variação dos Reatores de Neutro
FIGURA A2-2. 8



Regime Transitório / Critério 1 da ANEEL
 Contingência : Defeito Monofásico em T1
 Ano 2, Carga Pesada
 Variação dos Reatores de Neutro
FIGURA A2-2. 9

► **Resultados no ANEXO 2- 3**

*Medições da Corrente de Arco Secundário e Tensão Induzida nas Extremidades da Fase Aberta, **Regime Permanente**. Freqüência Fundamental (de 58 Hz a 62 Hz), Defeito Monofásico em Terminal 1*

TABELA A2-3.1	<i>Valores de Reatores de Neutro que atendem aos critérios estabelecidos para Regime Permanente, 60 Hz.</i>
FIGURA A2-3.1	<i>Corrente de Arco Secundário x Reator de Neutro (60 Hz)</i>
FIGURA A2-3.2	<i>Tensão Induzida na Fase Aberta (Terminal 2) x Reator de Neutro (60 Hz)</i>
FIGURA A2-3.3	<i>Tensão no Reator de Neutro (Terminal 2) x Reator de Neutro (60 Hz)</i>
FIGURA A2-3.4	<i>Corrente de Arco Secundário x Reator de Neutro (58 Hz < f < 62 Hz)</i>
FIGURA A2-3.5	<i>Tensão Induzida na Fase Aberta (Terminal 2) x Reator de Neutro (58 Hz < f < 62 Hz)</i>
FIGURA A2-3.6	<i>Tensão no Reator de Neutro x Reator de Neutro (58 Hz < f < 62 Hz)</i>
TABELA A2.3.7	<i>Resultados em Regime Permanente dos Valores Selecionados a partir da Análise Transitória (Critério 1 da ANEEL)</i>

$Z_{xn} (\Omega)$	zh/zd	VT2(kVef)	Iarc(Aef)	VnT1 (kVef)	VnT2(kVef)
0,37 +j 91,88	1,15	13,87	44,77	10,74	13,87
0,74 +j 183,75	1,30	24,64	39,24	20,45	24,64
1,10 +j 275,63	1,45	33,24	34,87	29,19	33,24
1,47 +j 367,50	1,60	40,53	31,34	37,02	40,26
1,84 +j 459,38	1,75	46,10	28,44	44,06	46,10
2,21 +j 551,25	1,90	51,04	26,03	50,40	51,04
2,57 +j 643,13	2,05	55,28	24,00	56,12	55,28
2,94 +j 735,00	2,20	58,94	22,27	61,31	58,94
3,31 +j 826,88	2,35	62,14	20,80	66,04	62,14
3,68 +j 918,75	2,50	64,97	19,52	70,35	64,97

Zxn : valor da reatância do reator de neutro para 60 Hz
 VT2 : tensão induzida na fase aberta em T2
 Iarc: corrente de arco secundário
 VnT1 e VnT2 : tensão no neutro dos reatores em T1 e T2 , respectivamente.
 Obs : $j = \sqrt{-1}$

TABELA A2-3.1

VALORES DE REATORES DE NEUTRO QUE ATENDEM AOS CRITÉRIOS ESTABELECIDOS PARA REGIME PERMANENTE, 60 HZ.

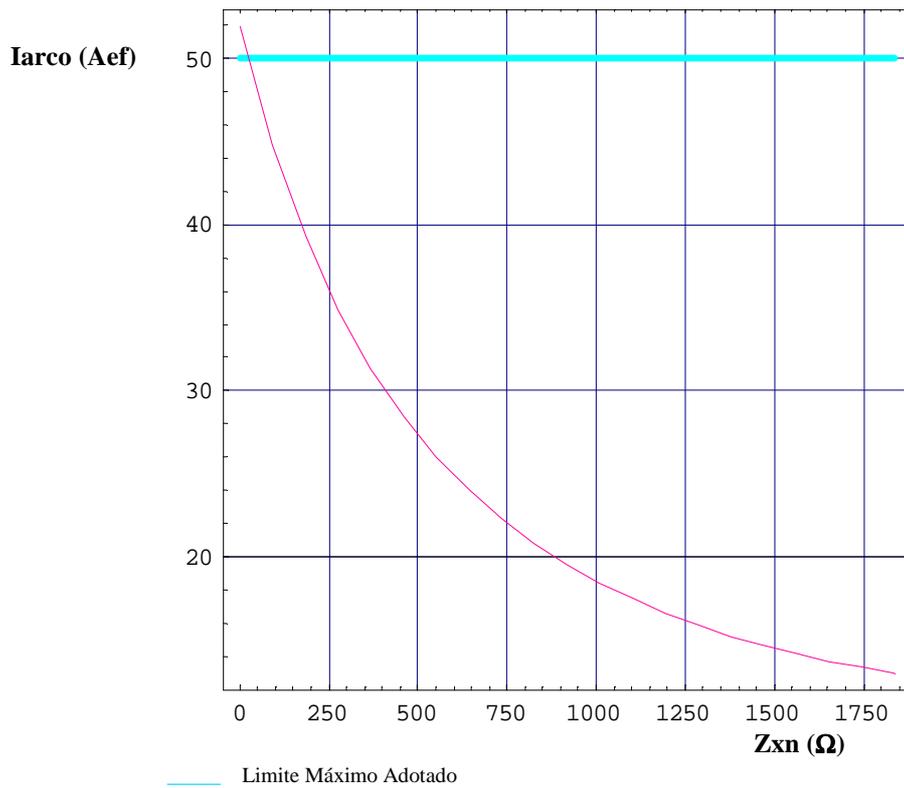


FIGURA A2-3.1 - Corrente de Arco Secundário x Reator de Neutro (60 Hz)

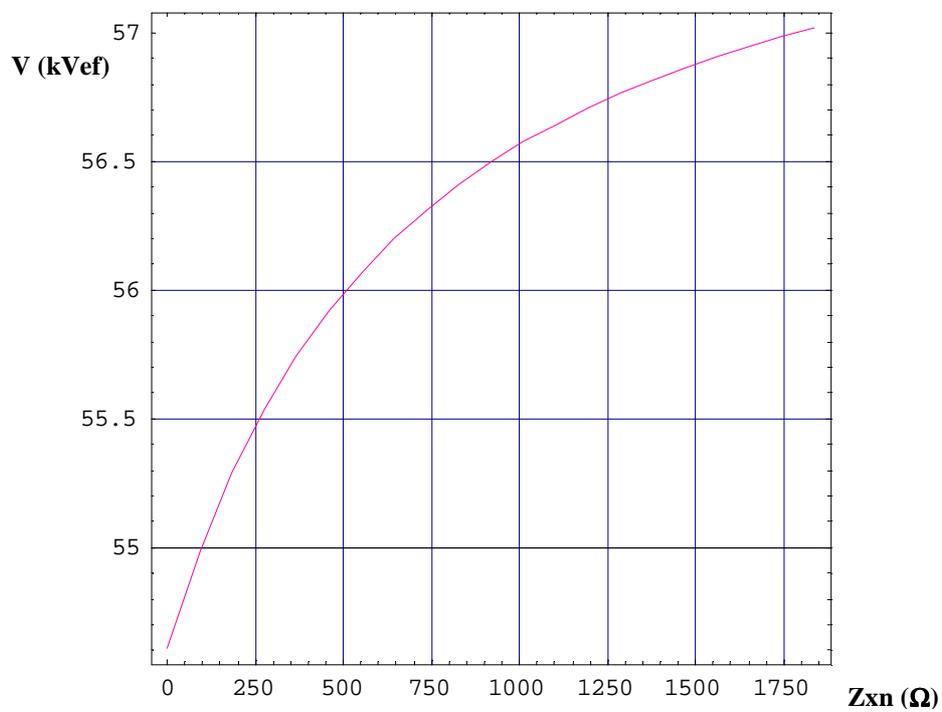


FIGURA A2-3.2 - Tensão Induzida na Fase Aberta (T2) x Reator de Neutro (60 Hz)

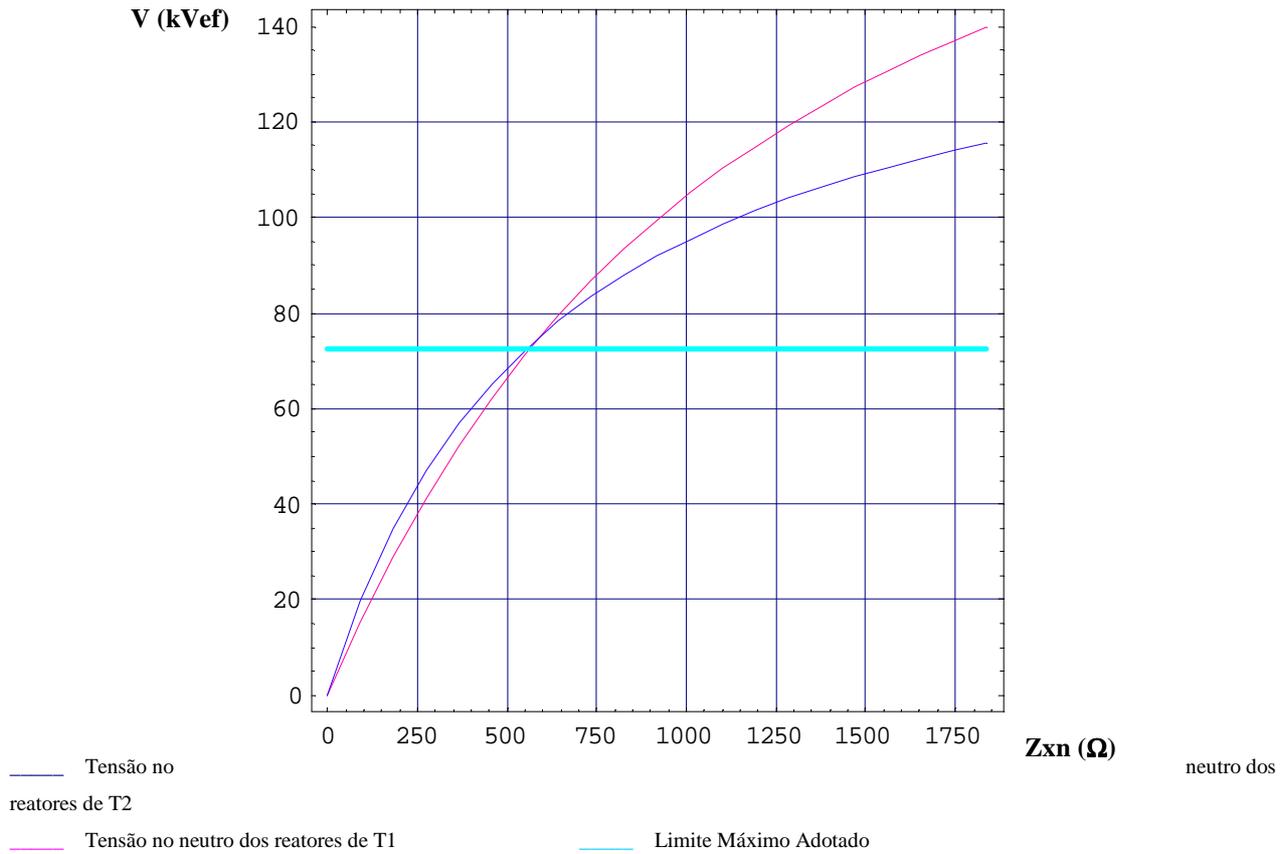


FIGURA A2-3.3 - Tensão no Reator de Neutro (T2) x Reator de Neutro (60 Hz)

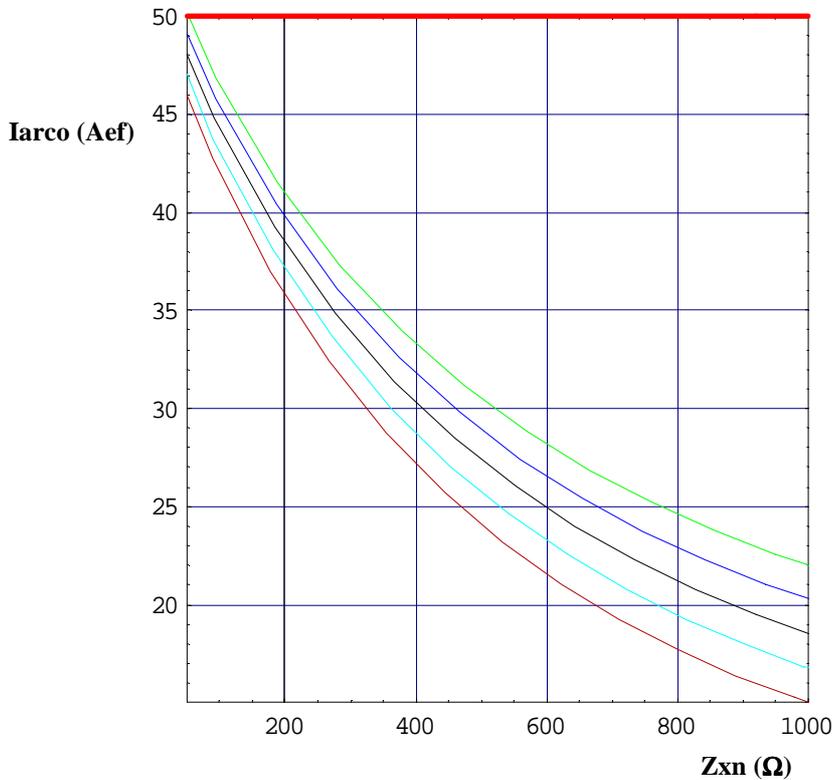
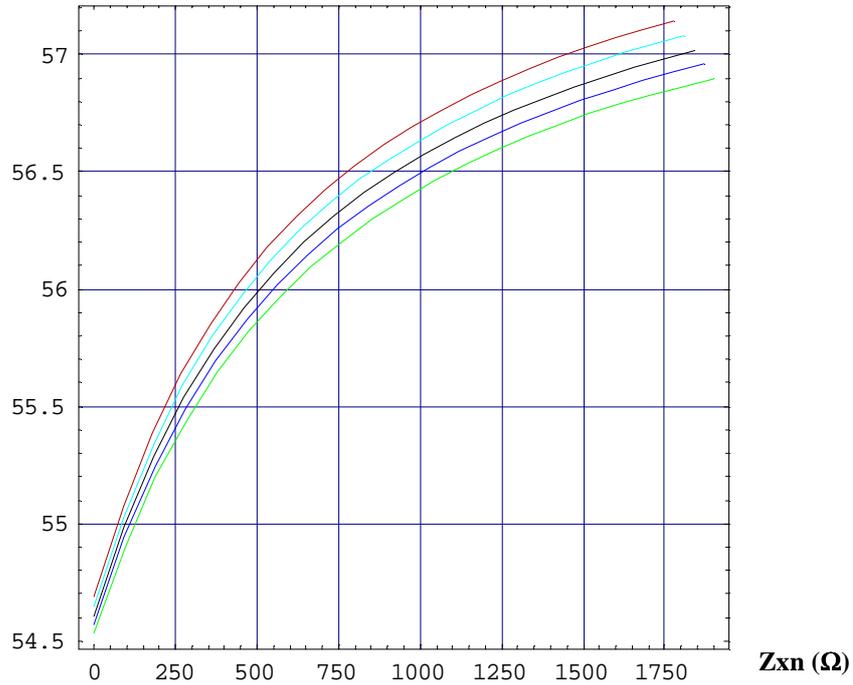
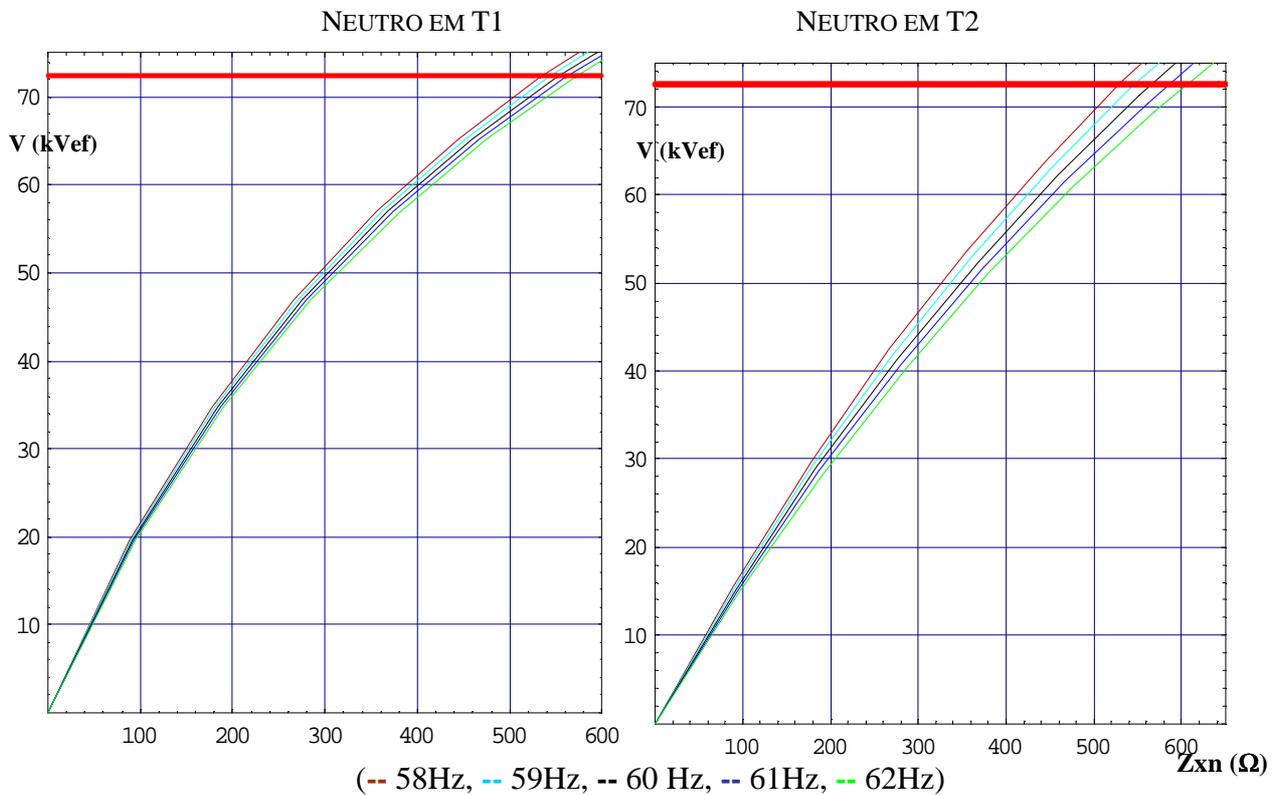


FIGURA A2-3.4 - Corrente de Arco Secundário x Reator de Neutro
 (--- 58Hz, --- 59Hz, --- 60 Hz, --- 61Hz, --- 62Hz)



(-- 58Hz, -- 59Hz, -- 60 Hz, -- 61Hz, -- 62Hz)

FIGURA A2-3.5 - Tensão Induzida na Fase Aberta (T2) x Reator de Neutro



(-- 58Hz, -- 59Hz, -- 60 Hz, -- 61Hz, -- 62Hz)

FIGURA A2-3.6 - Tensão no Reator de Neutro x Reator de Neutro

f(Hz) \ Xn→	Iarco (Aef)			VnT1(kVef)			VnT2(kVef)			ViT2(kVef)		
	735 Ω	827 Ω	919 Ω	735 Ω	827 Ω	919 Ω	735 Ω	827 Ω	919 Ω	735 Ω	827 Ω	919 Ω
58	19,268	17,725	16,400	62,752	67,569	71,966	58,947	62,151	64,977	39,899	39,969	40,032
59	20,778	19,269	17,970	62,040	66,810	71,165	58,943	62,147	64,972	39,858	39,928	39,990
60	22,274	20,796	19,523	61,314	66,037	69,643	58,939	62,143	64,968	39,818	39,888	39,949
61	23,757	22,308	21,058	60,574	65,249	69,519	58,936	62,140	64,964	39,780	39,849	39,889
62	25,227	23,805	22,577	59,813	65,154	68,673	58,934	62,137	64,962	39,742	39,811	39,871

Iarco : corrente de arco secundário
VnT1 : tensão no neutro dos reatores em T1
VnT2 : tensão no neutro dos reatores em T2
ViT2 : tensão induzida na fase aberta (em T2)

TABELA A2-3.2
RESULTADOS EM REGIME PERMANENTE DOS VALORES SELECIONADOS A PARTIR DA
ANÁLISE TRANSITÓRIA (Critério 1 da ANEEL)

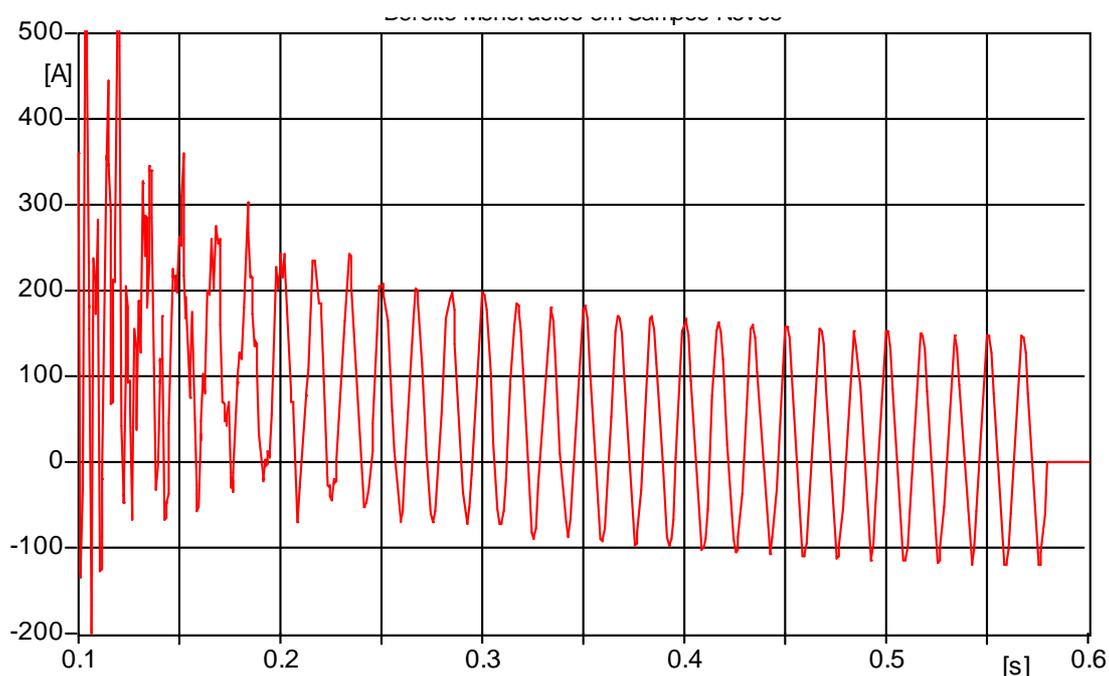
OSCILOGRAMAS:

► Resultados no ANEXO 4-4:

Corrente de Arco Secundário, Tensão Induzida na Fase Aberta, Regime Transitório.

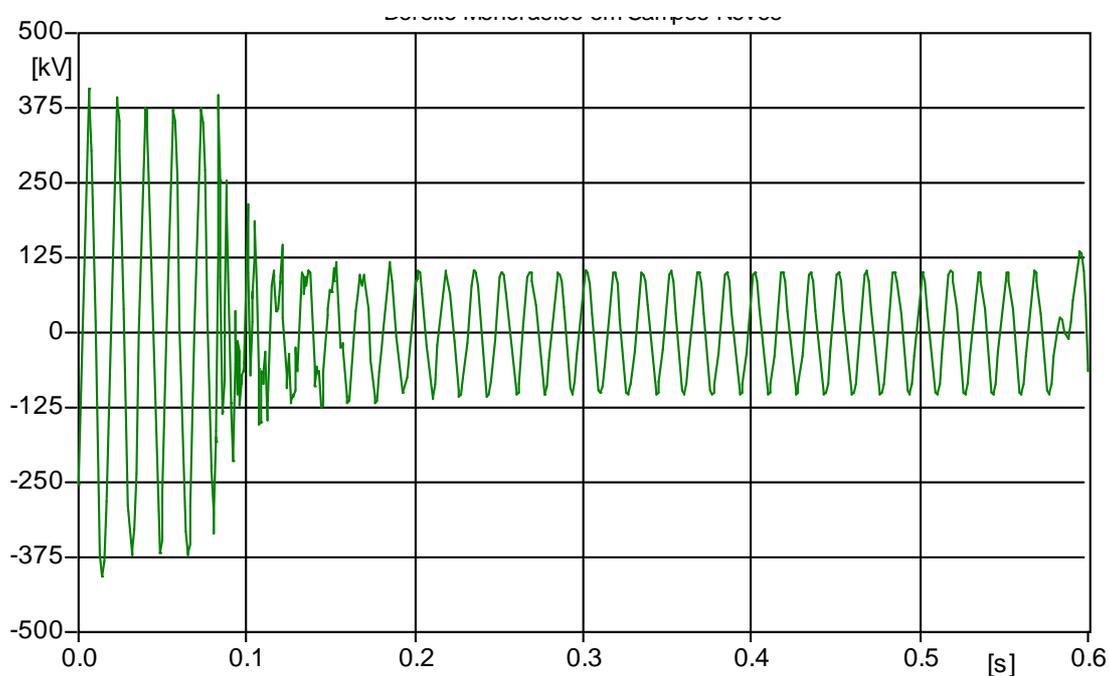
FIGURA	ANO	LT	LOCAL DE DEFEITO	ATERRAMENTO DOS RL'S	GRANDEZA APRESENTADA
A4-1	1	T1 – T2B	T1	Sólido	Iarco
A4-2	1	T1 – T2B	T1	Sólido	Vind
A4-3	1	T1 – T2B	T2	Sólido	Iarco
A4-4	1	T1 – T2B	T2	Sólido	Vind
A4-5	2	T1 – TIn	T1	Sólido	Iarco
A4-6	2	T1 – TIn	T1	Sólido	Vind
A4-7	2	T1 – TIn	TIn	Sólido	Iarco
A4-8	2	T1 – TIn	TIn	Sólido	Vind
A4-9	2	TIn- T2	TIn	Sólido	Iarco
A4-10	2	TIn- T2	TIn	Sólido	Vind
A4-11	2	TIn- T2	T2	Sólido	Iarco
A4-12	2	TIn- T2	T2	Sólido	Vind
A4-13	1	T1 – T2B	*	j 918,75 Ω	Vind
A4-14	1	T1 – T2B	*	j 918,75 Ω	Vn
A4-15	1	T1 – T2B	*	j 918,75 Ω	In
A4-16	2	T1 – TIn	*	j 918,75 Ω	Vind
A4-17	2	T1 – TIn	*	j 918,75 Ω	Vn
A4-18	2	T1 – TIn	*	j 918,75 Ω	In
A4-19	2	T1 – TIn	*	j 918,75 Ω	Vind
A4-20	2	T1 – TIn	*	j 918,75 Ω	Vn
A4-21	2	T1 – TIn	*	j 918,75 Ω	In

T1: Terminal 1 **In :** Corrente de Neutro * : sem defeito
TIn: Terminal intermediário **Vind :** Tensão Induzida na Fase Aberta, durante o arco secundário
T2: Terminal 2 **Iarco :** Corrente de Arco Secundário **Obs :** $j = \sqrt{-1}$



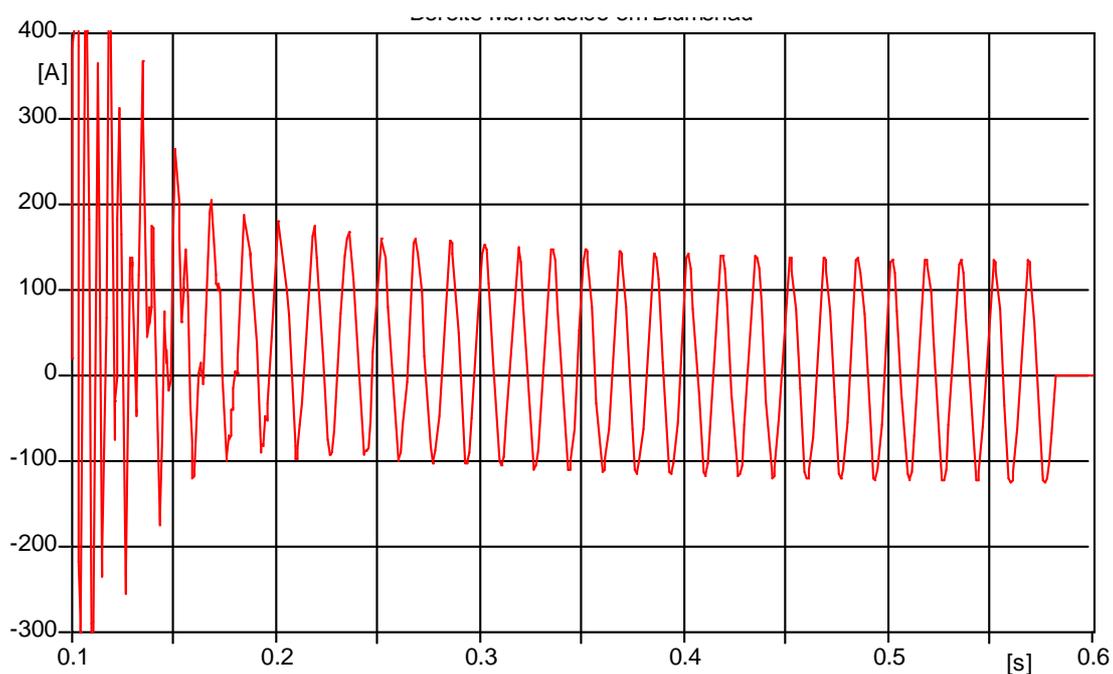
Ano 1, Defeito Monofásico em T1
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Corrente de Arco Secundário

FIGURA A2-4.1



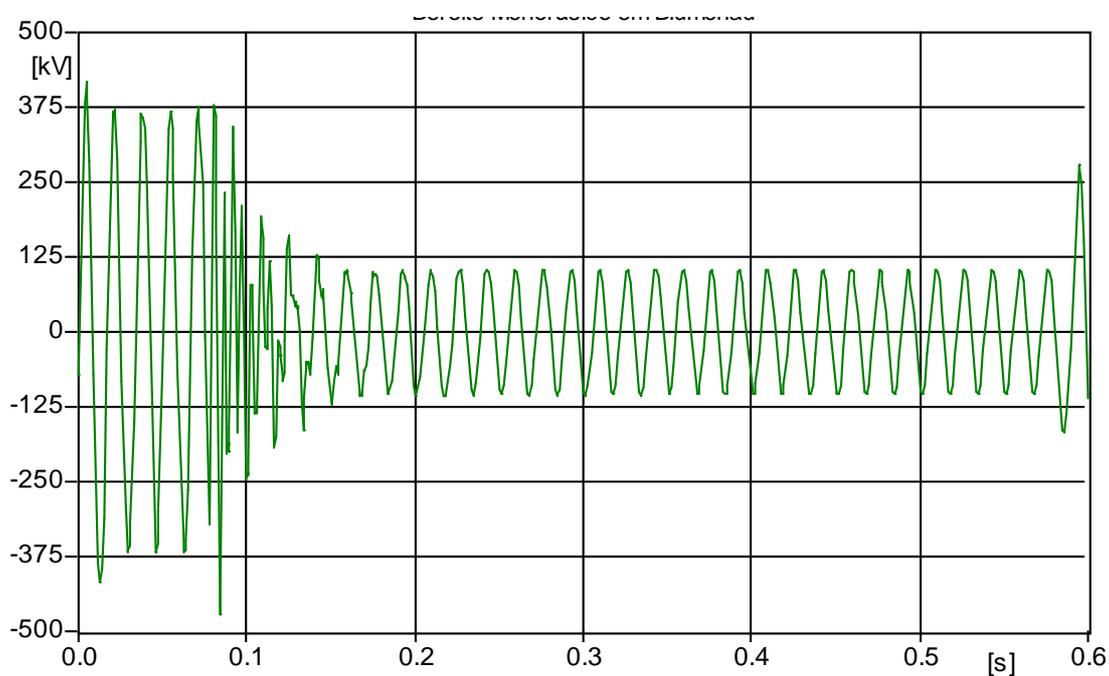
Ano 1, Defeito Monofásico em T1
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Tensão Induzida na Fase Aberta durante o Arco

FIGURA A2-4.2



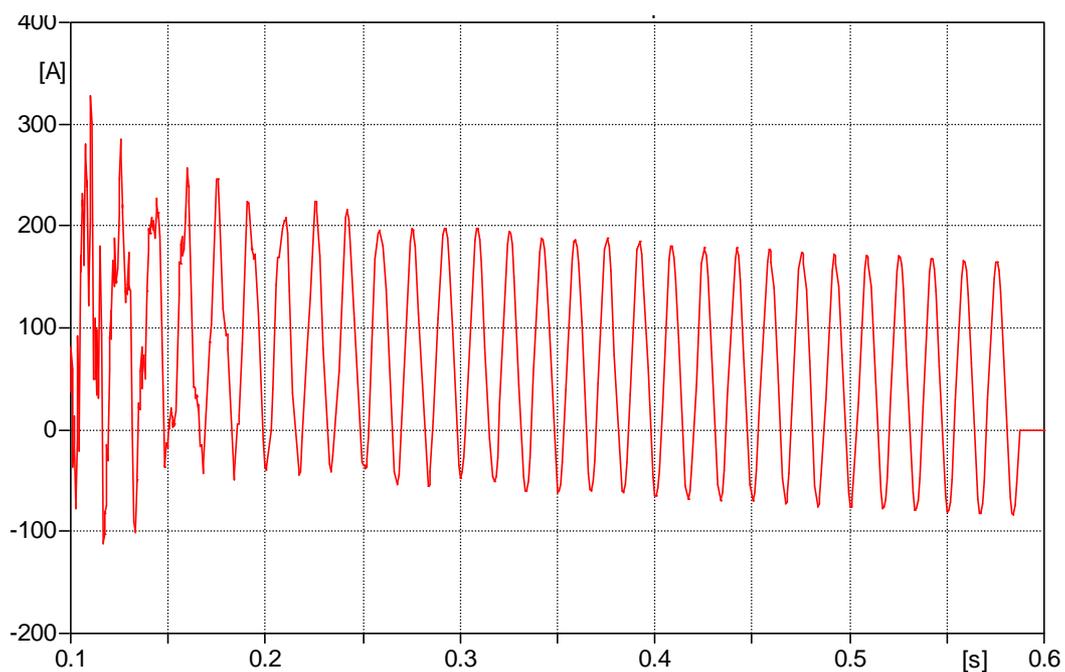
Ano 1, Defeito Monofásico em T2
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Corrente de Arco Secundário

FIGURA A2-4.3



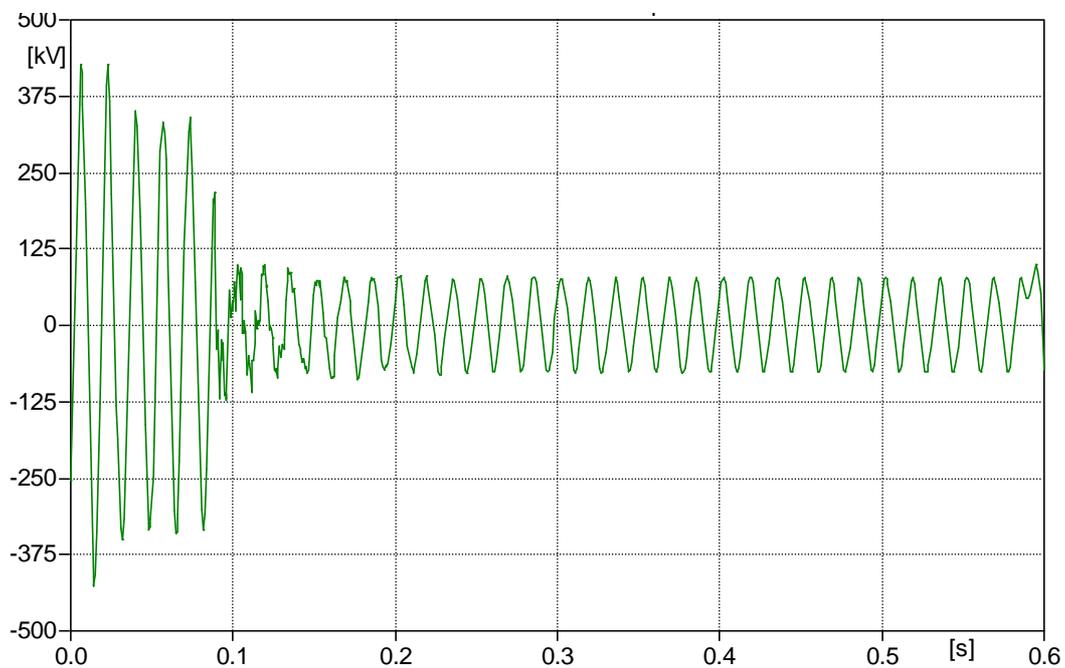
Ano 1, Defeito Monofásico em T2
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Tensão Induzida na Fase Aberta durante o Arco

FIGURA A2-4.4



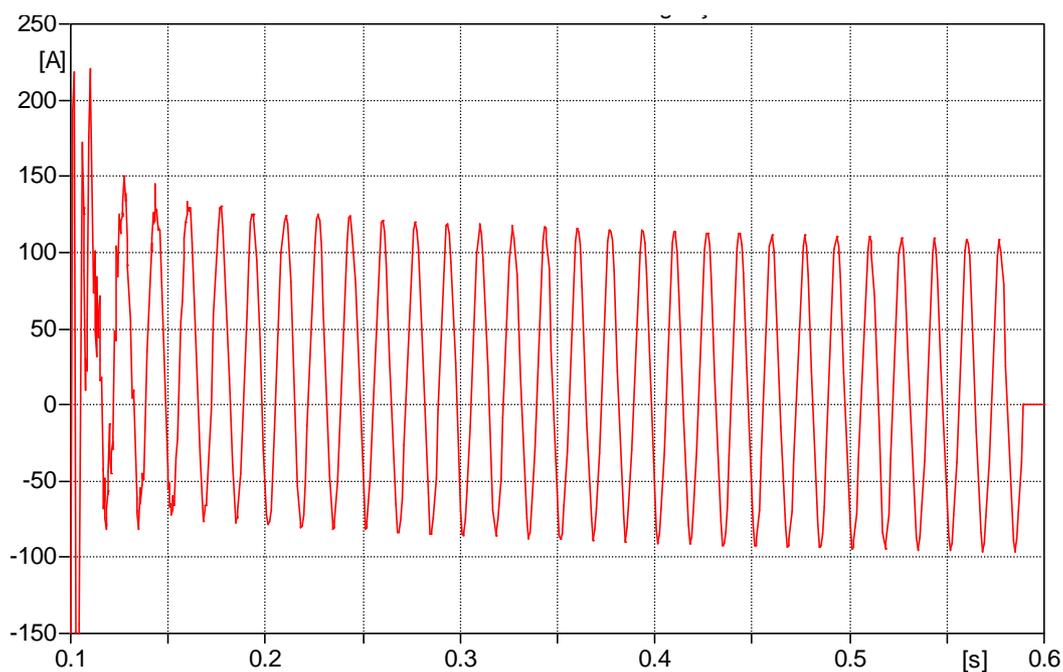
Ano 2 Defeito Monofásico em T1
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Corrente de Arco Secundário

FIGURA A2-4.5



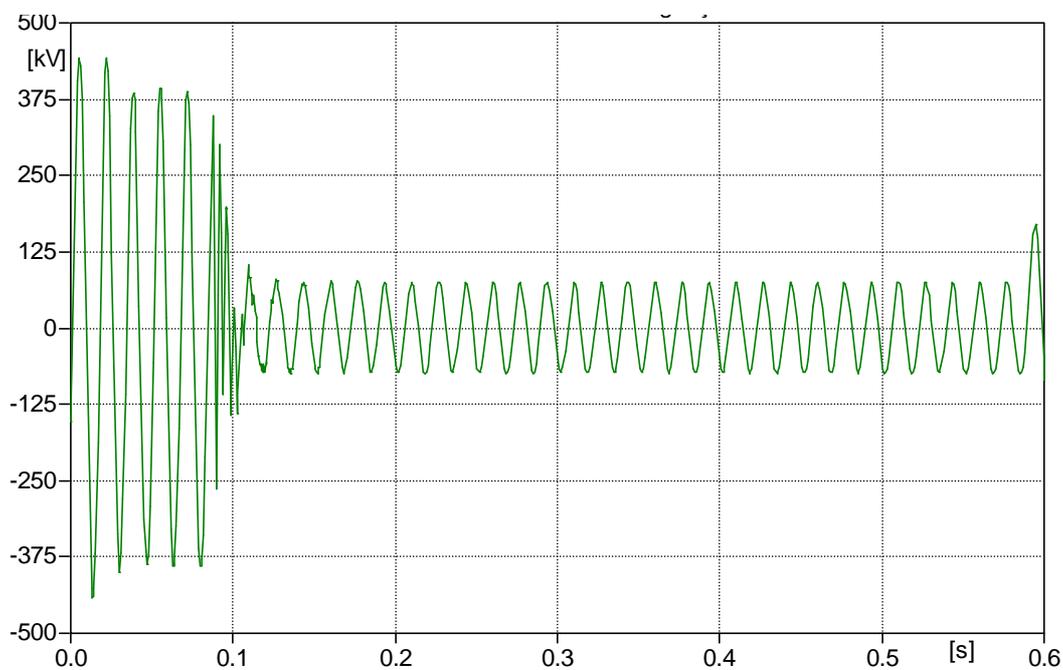
Ano 2 Defeito Monofásico em T1
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Tensão Induzida na Fase Aberta durante o Arco

FIGURA A2-4.6



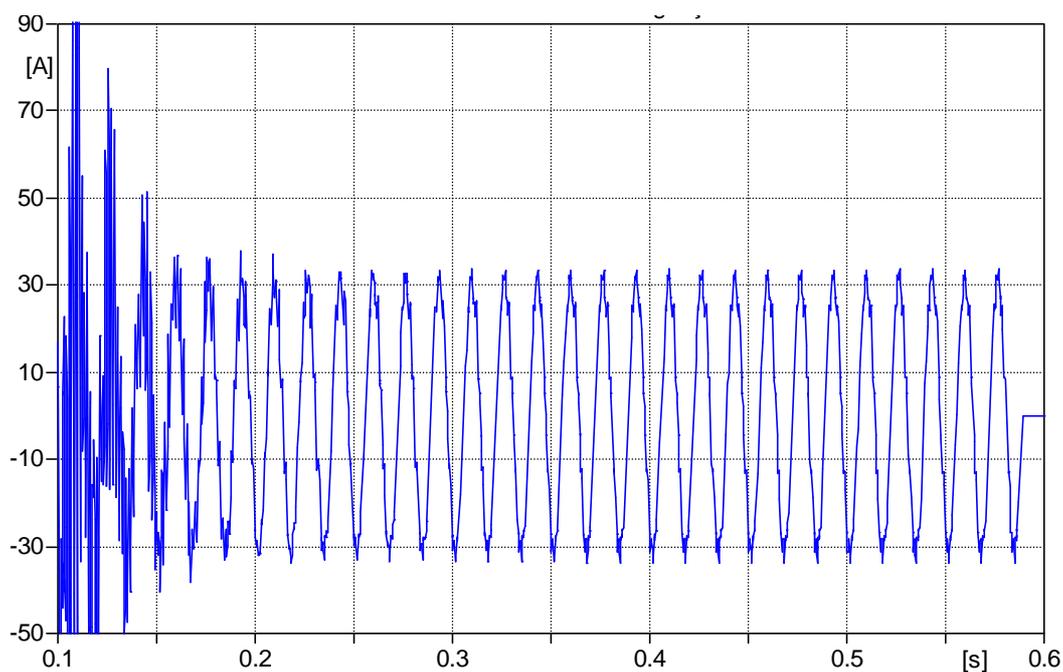
Ano 2 Defeito Monofásico em T2
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Corrente de Arco Secundário

FIGURA A2-4.7



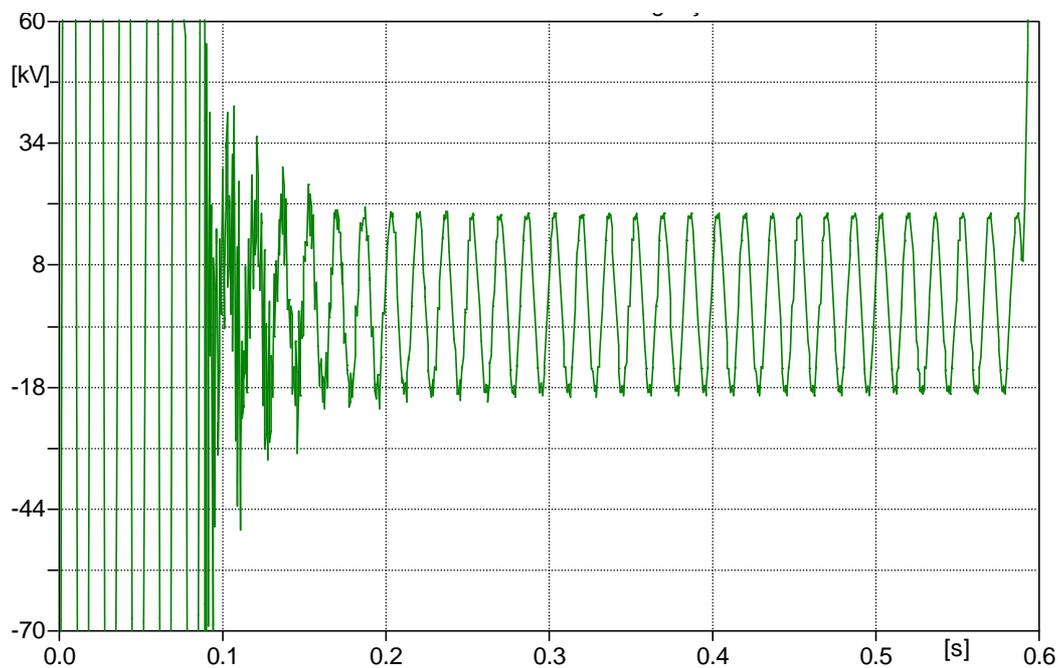
Ano 2 Defeito Monofásico em T2
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Tensão Induzida na Fase Aberta durante o Arco

FIGURA A2-4.8



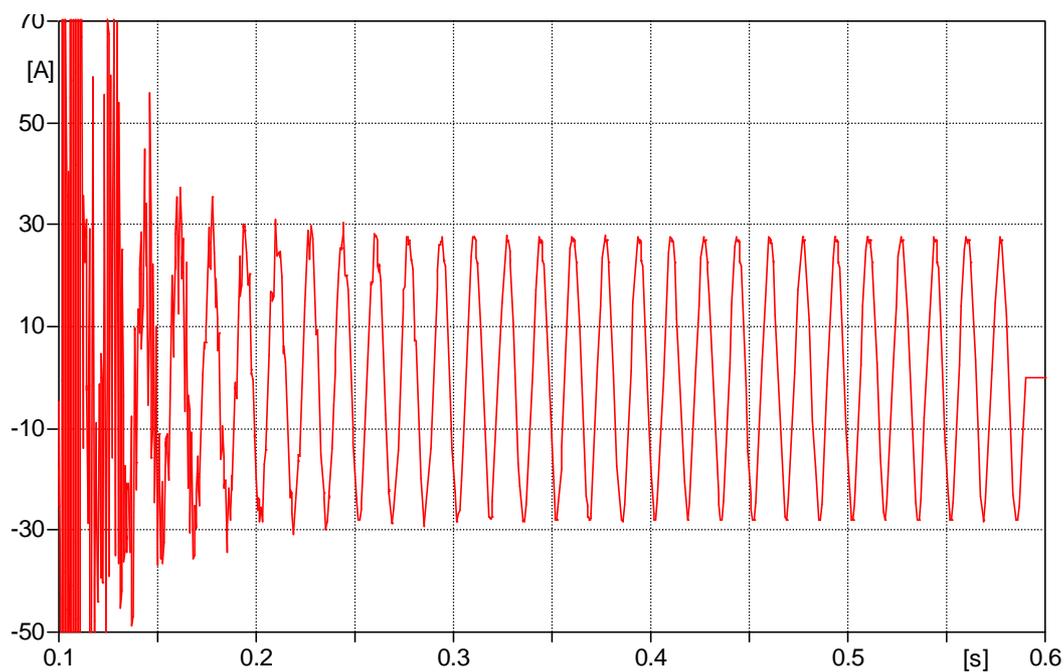
Ano 2, Defeito Monofásico em TIn
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Corrente de Arco Secundário

FIGURA A2-4.9



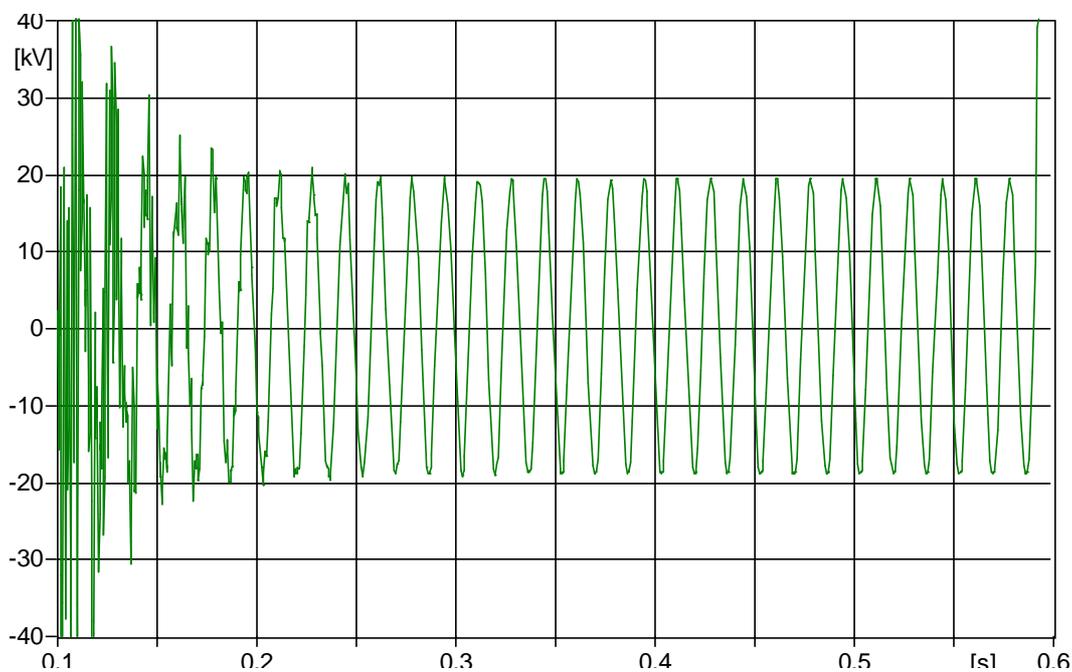
Ano 2, Defeito Monofásico em TIn
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Tensão Induzida na Fase Aberta durante o Arco

FIGURA A2-4.10



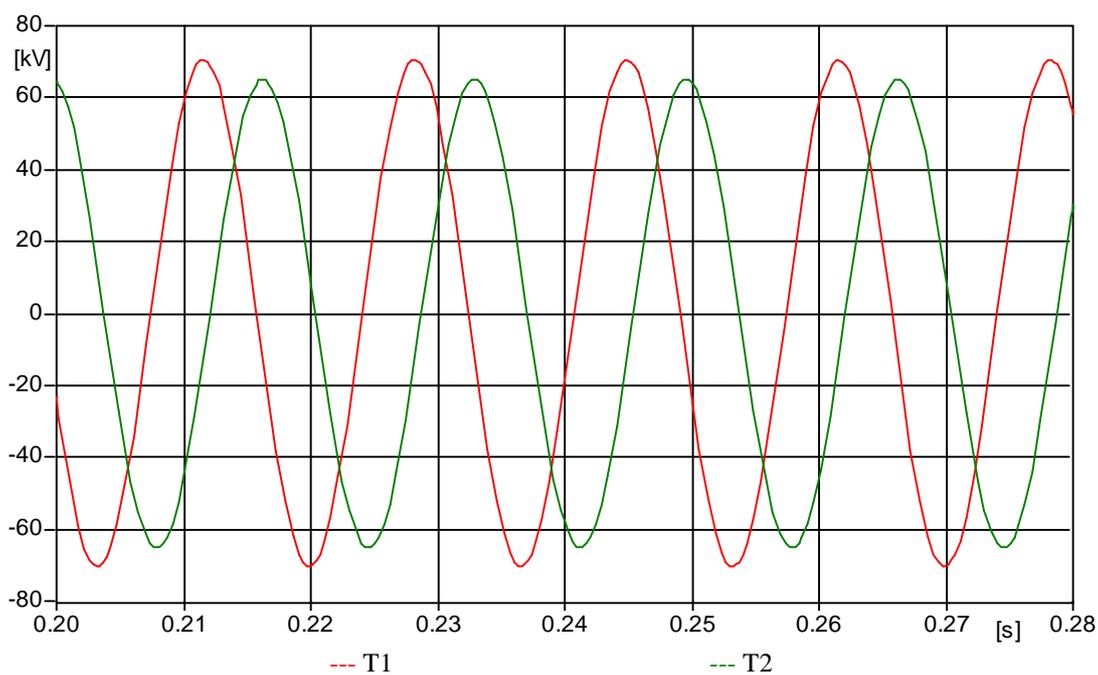
Ano 2, Defeito Monofásico em T2
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Corrente de Arco Secundário

FIGURA A2-4.11

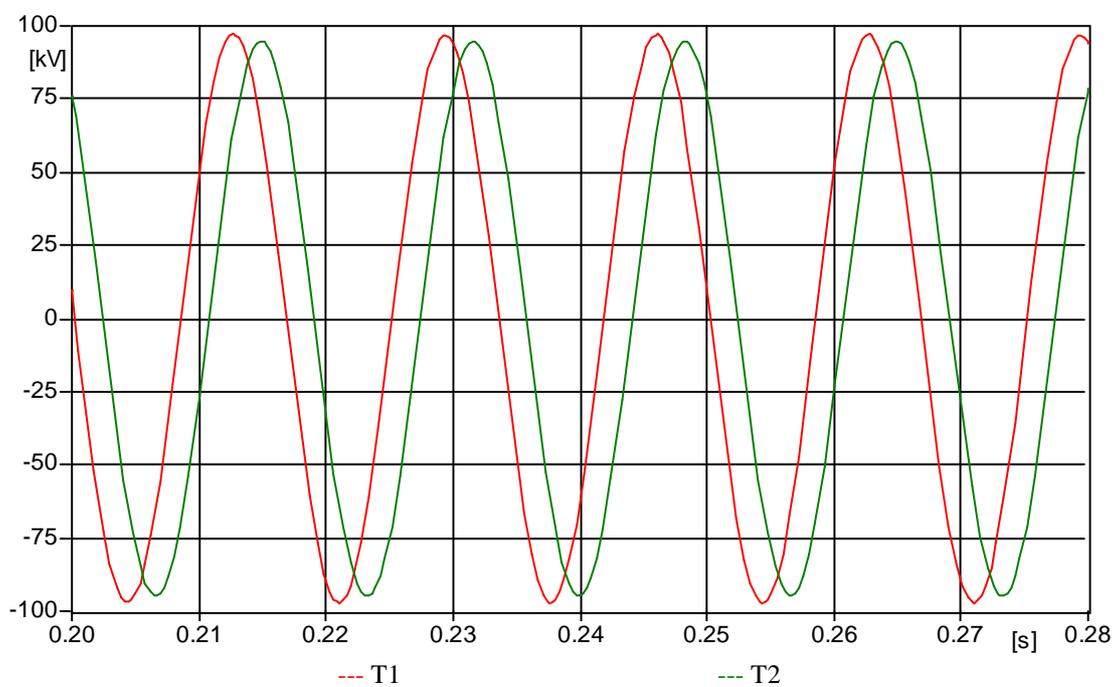


Ano 2, Defeito Monofásico em T2
Aterramento Sólido dos Reatores de Linha
Tensão Induzida na Fase Aberta durante o Arco

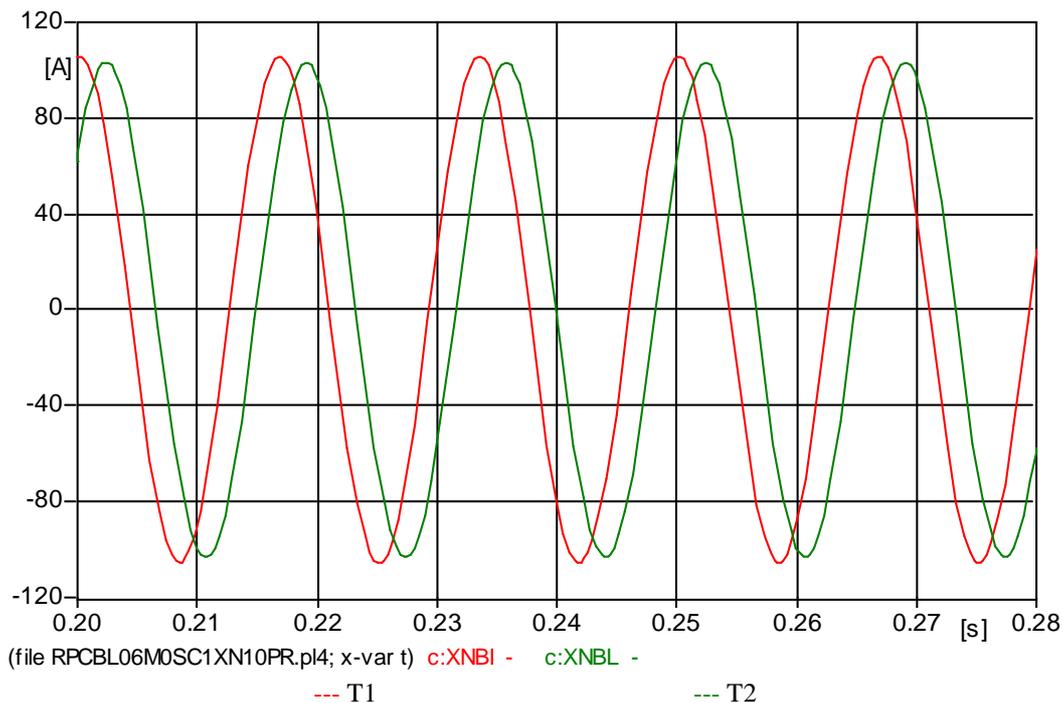
FIGURA A2-4.12



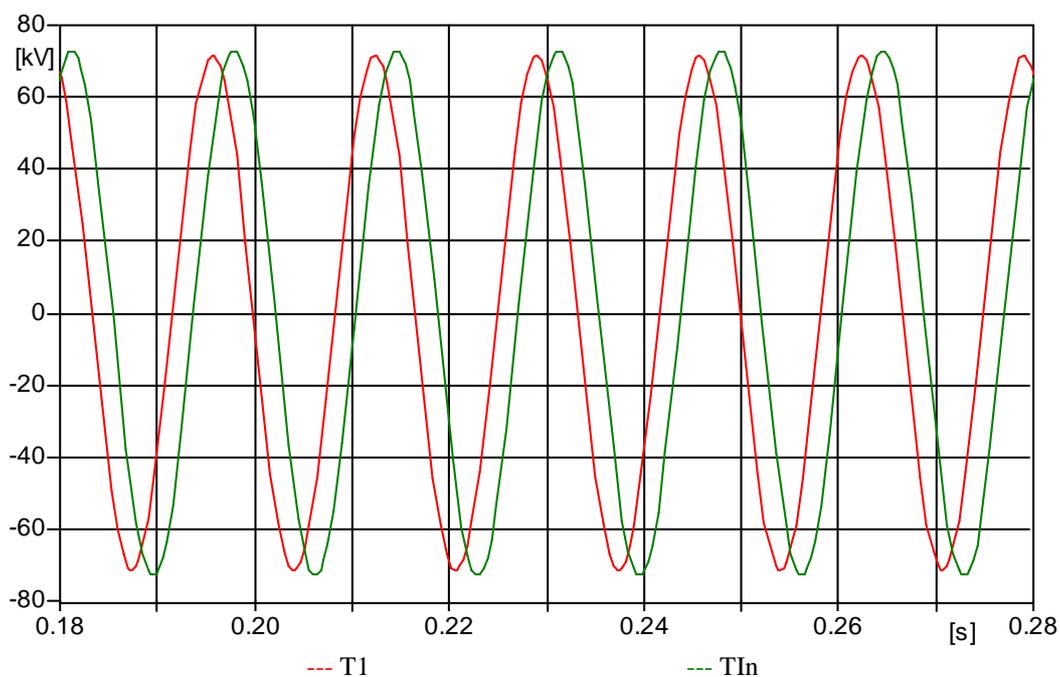
Ano 1.
Reatores de Neutro de 918,75 Ω
Tensão Induzida na Fase Aberta, Ausência de defeito
FIGURA A2-4.13



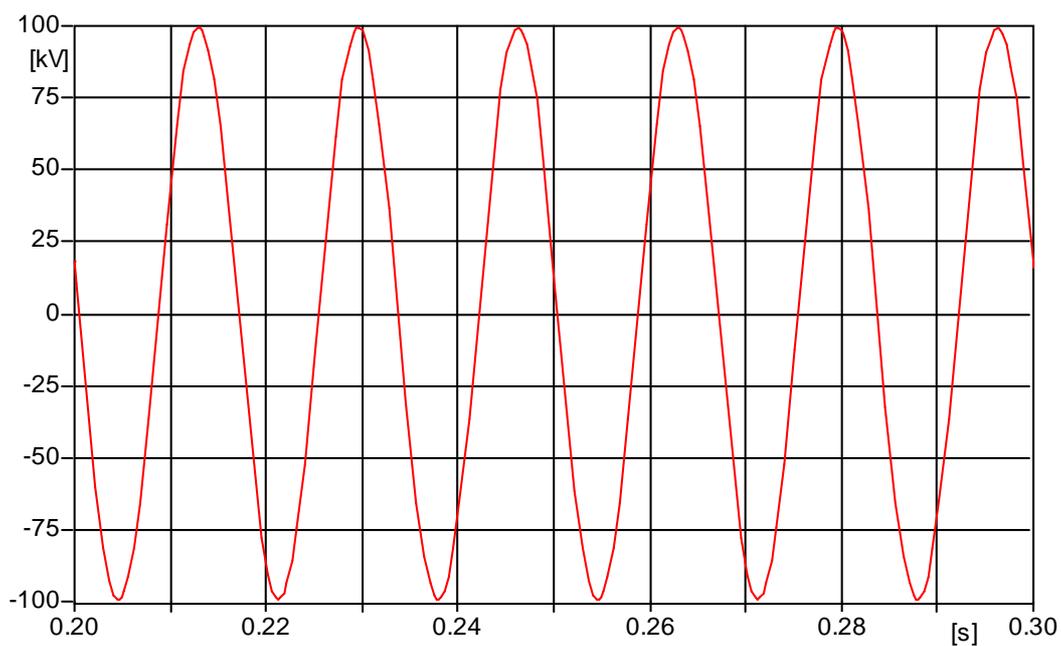
Ano 1.
Reatores de Neutro de 918,75 Ω
Tensão no Reator de Neutro, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.14



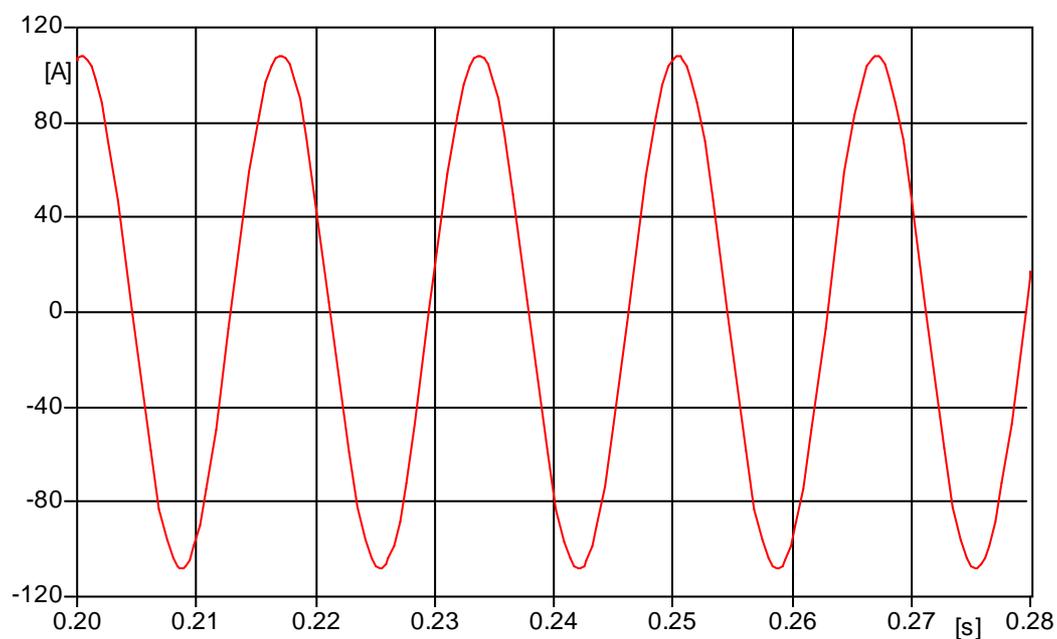
Ano 1
Reatores de Neutro de $918,75 \Omega$
Corrente no Reator de Neutro, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.15



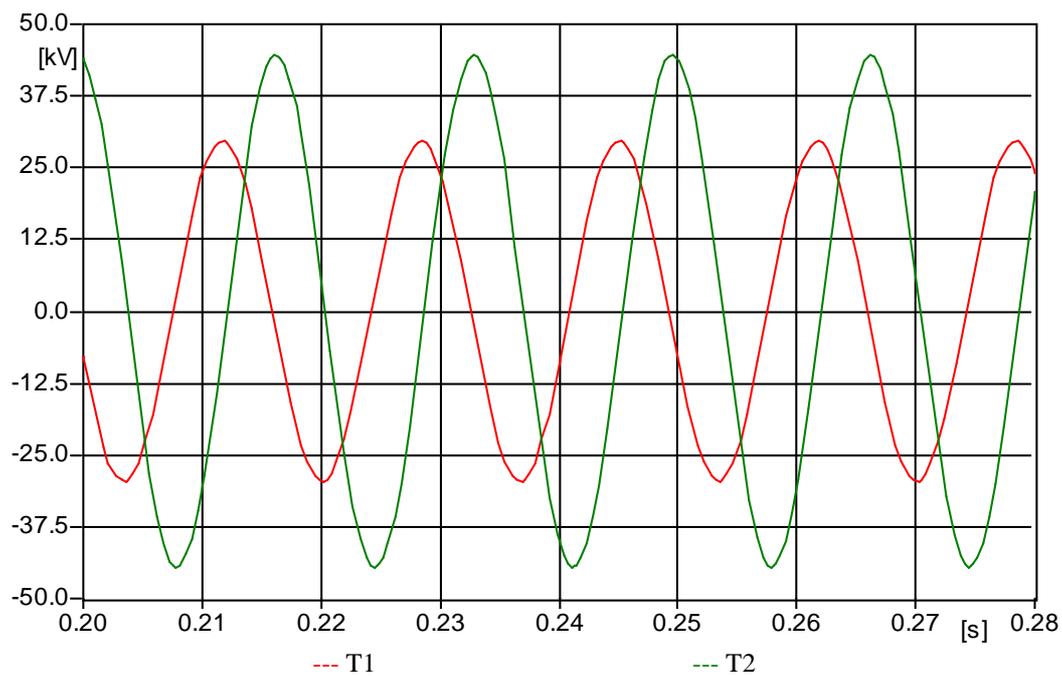
Ano 2
Reatores de Neutro de $918,75 \Omega$
Tensão Induzida na Fase Aberta, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.16



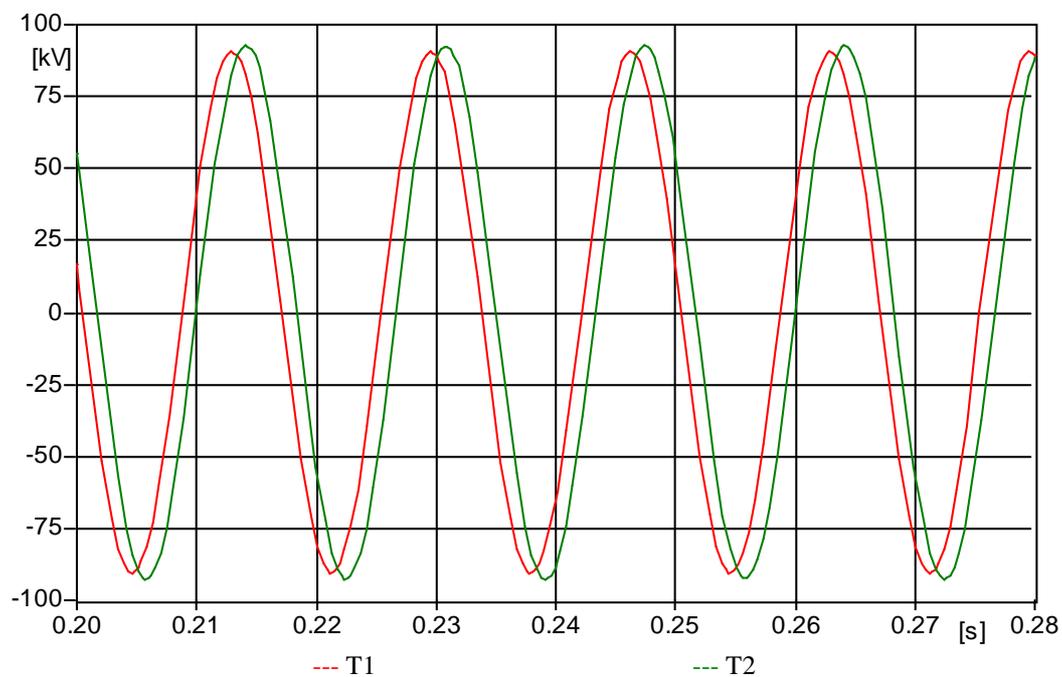
Ano 2
Reatores de Neutro de 918,75 Ω
Tensão no Reator de Neutro, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.17



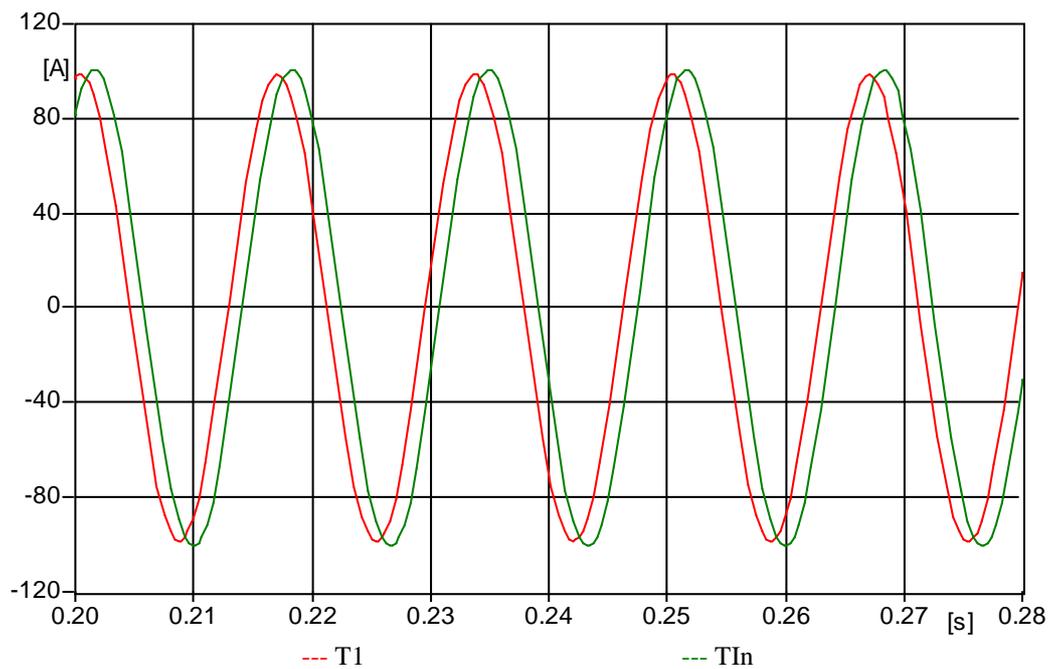
Ano 2
Reatores de Neutro de 918,75 Ω
Corrente no Reator de Neutro, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.18



Ano 2
Reatores de Neutro de 918,75 Ω
Tensão Induzida na Fase Aberta, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.19



Ano 2
Reatores de Neutro de 918,75 Ω
Tensão no Reator de Neutro, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.20



Ano 2
Reatores de Neutro de $918,75 \Omega$
Corrente no Reator de Neutro, Ausência de defeito, sob Manobra Monofásica
FIGURA A2-4.21

► Resultados no ANEXO 2-5:

O Anexo 2-5 visa reunir os resultados em **Regime Permanente** e **Regime Transitório** da solução final, a fim de se estabelecer as características elétricas básicas dos reatores de neutro.

TABELA A2-5.1	Tensão de Neutro dos Reatores (Regime Normal de Operação), Regime Sustentado
TABELA A2-5.2	Corrente de Neutro dos Reatores (Regime Normal de Operação), Regime Sustentado
TABELA A2-5.3	Tensão Induzida na Fase Aberta, Ausência de defeito, Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)
TABELA A2-5.4	Tensão nos Reatores de Neutro, Ausência de defeito, Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)
TABELA A2-5.5	Corrente nos Reatores de Neutro, Ausência de defeito, Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)
TABELA A2-5.6	Tensão Induzida na Fase Aberta, Defeito Monofásico ao Longo da LT Terminal 1 – Terminal 2 II Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)
TABELA A2-5.7	Tensão nos Reatores de Neutro sob Abertura Monofásica, Defeito Monofásico ao Longo da LT T1 –T2 II Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)
TABELA A2-5.8	Corrente nos Reatores de Neutro, Defeito Monofásico ao Longo da LT Terminal 1 – Terminal 2 II Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)

As condições de operação consideradas encontram-se sintetizadas no quadro a seguir, onde doravante em vez de explicitadas nas tabelas e gráficos do presente anexo, serão definidas pela sua respectiva nomenclatura, apresentada na coluna intitulada CASO:

QUADRO A2-5.1 : CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

CASO	ANO	CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO
A5/01	1	Fluxo LT: 1200 MVA
A5/02 – 1	2	Circuito 1 fora de operação, Fluxo LT: 1200 MVA
A5/02 – 2	2	Idem anterior, com entrada dos RL em TIn na abertura monofásica

REGIME NORMAL DE OPERAÇÃO			
TENSÃO MÁXIMA DE NEUTRO (V_{ef})			
CASO	T1	TIn	T2
A5 / 01	26,77	*	30,51
A5 / 02 – 1	42,43	*	*
A5 / 02 – 2	38,89	115,26	*

*Tensão de Neutro dos Reatores sob Regime Normal de Operação,
Regime Sustentado*

TABELA A2-5.1

REGIME NORMAL DE OPERAÇÃO			
CORRENTE SUSTENTADA DE NEUTRO (A_{ef})			
CASO	T1	TIn	T2
A5 / 01	0,029	*	0,032
A5 / 02 – 1	0,028	*	*
A5 / 02 – 2	0,028	0,107	*

*Corrente de Neutro dos Reatores sob Regime Normal de Operação,
Regime Sustentado*

TABELA A2-5.2

REGIME SUSTENTADO, SOB MANOBRA MONOFÁSICA			
TENSÃO INDUZIDA NA FASE ABERTA (kV_{ef})			
CASO	T1	TIn	T2
A5 / 01	49,69	*	46,11
A5 / 02 – 1	50,49	51,52	*
A5 / 02 – 2	20,94	31,47	*

*Tensão Induzida na Fase Aberta, Ausência de defeito
Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)*

TABELA A2-5.3

REGIME SUSTENTADO, SOB MANOBRA MONOFÁSICA			
TENSÃO MÁXIMA DE NEUTRO (kV_{ef})			
CASO	T1	TIn	T2
A5 / 01	68,61	*	67,01
A5 / 02 – 1	70,18	*	*
A5 / 02 – 2	63,93	70,37	*

*Tensão nos Reatores de Neutro, Ausência de defeito
Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)*

TABELA A2-5.4

REGIME SUSTENTADO, SOB MANOBRA MONOFÁSICA			
CORRENTE SUSTENTADA DE NEUTRO (A_{ef})			
CASO	T1	TIn	T2
A5 / 01	74,62	*	72,92
A5 / 02 – 1	76,41	71,26	*
A5 / 02 – 2	69,63	70,97	*

*Corrente nos Reatores de Neutro, Ausência de defeito
Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)*

TABELA A2-5.5

REGIME SUSTENTADO, SOB MANOBRA MONOFÁSICA				
(DEFEITO MONOFÁSICO E FASE ABERTA)				
TENSÃO INDUZIDA MÁXIMA (kV_{ef})				
CASO	Local de defeito	T1	TIn	T2
A5 / 01	T1	0,89	*	60,22
	TIn	59,55	*	15,80
	T2	77,22	*	0,81
A5 / 02 – 1	T1	0,91	41,54	*
	a 134km de T1	24,18	16,84	*
	TIn	43,19	0,89	*
A5 / 02 – 2	T1	0,46	39,75	*
	a 134km de T1	22,42	17,44	*
	TIn	40,91	0,25	*

*Tensão Induzida na Fase Aberta,
Presença de Defeito Monofásico ao Longo da LT,
Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)*

TABELA A2-5.6

REGIME SUSTENTADO, SOB MANOBRA MONOFÁSICA				
(DEFEITO MONOFÁSICO E FASE ABERTA)				
TENSÃO MÁXIMA DE NEUTRO (kV_{ef})				
CASO	Local de defeito	T1	TIn	T2
A5 / 01	T1	59,66	*	64,19
	TIn	64,49	*	59,24
	T2	67,10	*	59,22
A5 / 02 – 1	T1	60,40	*	*
	a 134km de T1	61,23	*	*
	TIn	61,87	*	*
A5 / 02 – 2	T1	60,22	62,76	*
	a 134km de T1	61,38	63,04	*
	TIn	62,13	56,88	*

*Tensão nos Reatores de Neutro sob Abertura Monofásica,
Presença de Defeito Monofásico ao Longo da LT
Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)*

TABELA A2-5.7

REGIME SUSTENTADO, SOB MANOBRA MONOFÁSICA (DEFEITO MONOFÁSICO E FASE ABERTA)				
CORRENTE MÁXIMA DE NEUTRO (Aef)				
CASO	Local de defeito	T1	TIn	T2
A5 / 01	T1	64,93	*	70,00
	TIn	70,12	*	64,50
	T2	73,02	*	64,46
A5 / 02 – 1	T1	65,76	*	*
	a 134km de T1	66,65	*	*
	TIn	67,39	*	*
A5 / 02 – 2	T1	65,57	68,39	*
	a 134km de T1	67,18	68,23	*
	TIn	67,72	66,65	*

*Corrente Sustentada nos Reatores de Neutro sob Abertura Monofásica,
Presença de Defeito Monofásico ao Longo da LT
Regime Sustentado de Curta Duração (500 ms)*

TABELA A2-5.8

ANEXO 3

Texto sobre Transmissão em Muito Longa Distância

Transmissão em Muito Longa Distância :

(texto adaptado de material fornecido pelo Prof. Portela, sob sua supervisão)

ASPECTOS ESSENCIAIS DA TRANSMISSÃO EM DISTÂNCIA MUITO LONGA

Em [14,18], o problema de transmissão em corrente alternada a distância muito longa foi estudado usando-se vários métodos, considerando algumas alternativas de sistemas de transmissão, interpretando os fenômenos físicos e técnicos dominantes, com simulações para detalhar e confirmar a análise geral.

Os resultados obtidos foram bastante interessantes. Eles indicaram ser a transmissão de energia elétrica a distância muito longa bastante diferente do que seria esperado por simples extrapolação da experiência de transmissão de média distância; para otimizar um tronco de transmissão de muito longa distância, é necessária uma abordagem mais fundamental e ampla.

Por exemplo:

- Linhas de distância muito longas não precisam, basicamente, de compensação reativa, e, assim, o custo de sistemas de transmissão AC, por unidade de comprimento, para 2800 km, por exemplo, é muito mais baixo do que para 400 km.

- Para sistemas de transmissão muito longos, é apropriada a escolha de concepção de linha não convencional, incluindo eventualmente:

:: “Reduzidas” distâncias de isolamento, devidamente coordenadas com meios adequados para controle de sobretensões;

:: Geometria não convencional de feixes de condutores, linhas hexafásicas, pára-raios distribuídos ao longo da linha.

- Transitórios de Manobra , para várias condições usuais de manobra, são moderados, no que se refere a solicitações dos disjuntores e severidade de transitórios para a rede, para linhas e equipamentos.

Isto é, energização de linha, numa simples manobra, para uma linha de 2800 km, sem compensação reativa, origina sobretensões inferiores ou semelhantes a de uma linha de 300 km com compensação reativa.

- Podem ser obtidos resultados bastante favoráveis com uma cuidadosa coordenação dos disjuntores entre linha e rede, isto é com chaveamento sincronizado, coordenação de vários disjuntores e resistores auxiliares de fechamento.

- Há algumas condições potencialmente severas bastante diferentes das condições severas típicas em sistemas de média distância, como por exemplo, no que se refere a correntes de arco

secundário, e os conseqüentes requisitos para promover a eliminação da falta sem a necessidade de abrir todas as fases da linha. A severidade de tais condições é fortemente dependente do comportamento dos disjuntores e da rede.

Devido a características peculiares das manobras em linhas longas, é possível reduzir a severidade drasticamente, com uso de chaveamento rápido e esquemas de proteção apropriados.

Eventualmente, podem ser usados esquemas especiais para limitar as sobretensões em algumas condições bastante desfavoráveis de acordo com o tipo de falta e local.

Devido à falta de experiência prática da transmissão em muito longa distância, e o fato dessa apresentar características bastante diferentes da transmissão e redes tradicionais, deve ser feita uma análise muito cuidadosa e sistemática para se obter uma solução otimizada.

ASPECTOS FÍSICOS BÁSICOS DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DE LINHAS MUITO LONGAS

A fim de esclarecer os aspectos mais importantes das características das linhas muito longas, consideremos uma linha sem perdas, de comprimento total L , reatância longitudinal por unidade de comprimento X , admitância transversal por unidade de comprimento Y , ambos para condições não homopolar, a frequência industrial f . No caso de compensação longitudinal, e ou compensação transversal, a distâncias não muito longas ao longo da linha, tal compensação pode ser “incluída” numa “média equivalente” nos valores de X e Y . O comprimento elétrico da linha, Θ , a frequência f (sendo $\omega = 2\pi f$ e v a velocidade de fase), é

$$\Theta = \sqrt{XY}L = \frac{\omega}{v}L \quad (1)$$

$$v = \frac{\omega}{\sqrt{XY}} \quad (2)$$

Se os valores de X e Y não incluírem a compensação, a velocidade de fase, v , é quase independente dos parâmetros construtivos da linha, e da ordem de 0,96 a 0,99 vezes a velocidade de propagação eletromagnética no vácuo.

A impedância característica, Z_c , e, a uma tensão de referência, U_0 , a potência característica, P_c , são

$$Z_c = \sqrt{\frac{X}{Y}} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{U_0^2}{Z_c} \quad (4)$$

Consideremos uma eventual compensação reativa longitudinal (série) e transversal (paralela) ao longo da linha, a distâncias não muito longas (muito menor do que um quarto do comprimento de onda a frequência industrial), por meio de “fatores de compensação reativa”, ξ , η . Sendo \mathbf{X}_0 e \mathbf{Y}_0 , a reatância longitudinal e a admitância transversal por unidade de comprimento da linha, respectivamente, não incluindo compensação, e \mathbf{X} , \mathbf{Y} os valores “médios” correspondentes, por unidade de comprimento, incluindo compensação, temos

$$\mathbf{X} = \xi \mathbf{X}_0 \quad (5)$$

$$\mathbf{Y} = \eta \mathbf{Y}_0 \quad (6)$$

Sem compensação reativa, $\xi = 1$, $\eta = 1$. Por exemplo, em uma linha com 30% de compensação longitudinal capacitiva e 60% compensação transversal indutiva, temos $\xi = 0,70$, $\eta = 0,40$.

A eventual compensação reativa longitudinal e transversal tem o seguinte efeito:

$$\Theta = \sqrt{\xi\eta} \cdot \Theta_0 \quad (7)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{\xi}{\eta}} \cdot Z_{c0} \quad (8)$$

$$P_c = \sqrt{\frac{\eta}{\xi}} \cdot P_{c0} \quad (9)$$

O sub-índice “₀” identifica valores correspondentes sem compensação reativa ($\xi = 1$, $\eta = 1$).

Por exemplo, em uma linha com 600 km, a 60 Hz ($\Theta_0 = 0,762$ rad), usando 40% de compensação longitudinal capacitiva ($\xi = 0,60$) e 65% de compensação transversal indutiva ($\eta = 0,35$), Θ é reduzido a 0,349 rad (equivalente a 275 km, a 60 Hz), enquanto a impedância característica é multiplicada por 1,31 e a potência característica por 0,76. Em redes tradicionais, com comprimentos de linha de algumas centenas de quilômetros, a compensação reativa é usada para reduzir Θ para “muito menos” que $\pi/2$ (um quarto do comprimento de onda) e ajustar P_c para que, junto com Θ , definir perfis de tensão, algumas sobretensões de manobra e potência reativa absorvida pela linha.

No caso de distâncias muito longas (2000 a 3000 km), reduzir Θ a muito menos que $\pi/2$ implicaria na adoção de níveis extremamente altos de compensação reativa, aumentando assim o custo de transmissão (dobrando, de acordo com alguns estudos publicados sobre sistemas de transmissão “otimizados”), e com várias severas conseqüências técnicas, devido a uma vasta gama de condições de ressonância.

A solução encontrada e discutida aqui, para distâncias muito longas, é trabalhar com Θ um pouco maior que π , evitando assim a necessidade de altos níveis de compensação reativa, e obtendo um sistema de transmissão muito mais barato e com comportamento muito melhor. Desprezando as perdas, o comportamento da linha, a frequência industrial, em condições balanceadas, estão definidas por Θ e Zc . Considerando as tensões nas extremidades, U_1 , U_2 , em notação complexa, tem-se:

$$U_2 = U_0 \quad (10) \quad \text{e} \quad U_1 = U_0 e^{i\alpha} \quad (11)$$

Aparte um fator de proporcionalidade Pc , as potências ativa e reativa nas extremidades e ao longo da linha, dependem de Θ e α .

Considerando linhas com os seguintes comprimentos elétricos:

- (a) $\Theta = 0,05 \pi$ (aproximadamente 124 km a 60 Hz)
- (b) $\Theta = 0,10 \pi$ (aproximadamente 248 km a 60 Hz)
- (c) $\Theta = 0,90 \pi$ (aproximadamente 2228 km a 60 Hz)
- (d) $\Theta = 0,95 \pi$ (aproximadamente 2351 km a 60 Hz)
- (e) $\Theta = 1,05 \pi$ (aproximadamente 2599 km a 60 Hz)
- (f) $\Theta = 1,10 \pi$ (aproximadamente 2722 km a 60 Hz)

Para estes seis exemplos, tem-se na Fig. A3.(1), em função de α :

- A potência ativa transmitida, P .
- A potência reativa, Q , absorvida pela linha (soma da potência reativa provida à linha em ambos os terminais).
- A tensão transversal (modulo), Um , no meio da linha.

Os exemplos (a) e (b) correspondem a “habituais” comprimentos de linhas relativamente curtas. Elas devem operar na vizinhança de $\alpha = 0$, onde um aumento de α aumenta a potência transmitida. A potência transmitida pode exceder a potência característica, com um aumento da potência reativa absorvida pela linha.

Os exemplos (c), (d), (e) e (f) correspondem a linhas muito longas. Nos exemplos (c) e (d), os comprimentos são ligeiramente menores que meio comprimento de onda ($\Theta = \pi$) e, nos exemplos (e) e (f), eles são ligeiramente superiores a meio comprimento de onda. Note que os comprimentos destes exemplos (c), (d), (e), e (f) são maiores que um quarto de comprimento de onda ($\Theta = \pi/2$).

Para estes exemplos (c), (d), (e) e (f), na vizinhança de $\alpha = 0$, a tensão na região central da linha e o consumo da potência reativa são extremamente altos, comparados, respectivamente, com a tensão nas extremidades da linha e a potência transmitida.

Para os exemplos (c) e (d), na vizinhança de $\alpha = \pi$, a derivada da potência transmitida em relação a α é negativa e assim não acontece o efeito estabilizador natural de uma derivada positiva, o que é, na verdade, uma das razões por que as redes elétricas de corrente alternada são basicamente estáveis (com poucas exceções), considerando o comportamento eletromecânico de grupos geradores e cargas. A menos que sistemas de controle extremamente complexos sejam considerados, afetando todas as principais centrais elétricas da rede, não é adequado ter troncos de transmissão com comprimento entre um quarto e um meio do comprimento de onda ($\pi/2 \leq \theta \leq \pi$).

Para os exemplos (e), (f) na vizinhança de $\alpha = \pi$, a derivada da potência transmitida em relação a α é positiva e assim acontece o efeito estabilizador natural de uma derivada positiva, semelhante ao comportamento de linhas curtas perto de $\alpha = 0$.

Na vizinhança de $\alpha = \pi$, o comportamento de linha, visto nos terminais da linha, é semelhante ao comportamento de uma linha curta, na vizinhança de $\alpha = 0$, para a potência transmitida na faixa de $-\mathbf{P}_c \leq \mathbf{P} \leq \mathbf{P}_c$. O consumo de Potência Reativa da linha é moderado e a tensão ao longo da linha não excede \mathbf{U}_0 .

O principal diferencial está relacionado a tensão no meio da linha, que é proporcional a potência transmitida. Se a potência característica for referida a tensão máxima ao longo da linha, a potência máxima transmitida é limitada a potência característica (o que não acontece em linhas curtas).

Ao menos, para uma transmissão ponto a ponto a longa distância, o fato da tensão variar ao meio da linha, entre 0 e \mathbf{U}_0 não apresenta inconveniente.

Se, principalmente numa transmissão a longa distância ponto a ponto, se deseja conectar algumas cargas relativamente pequenas ao longo da linha, há vários modos de se fazer isso. É conveniente se adotar alguma solução não convencional, adaptada ao fato de que na parte central da linha a tensão não é “quase constante”, mas varia conforme a potência transmitida, e a corrente é “quase constante”. É uma tarefa fácil com tecnologias FACTS, e algumas idéias úteis podem ser aproveitadas de sistemas de transmissão e distribuição antigos a “corrente constante” [17,18,19].

Linhas com um comprimento elétrico quase igual a meio comprimento de onda ($\Theta = \pi$), não se comportam de maneira convencional. Por estarem próximas a um ponto singular, com

mudanças bruscas de derivada, originam-se várias dificuldades, nomeadamente para controle de instabilidade da rede ou mesmo eventual instabilidade física básica.

Na Fig. A3.(2) é apresentada uma ampliação da Fig. A3.(1), para os exemplos (e) e (f), na gama de “condições operacionais normais”, com tensão máxima ao longo da linha limitada a U_0

Como mencionado anteriormente de forma resumida, para transmissão a longa distância, há várias razões importantes para se escolher um comprimento elétrico de linha, Θ , um pouco maior que meio comprimento de onda, no que se refere a condições operacionais normais e investimentos inerentes. A escolha “exata” não é crítica. Uma gama de $1,05 \pi \leq \Theta \leq 1,10 \pi$ é uma primeira aproximação razoável. Também para comportamento transitório “lento” e “rápido”, esta escolha tem vantagens muito importantes, como discutido abaixo.

A solução de transmissão a longa distância com Θ um pouco maior que π (por exemplo $1,05 \pi \leq \Theta \leq 1,10 \pi$) é bastante robusta para comportamento electromecânico e, também, para transitórios relativamente lentos, associados à controle de tensão. Por exemplo, um pequeno controle de reativos, equivalente a uma mudança em Θ , permite uma mudança rápida na potência transmitida, em tempos muito mais curtos do que os necessários para mudar a fase mecânica dos geradores, como representado esquematicamente na Fig. A3.(2) por uma seta e “pontos” **A** e **B**. Vamos assumir que a linha do exemplo (e), transmite uma potência $\mathbf{P} = \mathbf{P}_c$ (ponto operacional **a** da Fig. A3.(2)). Um controle de reativos FACTS que varie Θ de 1,05 a 1,10, o que pode ser feito muito rapidamente, passando para o ponto operacional **B**, modifica a potência transmitida de $1,0 \mathbf{P}_c$ para $0,5 \mathbf{P}_c$, mantendo a diferença de fase entre os terminais da linha. Um sistema de FACTS, com controle orientado para seu efeito em Θ , pode ser muito eficiente para controle da estabilidade eletromecânica. Deve ser mencionado que, para condições equilibradas, a compensação reativa não precisa de capacitores ou reatores para “acúmulo de energia”. Em condições equilibradas, para três ou seis fases, o valor instantâneo da potência transmitida pela linha (em “todas as fases”) é constante no tempo, e não depende da potência reativa (o que é diferente do caso de um circuito monofásico), e, assim, o comportamento da potência reativa pode ser tratado através da transferência instantânea entre fases, por exemplo por chaveamento eletrônico, sem basicamente necessidade de capacitores ou reatores para acúmulo de energia (diferentemente do que seria no caso de uma linha monofásica).

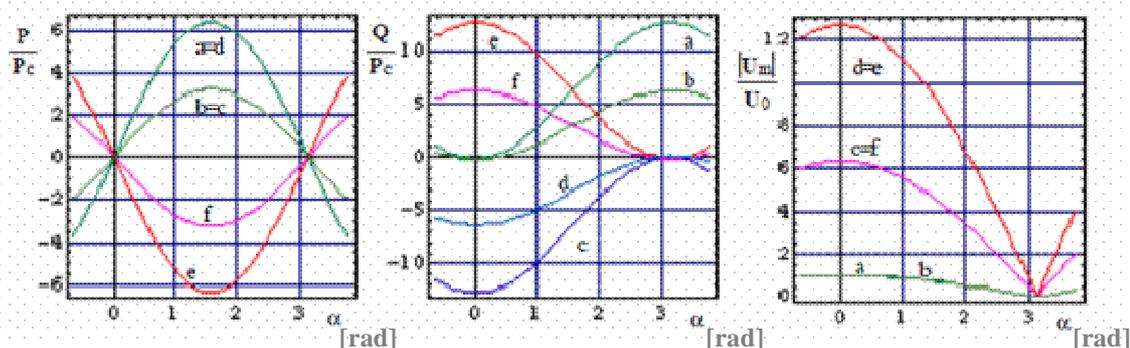


Figura A3.(1) – Potência Transmitida, P , Potência Reativa Absorvida pela linha, Q , módulo da tensão no meio da linha $|U_m|$, em função de α , para seis exemplos

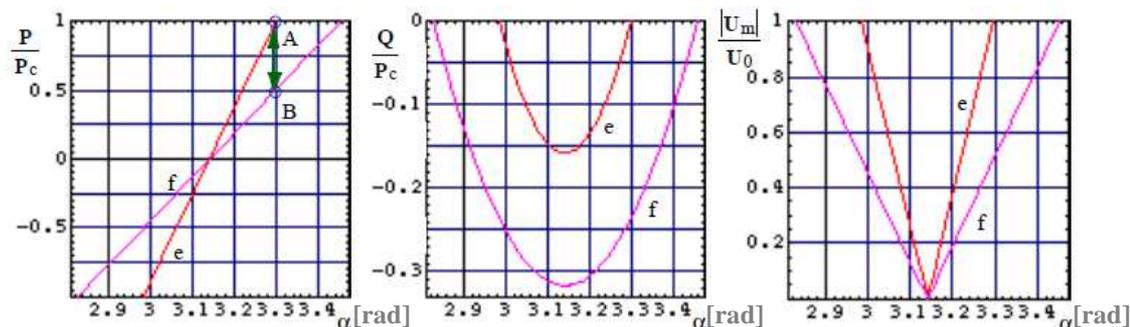


Figura A3.(2) – Potência Transmitida, P , Potência Reativa Absorvida pela linha, Q , módulo da tensão no meio da linha $|U_m|$, em função de α , para dois exemplos de linhas muito longas, em condição normal de operação

ASPECTOS FÍSICOS BÁSICOS DO CHAVEAMENTO DE LINHAS MUITO LONGAS

A fim de permitir uma interpretação bastante simples do efeito do comprimento de linha nas sobretensões de manobra, é conveniente se considerar um modelo de linha simples [26], que permite levar em conta os efeitos físicos dominantes, com um número mínimo de parâmetros, e que, para a maioria dos efeitos importantes, pode ser tratado por procedimentos analíticos muito simples, diretamente no domínio de fase.

As características principais das manobras de linha longa podem ser explicadas com tal modelo, o que foi confirmado por extensos métodos detalhados de simulação. Consideremos a manobra de energização de uma linha tri ou hexafásica a partir de um barramento infinito, com tensão de senoidal de frequência f e amplitude \hat{U} , com fechamento simultâneo de todas as fases, desprezando-se efeitos de perda na propagação.

Foi mostrado em [20] que a sobretensão máxima de manobra (para chaveamento no pior tempo), em intervalos de tempo sucessivos $[(2n - 1)T < t < (2n + 1)T]$, sendo T o “tempo de propagação” ao longo da linha, associado ao número crescente “ n ” de reflexões de onda,

$$\text{Max}_n [u_{2k}(t)] = S_{\text{max}}^{*n} \cdot \hat{U} \quad (12)$$

$$S_{\text{max}}^{*n} = 2 |S_n| = 2 \left| \frac{1-r^n}{1-r} \right| \quad (13)$$

O máximo global de $u_{2k}(t)$, $\text{Max}[u_{2k}(t)]$, é a envolvente dos máximos relativos, para todos os valores de n . Tal envolvente é

$$S_{\text{max}}^* = \frac{4}{|1-r|} = \frac{4}{1+e^{-12\Theta}} \quad (14), \quad S_{\text{max}}^* = 2 \sec \Theta \quad (15), \quad \text{Max}_n [u_{2k}(t)] = S_{\text{max}}^* \cdot \hat{U} \quad (16)$$

Sendo

$$r = -e^{-i2\Theta} \quad \Theta = \omega \cdot T$$

Θ : “comprimento elétrico” da linha (em radianos) a frequência industrial

Na Fig. A3.(3) estão representados os coeficientes S_{max}^{*n} e S_{max}^* em função do comprimento elétrico de linha, Θ . Este máximo global é o dobro da tensão do terminal sem carga, em condições estabilizadas, a frequência industrial (cujo valor é $\hat{U}_0 = \sec \theta \hat{U}$).

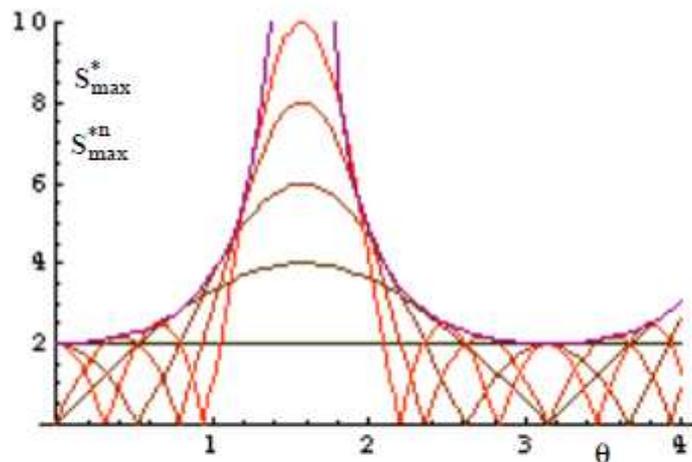


Figura A3.(3) – Coeficientes S_{max}^{*n} e S_{max}^* em função do comprimento elétrico, θ

Assim, nas condições assumidas, a relação da máxima sobretensão no terminal de linha aberto, e tensão de pico da fonte, é função somente do “comprimento elétrico da linha”, θ , a frequência industrial. Sejam dois exemplos :

- Exemplo 1 com $\theta = 1,0$,

- Exemplo 2 com $\theta = 3,5$ (comprimentos de linha de cerca de 788 km e 2760 km, a 60 Hz). Os

valores correspondentes de S_{max}^* são, respectivamente, 3,70 e 2,14.

Na Fig. A3.(4) estão representados, para estes dois exemplos, a tensão fase-terra do terminal aberto da linha (considerando a tensão fase-terra de pico da fonte como base/unidade), considerando a fonte como barra infinita e fechamento simultâneo de todas as fases. Em cada gráfico são representadas duas curvas. Para uma das curvas, o fechamento da fase representada ocorre quando tensão de fonte é zero, e, para a outra, quando tal tensão de fonte é máxima. Os eixos das abscissas estão graduados em $\tau = \omega t$. Sobretensões máximas, encontradas apenas com estes dois instantes de chaveamento, são praticamente iguais aos valores encontrados com a fórmula de S_{\max}^* .

Para propósitos ilustrativos, são apresentados na Fig. A3.(5), para os exemplos 1 e 2, tensão na terceira fase a fechar, assumindo um diferença de tempo de 2 ms entre os fechamentos das segunda e primeira fases, e uma diferença de tempo de 2 ms entre a segunda e a terceira.

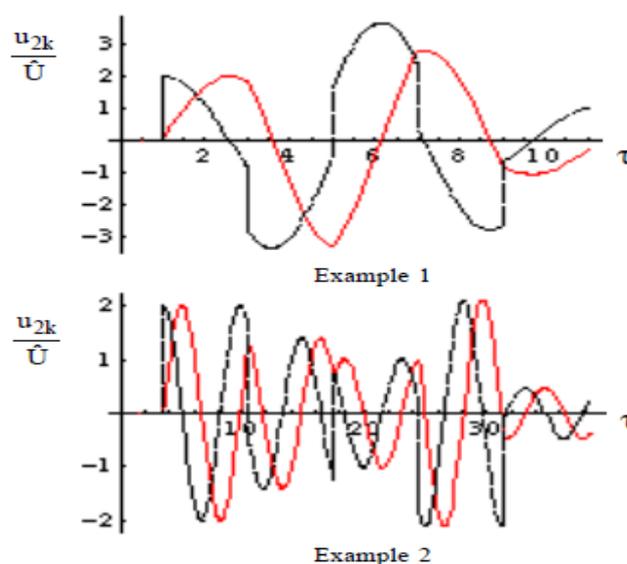


Figura A3.(4) – Tensão no Terminal Aberto, para o fechamento simultâneo das fases, nas condições de exemplo

Na Fig. A3.(6), estão representadas para os exemplos 1 e 2 as tensões nas três fases do terminal aberto, para chaveamento sincronizado. A comparação destas curvas com as das figs. A3.(4) e A3.(5), ilustram a ordem de grandeza da redução da sobretensão de manobra com o uso do chaveamento síncrono.

As curvas da fig. A3.(5), na gama de $\theta \leq \pi/2$, expressam o fato bem conhecido de que a manobra de fechamento da linha é tão mais severa quanto maior for o comprimento da linha, o que é a razão de se usar tradicionalmente reatores em derivação e/ou capacitores série em linhas com alguns centenas de quilômetros, reduzindo assim o “comprimento elétrico equivalente” da linha, θ , e assim com a compensação reativa, reduzir as sobretensões de manobra. A gama

$\theta \leq \pi/2$ dessas curvas expressam, de modo semelhante, os principais aspectos de severidade da manobra de fechamento da linha, para linhas muito longas.

Linhas com comprimento elétrico entre $\pi/2$ e π devem ser evitadas, a princípio, por aspectos relacionados à frequência industrial e ao controle de potência. Comprimentos elétricos muito próximos de π devem também ser evitados pelo fato de aí estar uma “condição singular” no que tange ao controle de potência do sistema elétrico. Para comprimentos de linha ligeiramente superiores a π (por exemplo, $3,2 < \theta < 3,5$), entretanto, as linhas apresentam um comportamento bastante interessante. As sobretensões de manobra são moderadas, semelhantes às encontradas em linhas curtas.

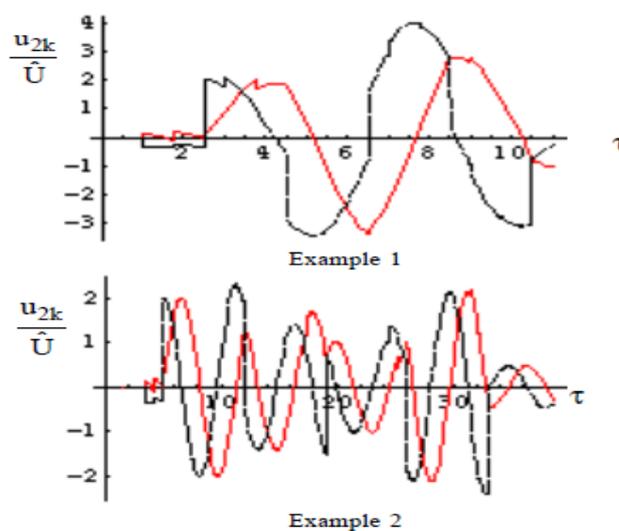


Figura A3.(5) – Tensão no Terminal Aberto, para a última fase a fechar, nas condições de exemplo

Assim, para distâncias da ordem de 2500 km a 3000 km, como no caso das transmissões entre regiões como a Amazônia e o Sudeste Brasileiros, o caminho natural, para transmissão em corrente alternada, é se adotar troncos de transmissão sem compensação reativa básica, ao invés de extrapolar as práticas tradicionais de elevados níveis de compensação em derivação para linhas longas. Em muitos aspectos, o comportamento de uma linha não compensada é muito melhor que o comportamento de uma linha fortemente compensada, lembrando que há ainda a questão do custo da compensação.

O principal objetivo da análise prévia é identificar e explicar os aspectos físicos dominantes da manobra de fechamento e a influência do comprimento da linha para linhas muito longas. Mostra porque não é aplicável a extrapolação simples e direta das práticas comuns para linhas relativamente curtas. Mostra também que e porque o chaveamento direto de uma linha muito longa, sem compensação, origina sobretensões moderadas, muito inferiores às obtidas em linhas com algumas centenas de quilômetros.

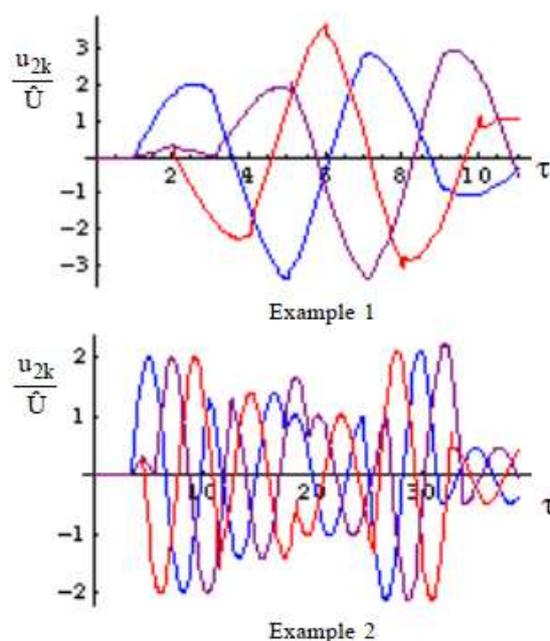


Figura A3.(6) – Tensão no Terminal Aberto, para fechamento sincronizado, nas condições de exemplo

Uma análise semelhante mostra também muitos outros aspectos comportamentais das linhas muito longas, para diferentes fenômenos transitórios, incluindo aqueles associados aos vários tipos de defeito e aspectos do arco secundário para defeitos monofásicos.

Obviamente, uma análise mais detalhada deve ser feita para condições reais, considerando ainda a dependência com a frequência dos parâmetros de linha e a conseqüente atenuação e distorção da propagação da onda, e diferentes características de propagação de vários modos da linha. Porém, para o fechamento simultâneo das fases, na energização da linha, o erro das simplificações da análise prévia se mostraram pequenos, em diversos casos de linhas muito longas tratados com procedimentos muito mais detalhados e rigorosos. Uma razão para o pequeno erro surge do fato de que ao se considerar o fechamento simultâneo de todas as fases, apenas os modos não homopolares interferem nos transitórios de manobra, e tais modos são muito menos afetados pela dependência com a frequência, atenuação e distorção, do que os modos homopolares. Assim, considerando os modos relevantes, o comportamento total acaba por retratar algo muito próximo ao das condições de linhas ideais.

Por outro lado, mesmo para condições transitórias afetadas pelos modos homopolares, em linhas muito longas, análises simplificadas dão resultados aproximados, com algumas modificações simples no conceito das linhas ideais. A principal razão para tal comportamento é que, ao longo do comprimento total de uma linha muito longa, as componentes homopolares de alta frequência se atenuam fortemente. Assim, para alguns tipos de transitórios de manobra, uma representação muito detalhada da dependência da transformação fase-modo, e da dependência da frequência dos parâmetros modais homopolares pode ser evitada.

ANEXO 4

O Anexo 4 encontra-se dividido em 4 sub-anexos, conforme detalhado a seguir :

*Anexo 4-1
Transitórios de Manobra de Linha para LT Hipotética entre Porto Velho e Araraquara
(Meia-Onda)*

*Anexo 4-2
“Estimativa preliminar de gama plausível de impedância de curto-circuito dos autotransformadores ligados nos terminais das linhas de pouco mais de meia onda”, DT411 – P&D “Modelagem do Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico” (autor : Carlos Portela / COPPETEC), FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.*

Descrição Sucinta e Resultados dos Casos de Rejeição de Carga em Araraquara :

Descrição dos Casos

- Caso 1 Rejeição de carga simples em Araraquara, sem falta, conf. 2016
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 2 Defeito 1f seguida de RJ simples em AR, conf. 2016
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 3 Rejeição de carga simples, seguida de defeito monofásico ($t_{falta} \Rightarrow V = 0$) em Araraquara
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 4 Rejeição de carga simples, seguida de defeito monofásico ($t_{falta} \Rightarrow V = V_{max}$) em Araraquara
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 5 Defeito monofásico em PV seguido de rejeição de carga simples em Araraquara
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 6 Rejeição de carga simples em AR, seguida de def. monofásico em PV ($t_{falta} \Rightarrow V=0$)
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 7 Rejeição de carga simples em AR, seguida de def. monofásico em PV ($t_{falta} \Rightarrow V=V_{max}$)
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 8 Rejeição de carga em AR, seguida de def. monofásico no 1/2 da LT ($t_{falta} = \text{aleatório}$)
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 9 Rejeição de carga em AR, seguida de def. monofásico no 1/2 da LT ($t_{falta} \Rightarrow V=0$)
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 10 Rejeição de carga em AR, seguida de def. monofásico no 1/2 da LT ($t_{falta} \Rightarrow V=V_{max}$)
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 11 Defeito monofásico no meio da LT, seguida de rejeição em AR
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 12 Rejeição dupla em AR, sem defeito.
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 13 Rejeição dupla em AR, seguida de def. monofásico em AR ($t_{falta} \Rightarrow V = 0$)
Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. . Fluxo em cada LT : 2974 MW
Obs : PR's não representados.
- Caso 14 Rejeição dupla em AR, seguida de def. monofásico no 1/2 da LT ($t_{falta} \Rightarrow V=V_{max}$)

Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. .
Obs : PR´s não representados.

Fluxo em cada LT : 2974 MW

Caso 15 Rejeição dupla em AR, seguida de def. monofásico no 1/2 da LT ($t_{falta} \Rightarrow V=0$)

Tensão pré-manobra de 1,055 p.u. .

Fluxo em cada LT : 2974 MW

Obs : PR´s não representados.

Descrição dos Casos		Grandeza (kVeficaz)	LOCAL						
			PV	LT24X	LT44X	LT64X	LT84X	LT104	AR
Caso 1	RJ simples em AR, sem defeito	$V\phi-t$	354	590	412	267	614	622	585
		$V\phi-\phi$	942	942	651	457	801	1150	1208
Caso 2	Defeito 1φ seguido de RJ simples em AR	$V\phi-t$	464	420	321	267	337	425	445
		$V\phi-\phi$	1048	1144	1102	1403	1442	1334	1351
Caso 3	RJ simples, seguida de defeito 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=0$) em AR	$V\phi-t$	611	863	786	1047	991	965	363
		$V\phi-\phi$	1060	1220	964	1387	1518	1274	1314
Caso 4	RJ simples, seguida de defeito 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=Vmax$) em AR	$V\phi-t$	641	821	781	969	1047	869	1022
		$V\phi-\phi$	1045	1150	1010	1336	1327	1210	1261
Caso 5	Defeito 1φ em PV seguida de RJ simples em AR	$V\phi-t$	547	730	633	559	646	721	883
		$V\phi-\phi$	985	1041	1121	904	1249	1348	1469
Caso 6	RJ simples em AR, seguida de defeito 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=0$) em PV	$V\phi-t$	565	697	674	504	641	623	830
		$V\phi-\phi$	963	956	965	877	865	1141	1208
Caso 7	RJ simples em AR, seguida de def. 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=Vmax$) em PV	$V\phi-t$	578	663	648	562	614	622	851
		$V\phi-\phi$	944	950	898	773	801	1150	506
Caso 8	RJ simples em AR, seguida de def. 1φ ($t_{falta} \Rightarrow$ aleatório) em 1/2 LT	$V\phi-t$	648	757	581	375	697	771	942
		$V\phi-\phi$	1098	1138	820	508	890	1340	1506
Caso 9	RJ simples em AR, seguida de def. 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=0$) em 1/2 LT	$V\phi-t$	361	630	583	417	424	626	774
		$V\phi-\phi$	947	929	655	462	788	1055	1213
Caso 10	RJ simples em AR, seguida de def. 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=Vmax$) em 1/2 LT	$V\phi-t$	709	715	540	297	657	794	1047
		$V\phi-\phi$	1252	1161	844	508	900	1353	1507
Caso 11	Defeito 1φ em 1/2 da LT seguida de RJ simples em AR	$V\phi-t$	361	616	583	418	424	626	774
		$V\phi-\phi$	947	929	655	462	788	1055	1213
Caso 12	RJ dupla em AR, sem defeito	$V\phi-t$	717	745	554	347	597	629	853
		$V\phi-\phi$	1114	1178	892	458	805	1137	1299
Caso 13	RJ dupla, seguida de defeito 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=0$) em AR	$V\phi-t$	730	819	913	1099	1056	1066	1061
		$V\phi-\phi$	1181	1191	1124	1346	1444	1295	1282
Caso 14	RJ dupla em AR, seguida de def. 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=Vmax$) em 1/2 LT	$V\phi-t$	654	755	575	382	597	629	863
		$V\phi-\phi$	1105	1158	923	459	805	1153	1331
Caso 15	RJ dupla em AR, seguida de def. 1φ ($t_{falta} \Rightarrow V=0$) em 1/2 LT	$V\phi-t$	666	751	545	371	645	629	853
		$V\phi-\phi$	1071	1182	887	459	779	1153	1307
Obs :	<i>Em todos os casos acima considerou-se :</i>								
	- Sistema representado com a config. base de 2016.								
	- LT operando em 800 kV								
	- Tensão pré-manobra de 1,055 p.u.								
	- Fluxo em cada LT de 2974 MW								
	- Pára-raios não representados								

Siglas e Nomenclatura Utilizadas:

RJ : rejeição de carga

RJ simples : rejeição de carga em apenas um circuito

RJ dupla : RJ simultânea dos dois circuitos

$V\phi-\phi$: tensão entre fases

$V\phi-t$: tensão fase-terra

1φ : monofásico

t_{falta} : instante de ocorrência do defeito

V : tensão

Vmax : valor máximo (pico) da tensão

AR : terminal da LT de Araraquara

1/2 LT : ponto localizado ao meio da linha

PV : Porto Velho

Anexo 4-1
Transitórios de Manobra para LT Hipotética entre Porto Velho e Araraquara
(Meia-Onda+)

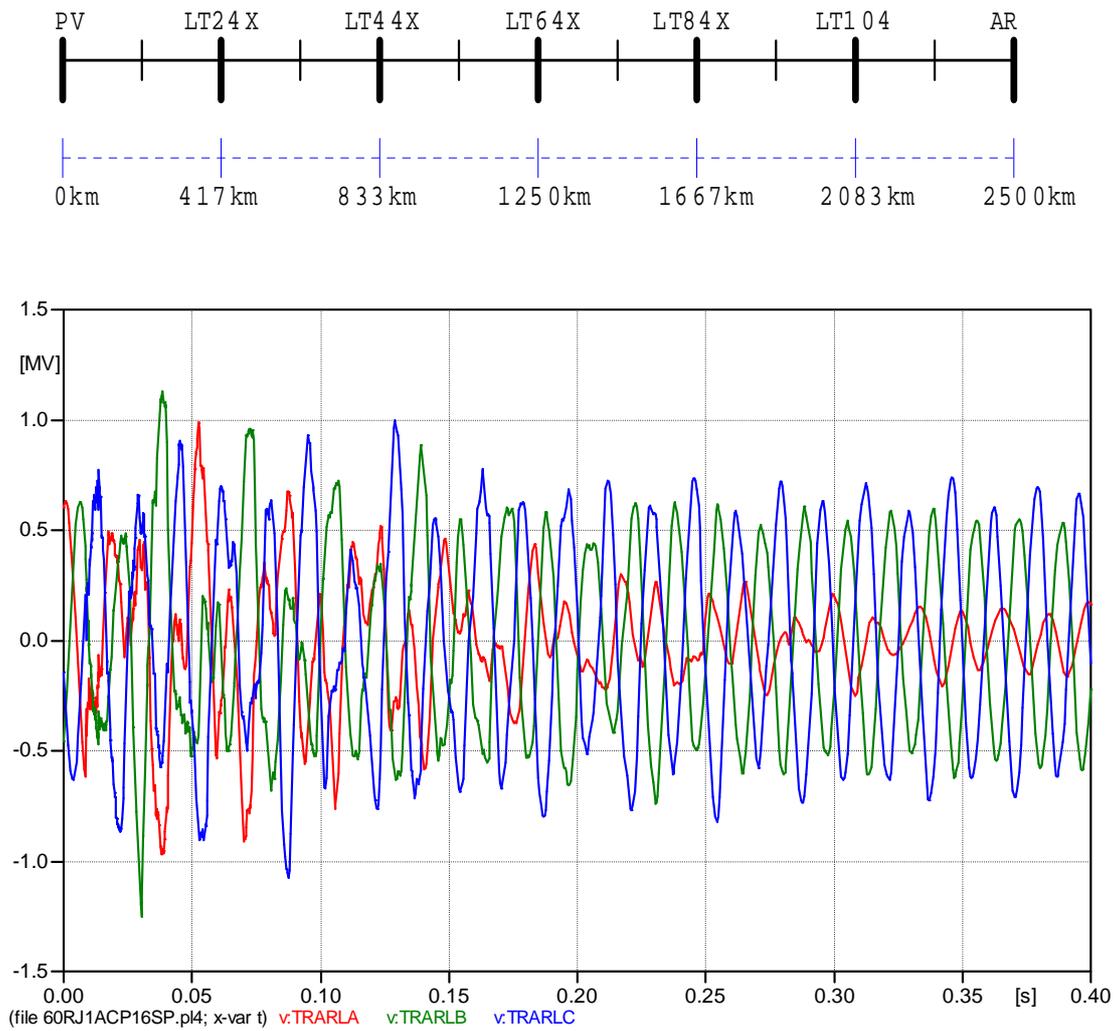


Fig. A4-1- Defeito Monofásico em Porto Velho, seguido de Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra no terminal da LT de Araraquara

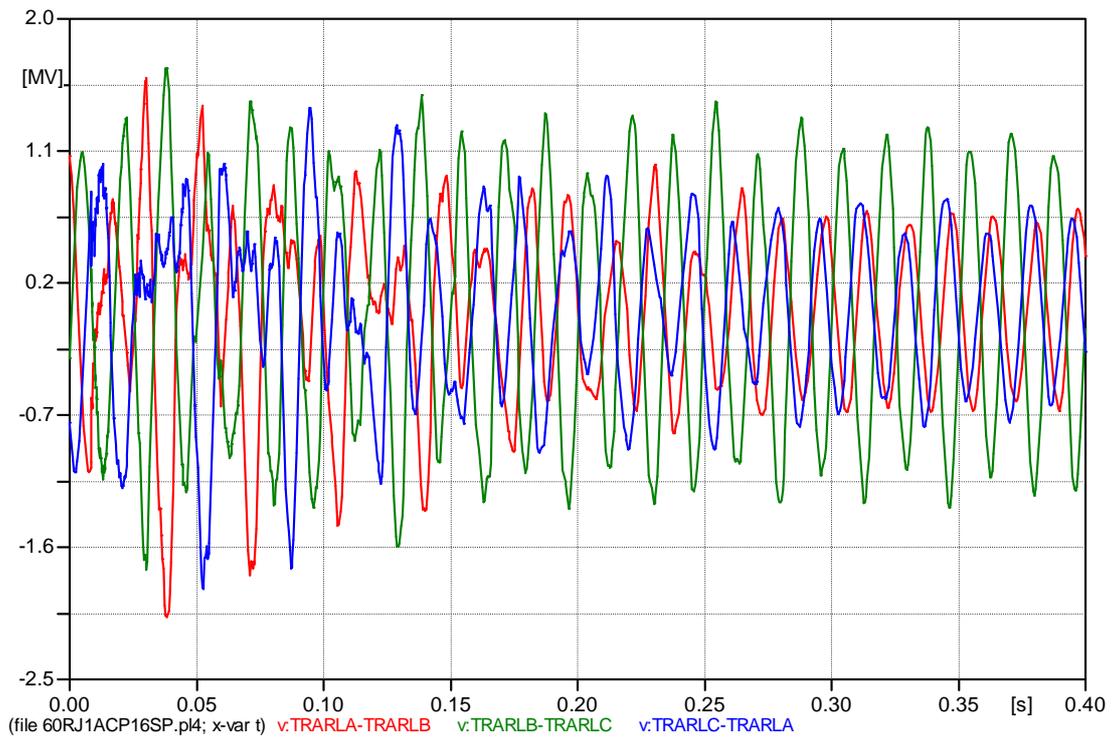


Fig. A4-2- Defeito Monofásico em Porto Velho, após Rejeição de carga simples em Araraquara - Tensão fase-fase no terminal da LT de Araraquara

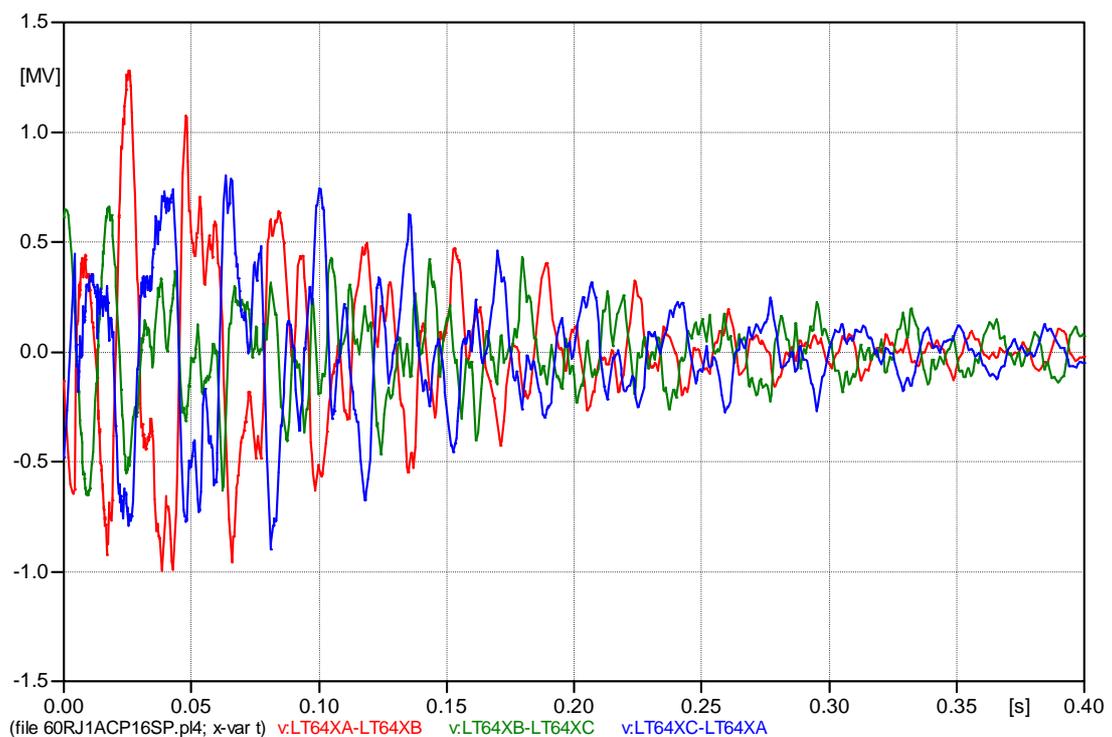


Fig. A4-3- Defeito Monofásico em Porto Velho, seguido de Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-fase no meio da LT

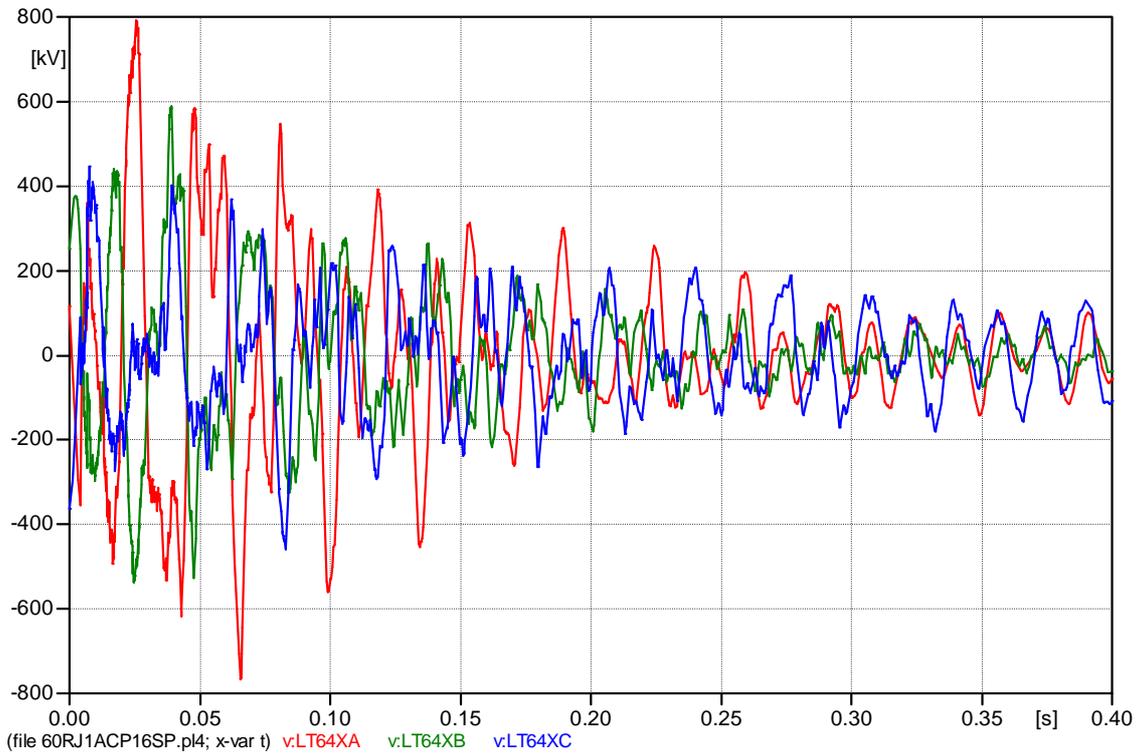


Fig. A4-4- Defeito Monofásico em Porto Velho, seguido de Rejeição de carga simples em Araraquara - Tensão fase-terra no meio da LT

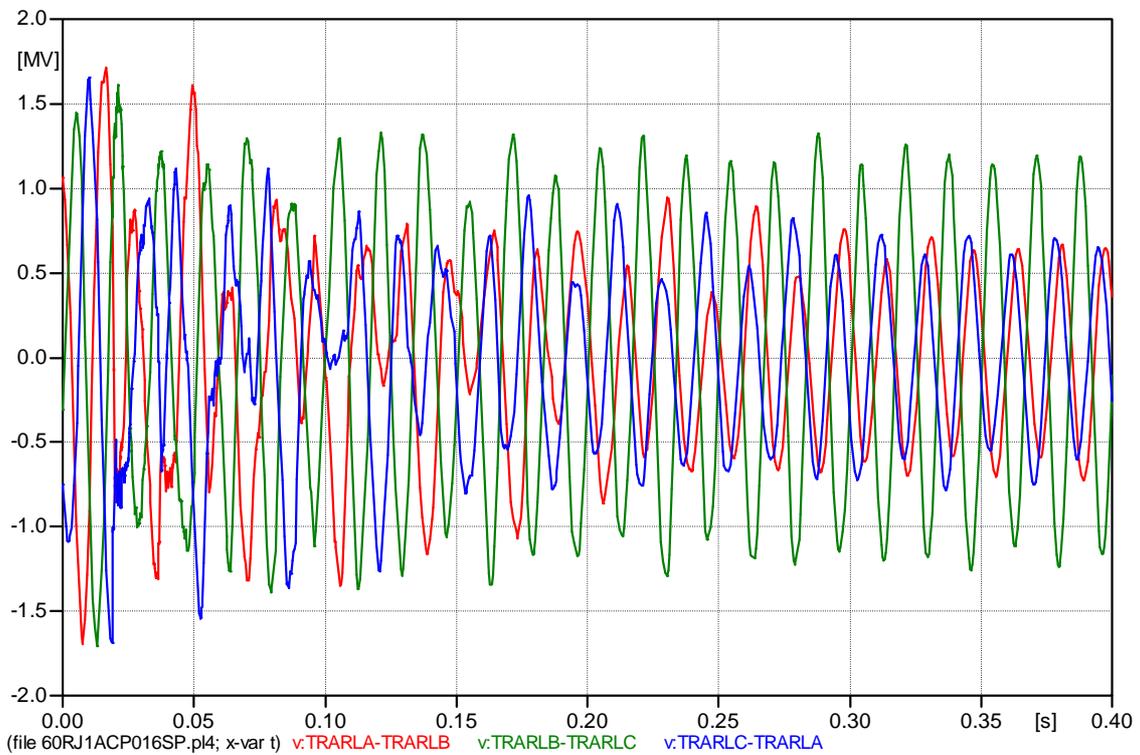


Fig. A4-5- Defeito Monofásico em Araraquara, em V=0, com Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-fase em Araraquara

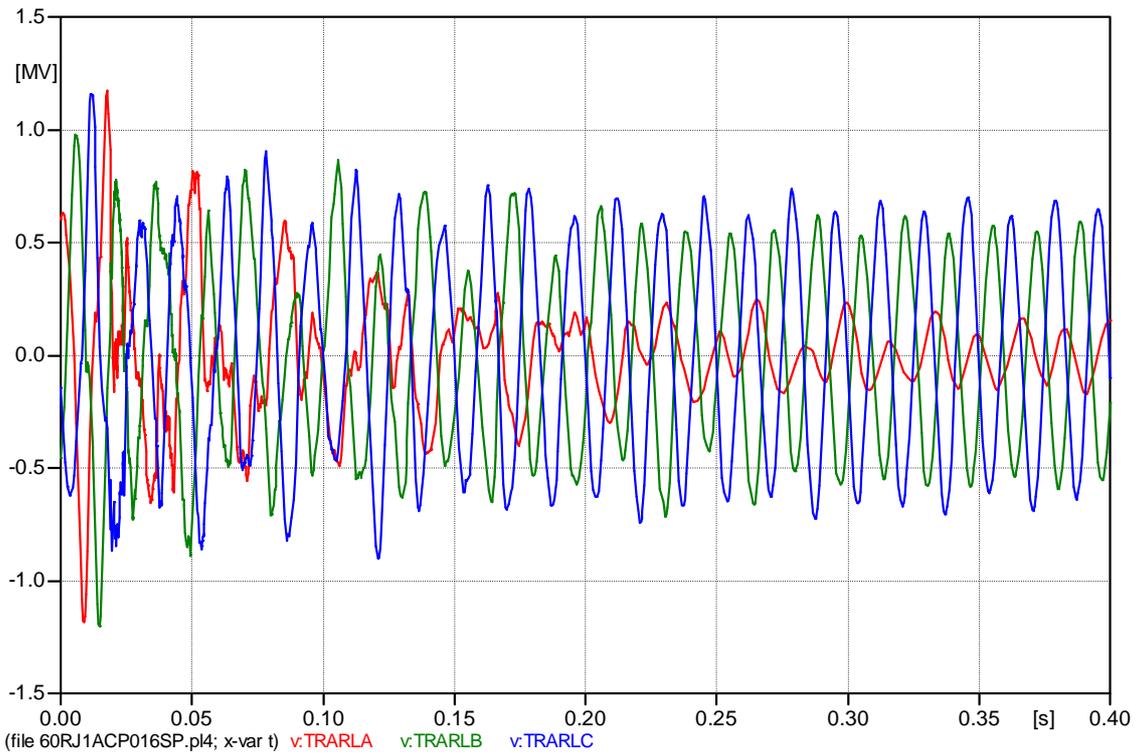


Fig. A4-6- Defeito Monofásico em Araraquara, em $V=0$, com Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra em Araraquara

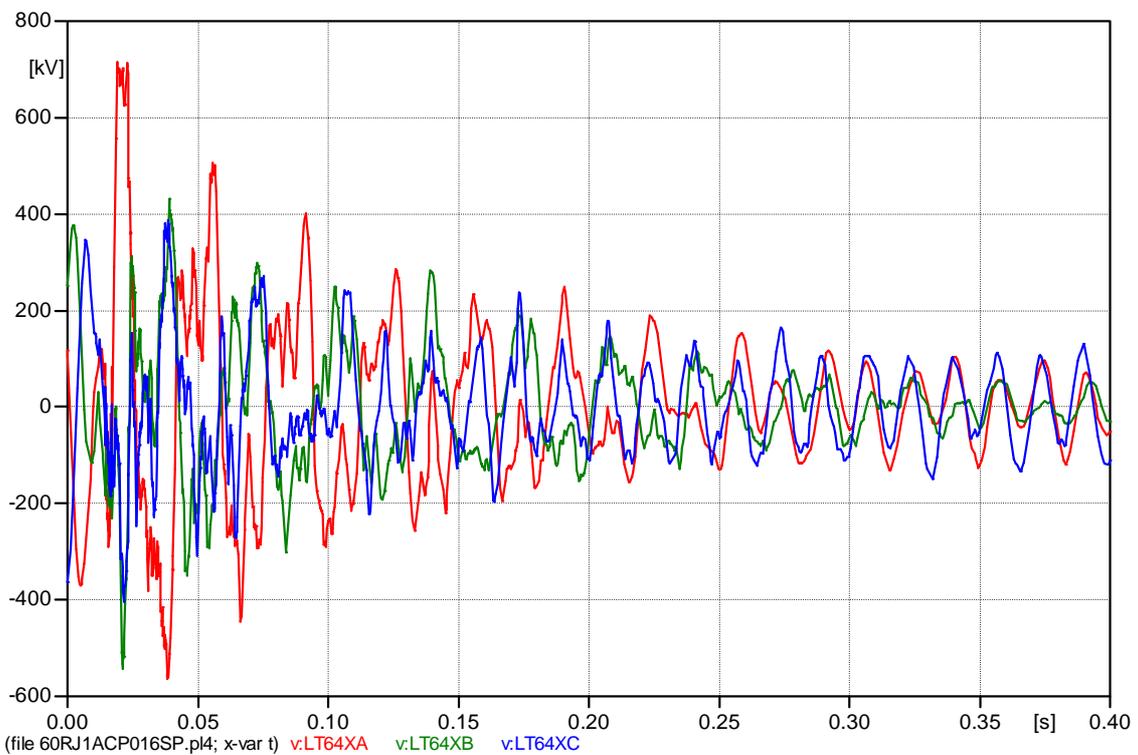


Fig. A4-7- Defeito Monofásico em Araraquara, em $V=0$, com Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra no meio da LT

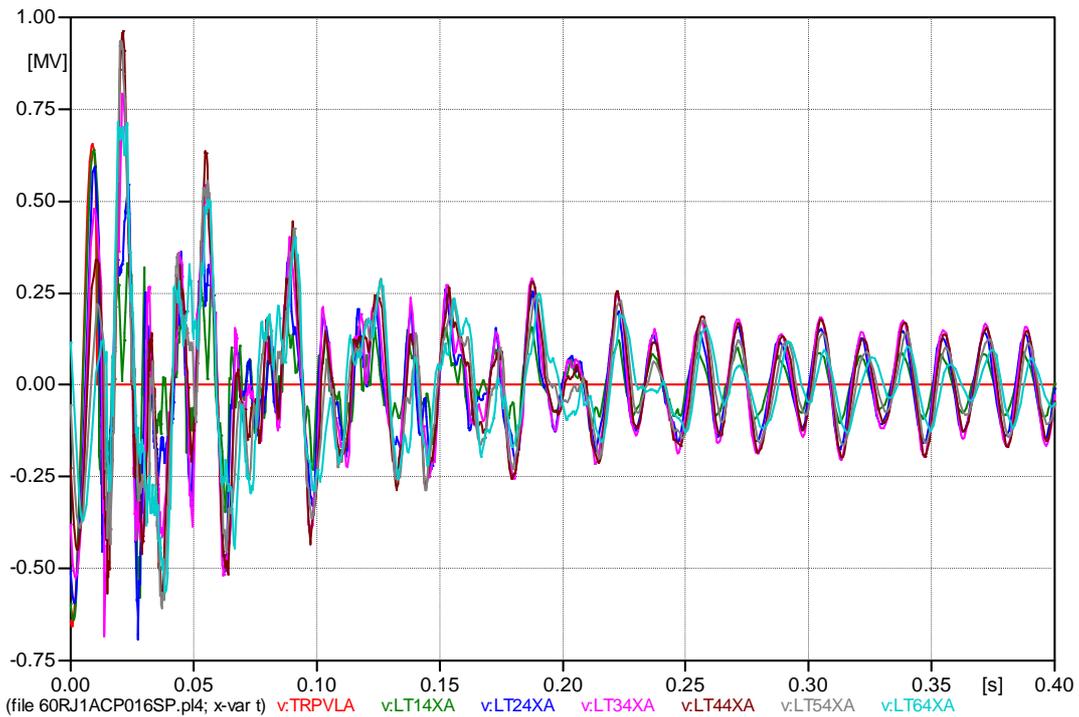


Fig. A4-8- Defeito Monofásico em Araraquara, em $V=0$, com Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra de Porto Velho ao meio da LT, a cada 208 km

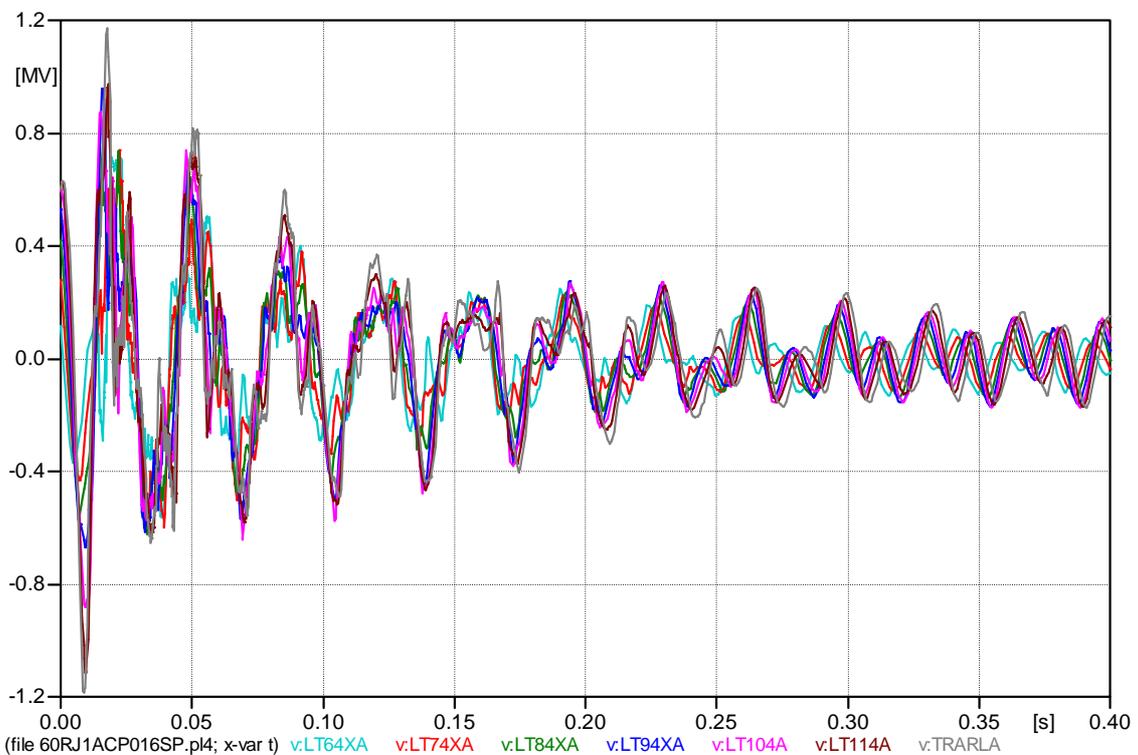


Fig. A4-9- Defeito Monofásico em Araraquara, em $V=0$, com Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra de Araraquara ao meio da LT, a cada 208 km da LT

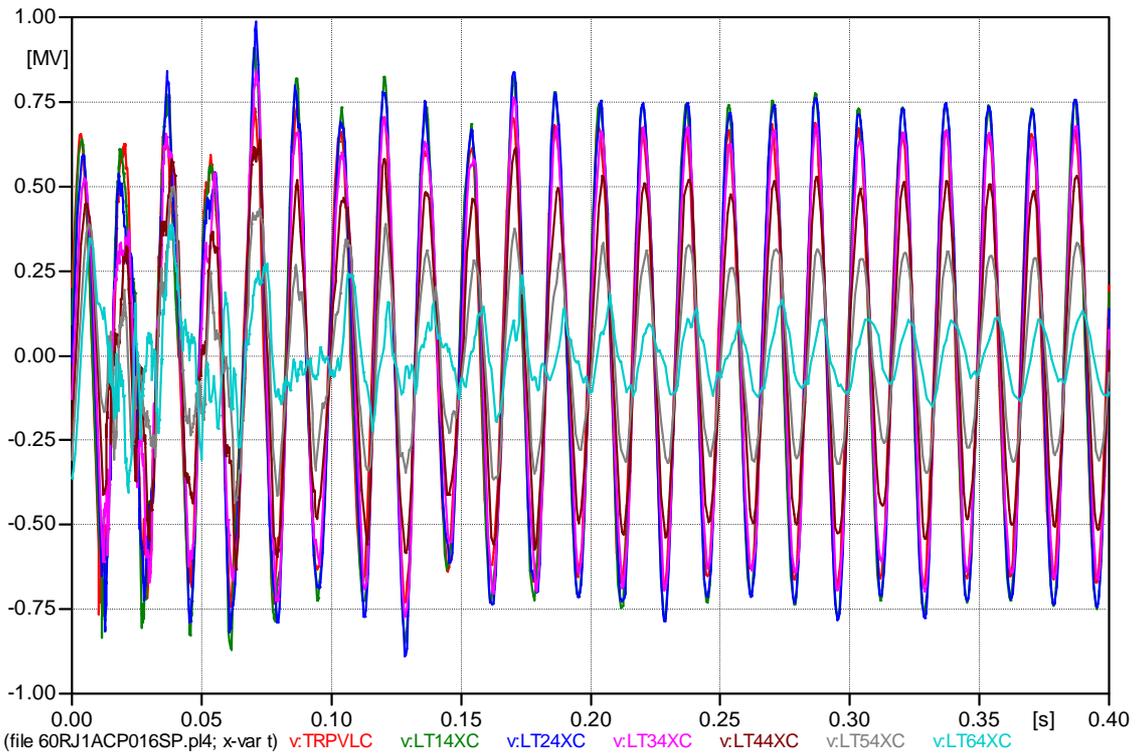


Fig. A4-10- Defeito Monofásico em Porto Velho, em $V=0$, após Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra de Porto Velho ao meio da LT, a cada 208 km da LT

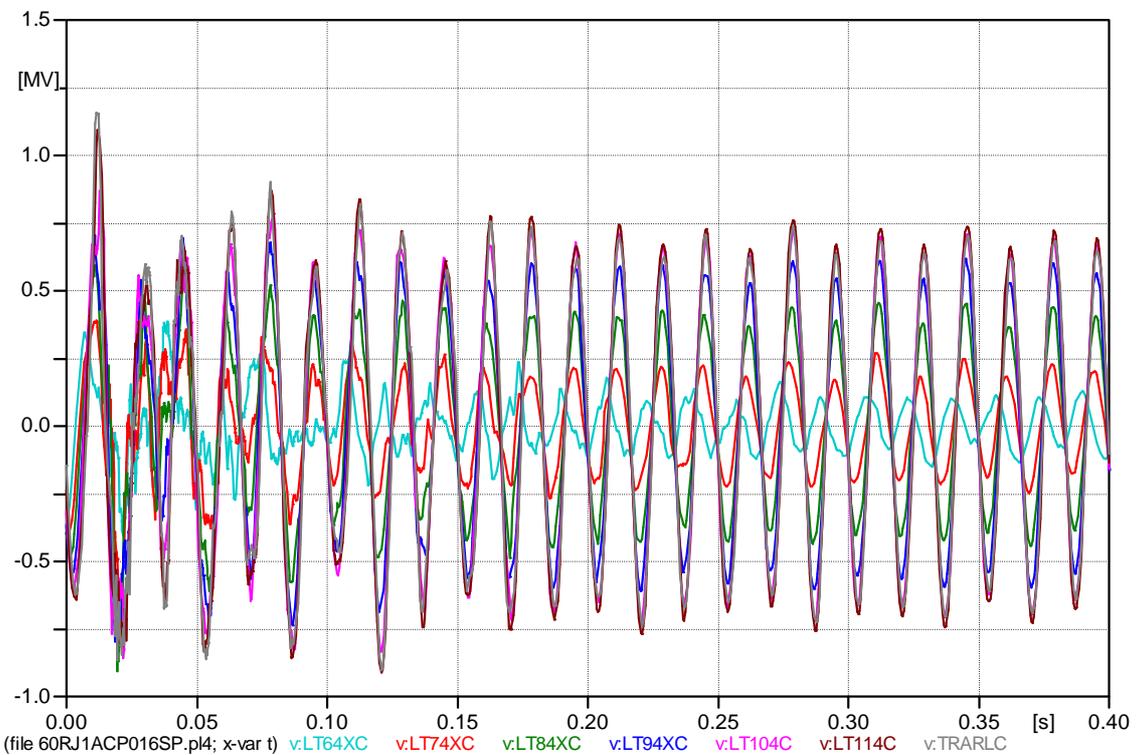


Fig. A4-11- Defeito Monofásico em Porto Velho, em $V=0$, após Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra de Porto Velho ao meio da LT, a cada 208 km da LT

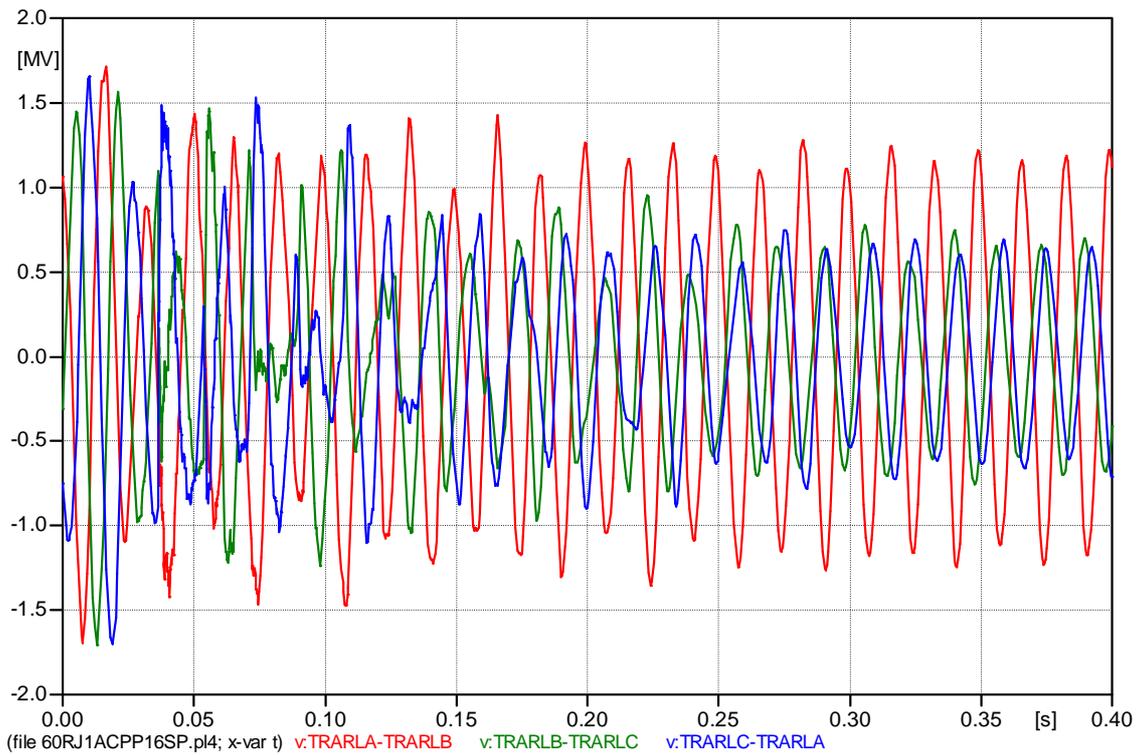


Fig. A4-12- Defeito Monofásico em Porto Velho, em $V=V_{max}$, após Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-fase em Araraquara

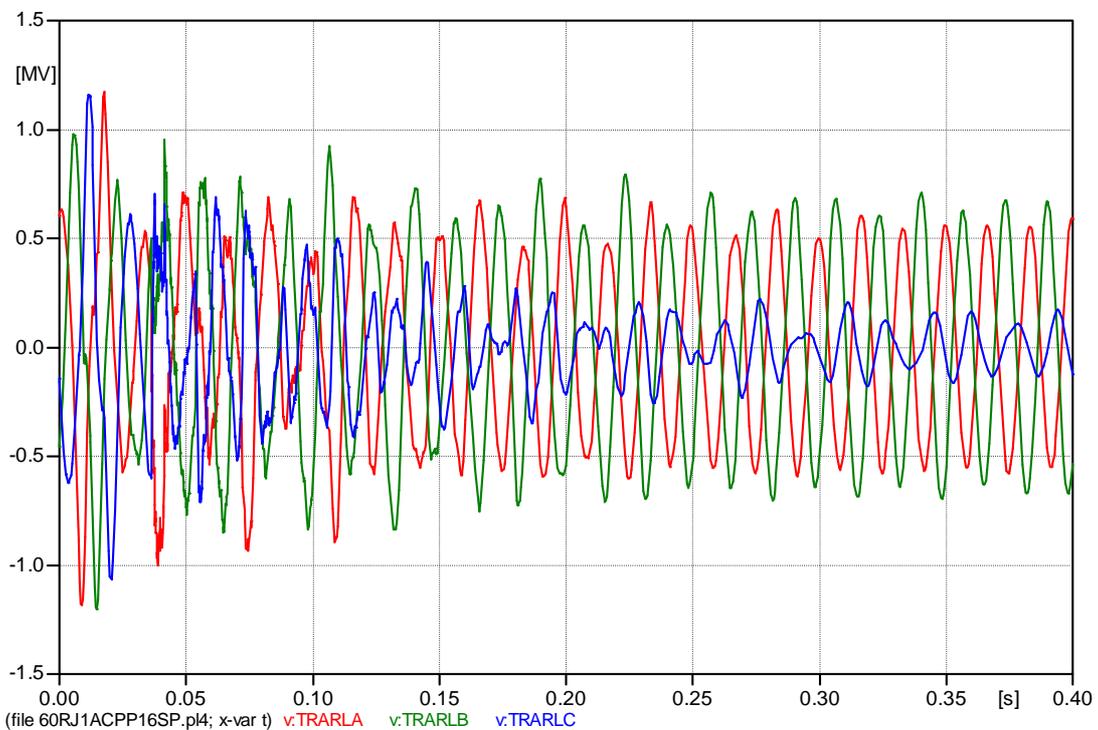


Fig. A4-13- Defeito Monofásico em Porto Velho, em $V=V_{max}$, após Rejeição de carga em Araraquara de apenas um circuito - Tensão fase-terra em Araraquara

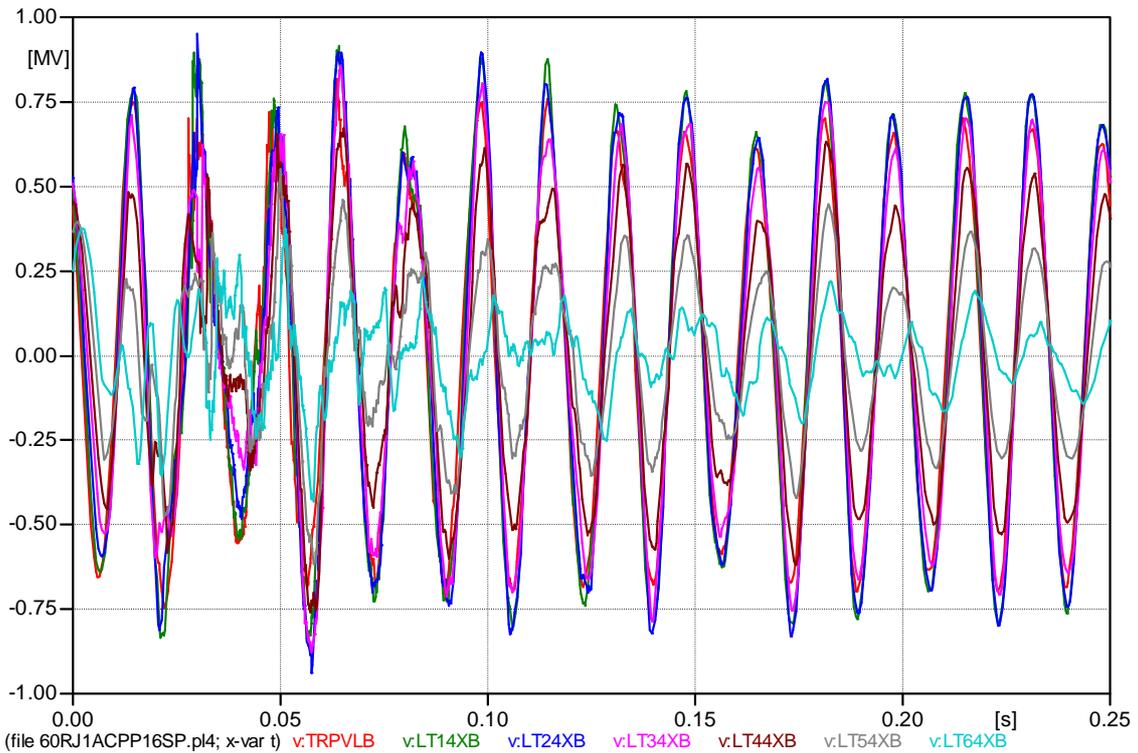


Fig. A4-14- Defeito Monofásico em Porto Velho, em $V=V_{max}$, após Rejeição de carga em Araraquara de um circuito - Tensão fase-terra de Porto Velho ao meio da LT, a cada 208 km

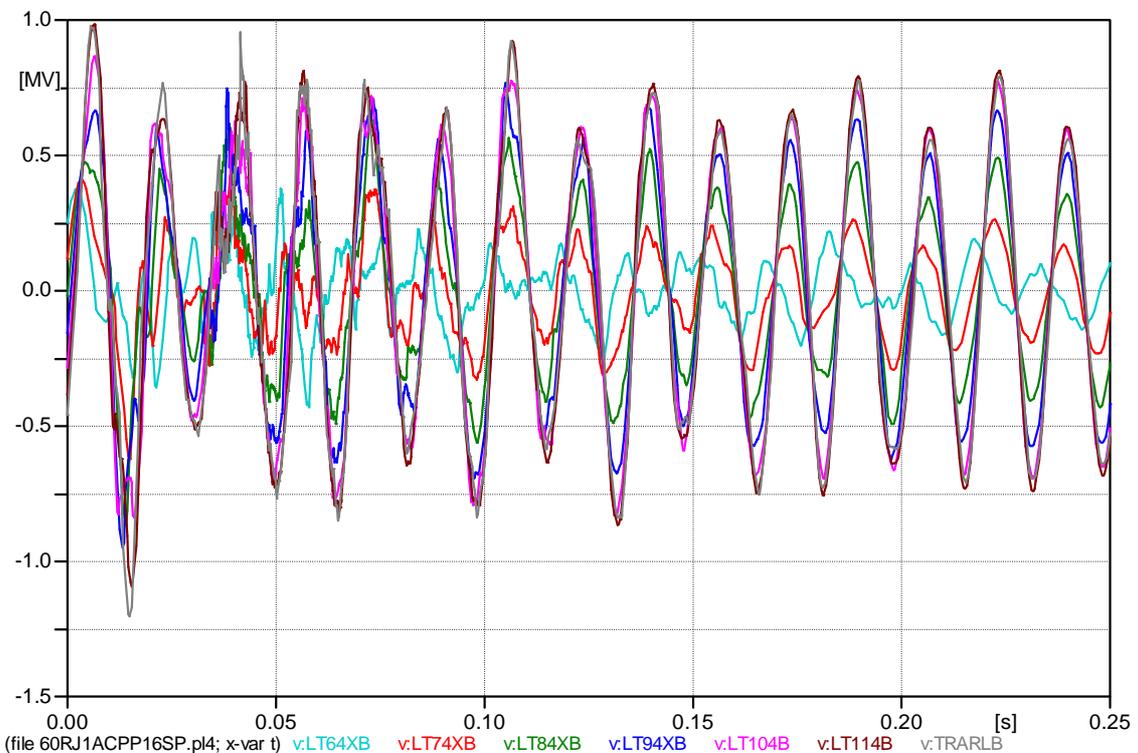


Fig. A4-15- Defeito Monofásico em Porto Velho, em $V=V_{max}$, após Rejeição de carga em Araraquara de um circuito - Tensão fase-terra de Araraquara ao meio da LT, a cada 208 km

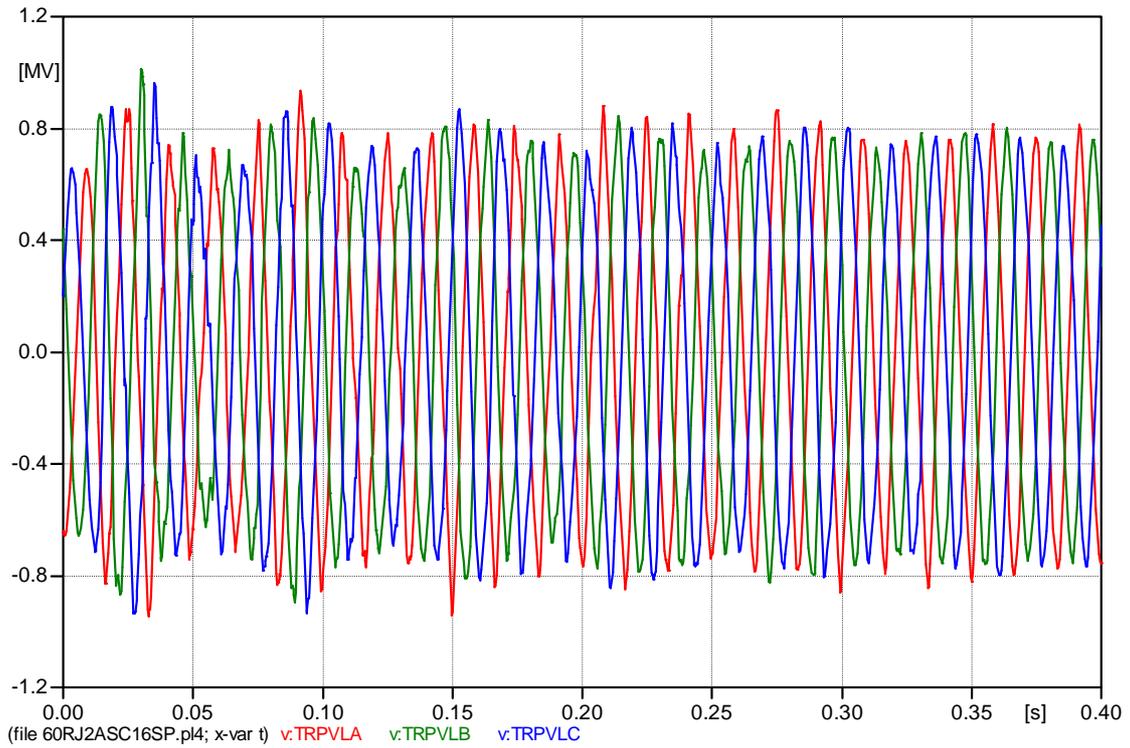


Fig. A4-16- Rejeição dos dois circuitos em Araraquara - Tensão fase-terra em Porto Velho

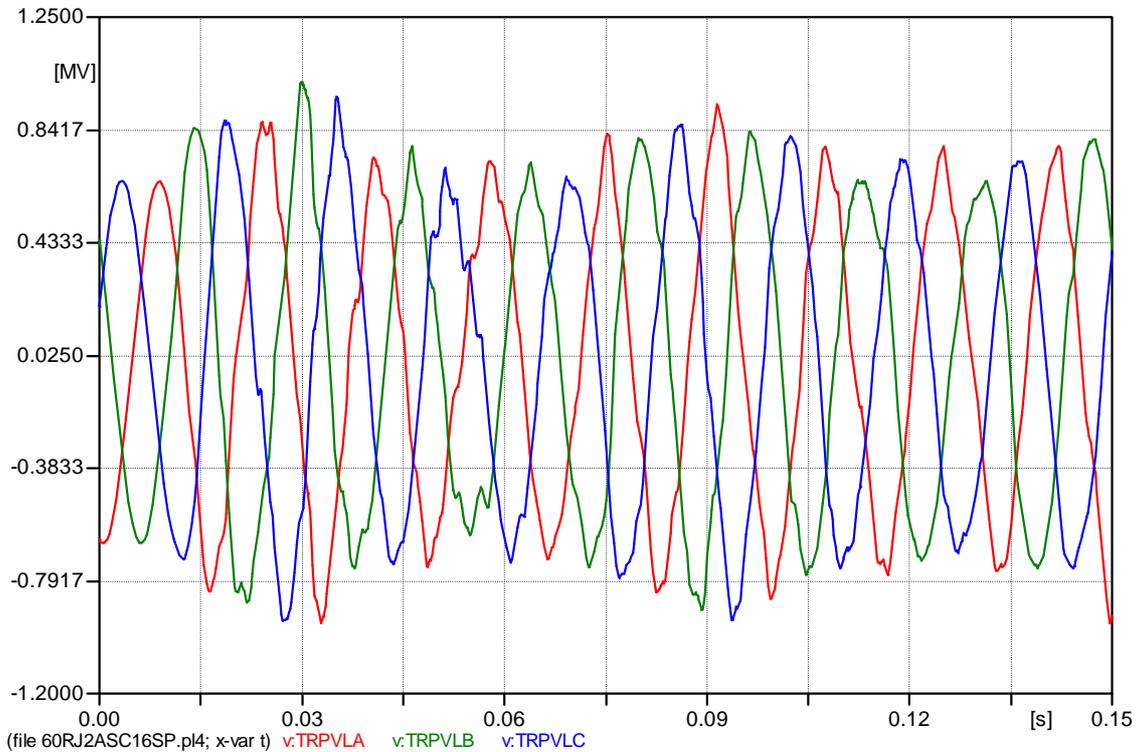


Fig. A4-17- Rejeição dos dois circuitos em Araraquara - Tensão fase-terra em Porto Velho

TESTE TRANSPOSIÇÃO LINHÃO COM 2500 KM

HIPOTESE 1 :

LT DIVIDIDA EM 12 TRECHOS, COM Transposição Direta (TD) COMPLETA EM CADA UM DELES, +TD COMPLETA DA LT TOTAL.

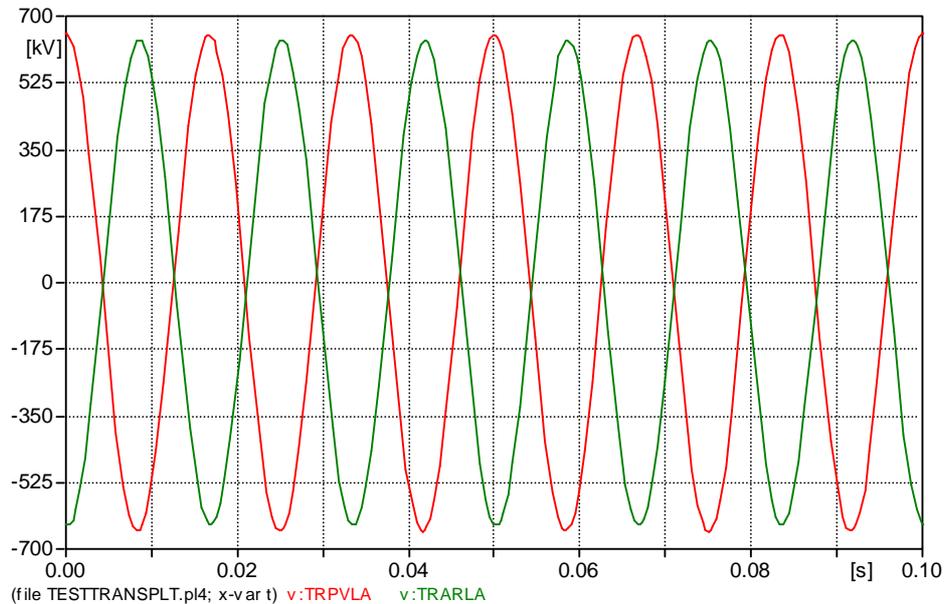


Fig. A4-18- Teste de Transposição / Hipótese 1- Tensão fase-terra em Porto Velho (TRPVLA) e Araraquara (TRARLA)

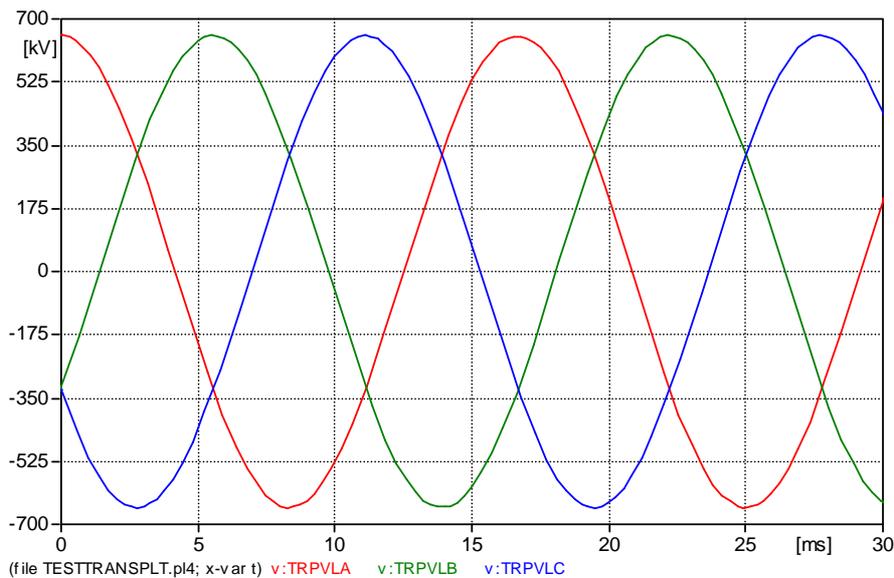


Fig. A4-19- Teste de Transposição / Hipótese 1 - Tensão fase-terra em Porto Velho

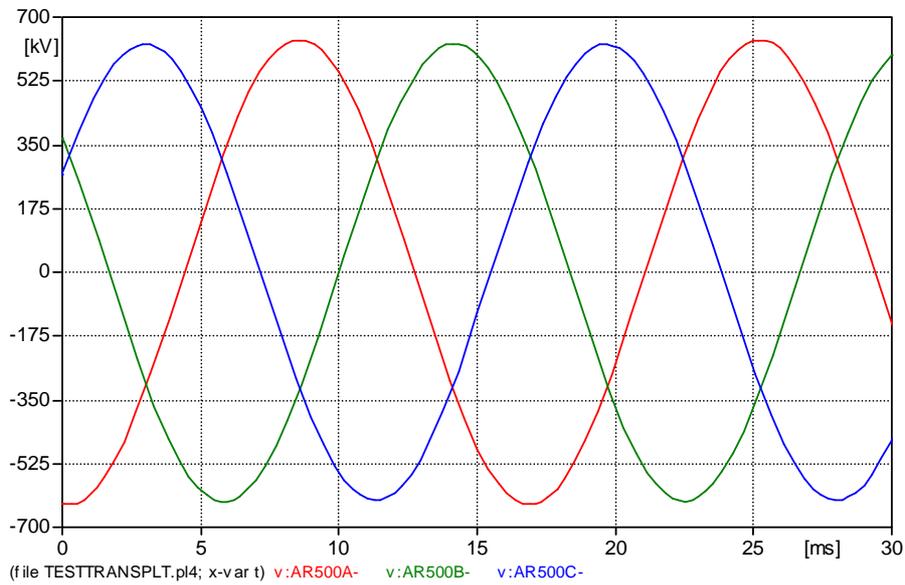


Fig. A4-20 - Teste de Transposição / Hipótese 1 - Tensão fase-terra em Araraquara

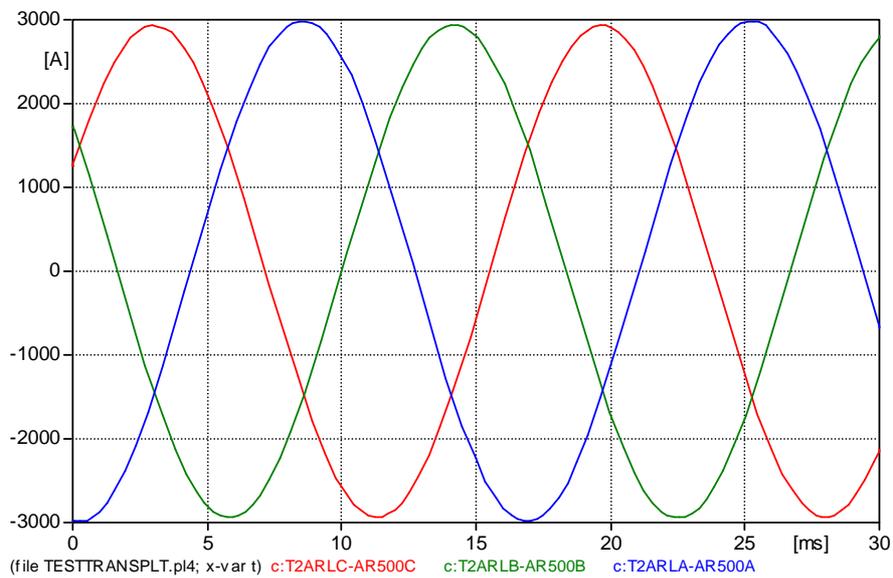


Fig. A4-21 - Teste de Transposição / Hipótese 1- Tensão fase-terra em Araraquara

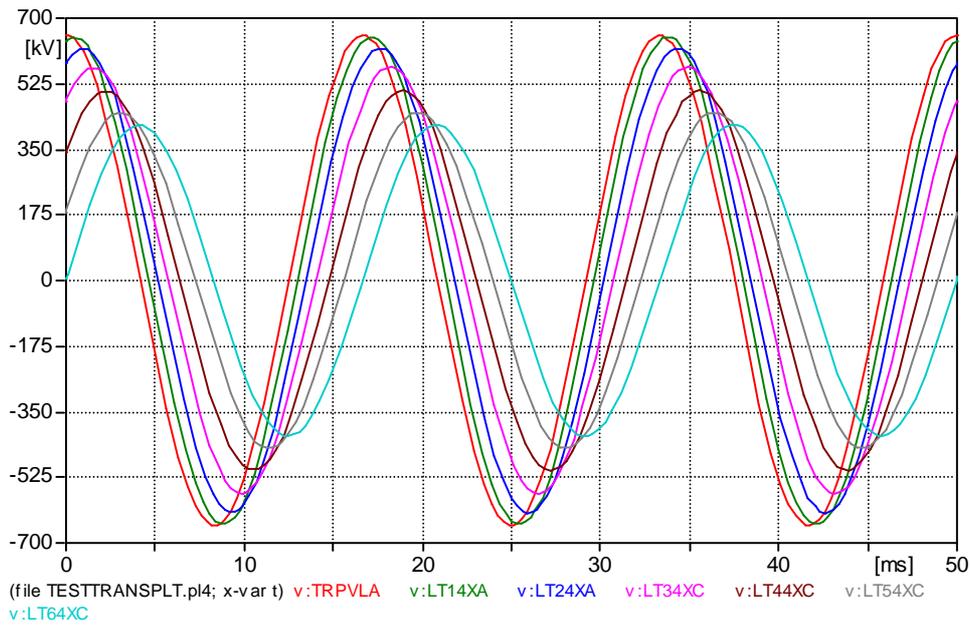


Fig. A4-22 - Teste de Transposição / Hipótese 1- Tensão fase-terra de Porto Velho ao meio da LT, a cada 208 km

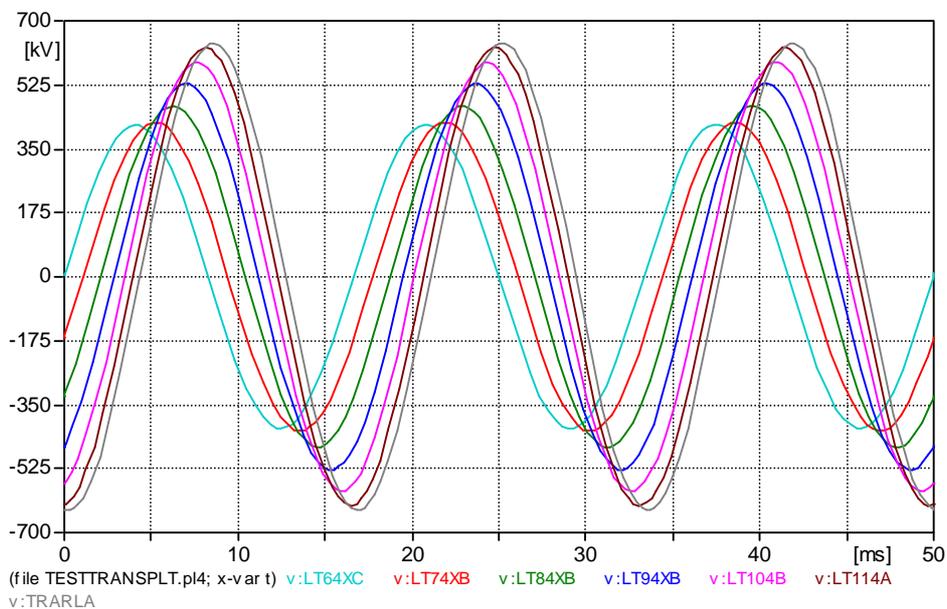


Fig. A4-23 - Teste de Transposição / Hipótese 1- Tensão fase-terra de Araraquara ao meio da LT, a cada 208 km

LT DIVIDIDA EM 12 TRECHOS, COM TD COMPLETA EM CADA UM DELES, sem TD DA
LT TOTAL.

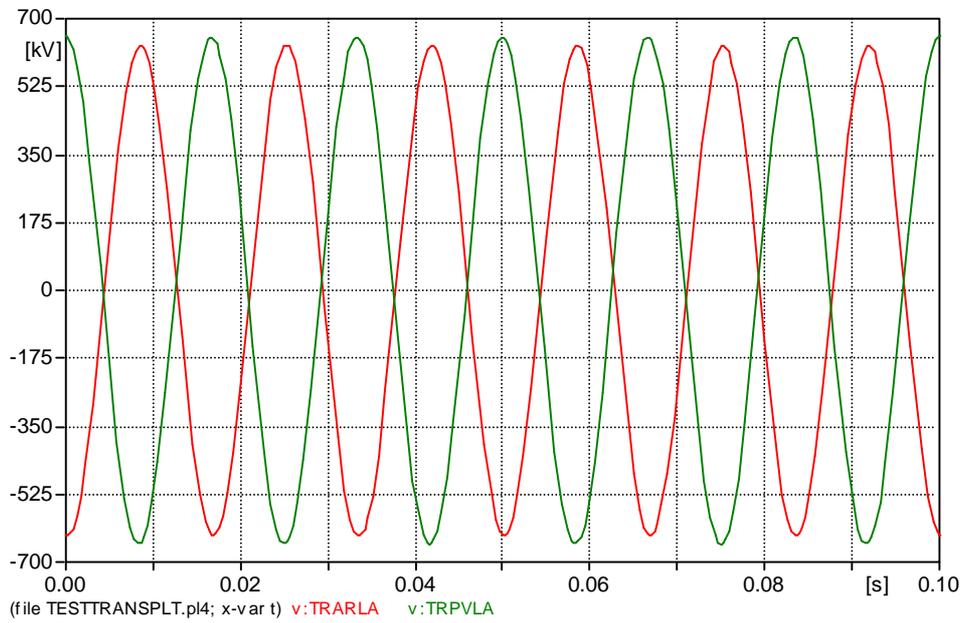


Fig. A4-24 - Teste de Transposição / Hipótese 2- Tensão fase-terra em Porto Velho e em Araraquara

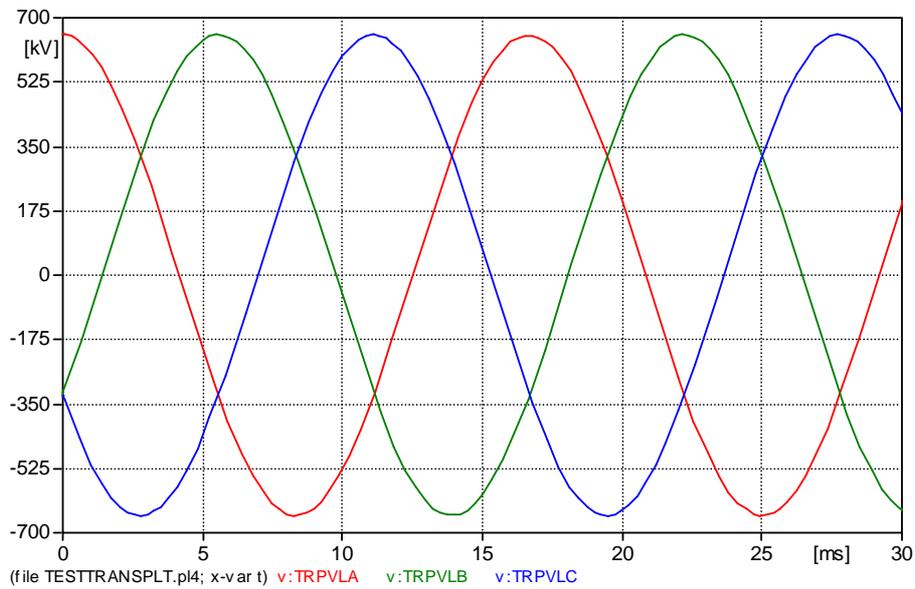


Fig. A4-25 - Teste de Transposição / Hipótese 2- Tensão fase-terra em Porto Velho e em Araraquara

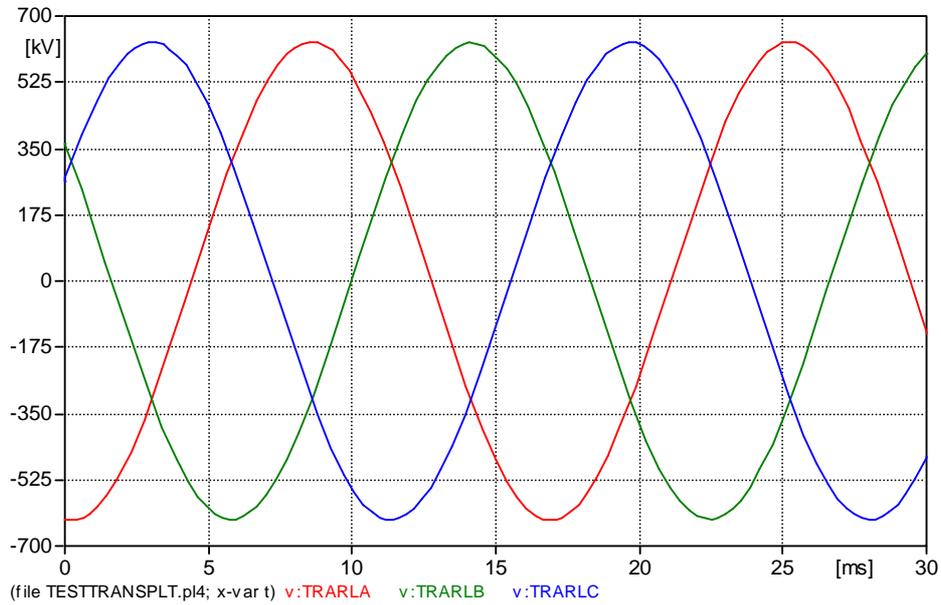


Fig. A4-26 - Teste de Transposição / Hipótese 2- Tensão fase-terra em Araraquara

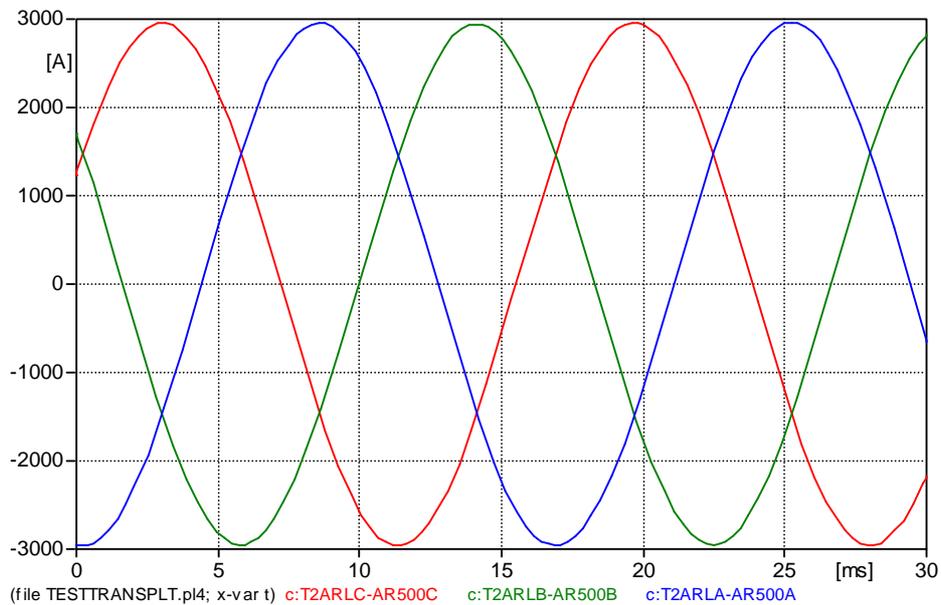


Fig. A4-27 - Teste de Transposição / Hipótese 2- Corrente em Araraquara

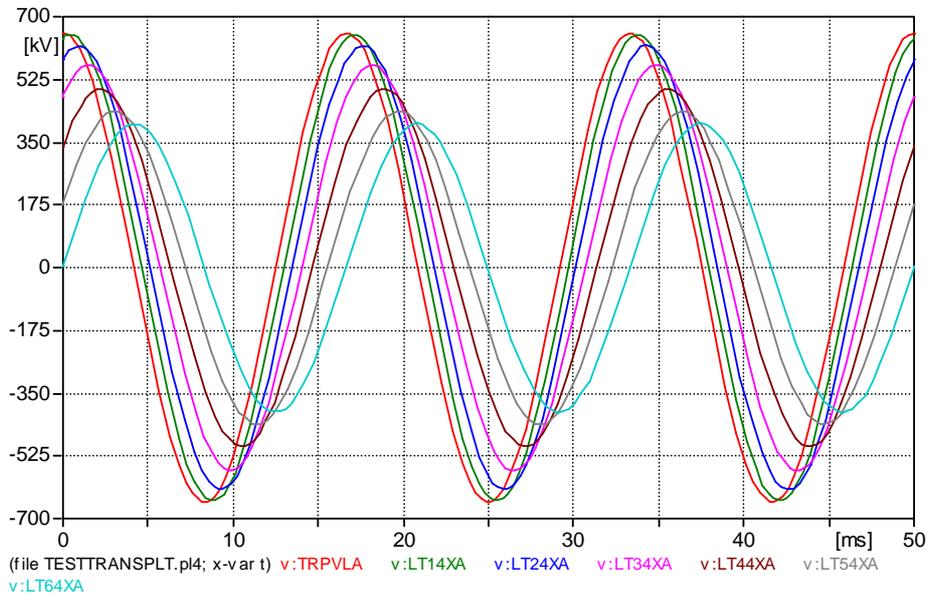


Fig. A4-28 - Teste de Transposição / Hipótese 2- Tensão fase-terra de Porto Velho ao meio da LT, a cada 208 km

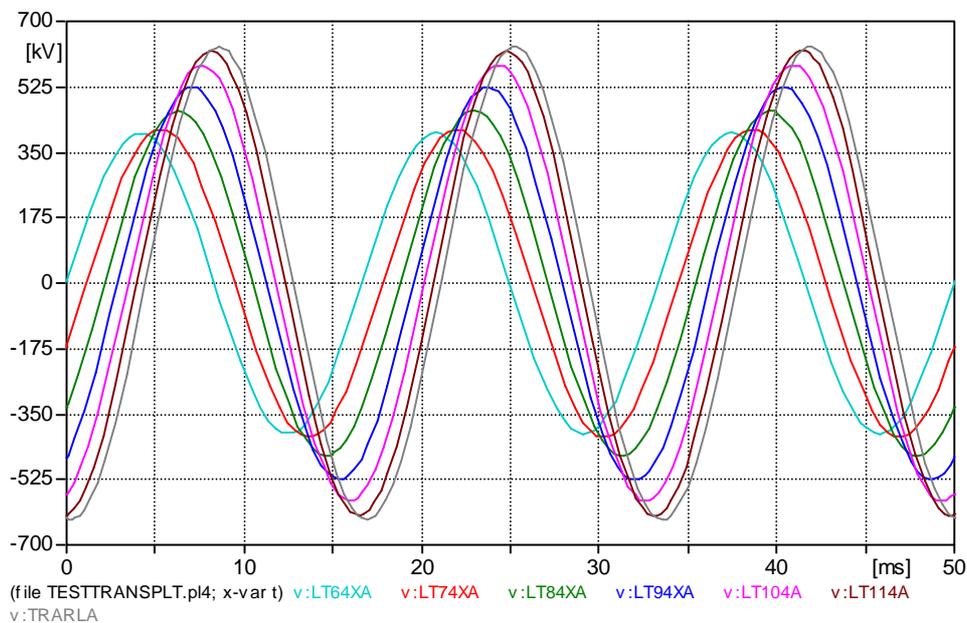


Fig. A4-29 - Teste de Transposição / Hipótese 2- Tensão fase-terra de Araraquara ao meio da LT, a cada 208 km

Transcrição do DT411 – P&D “Modelagem do Arco Elétrico para Estudos de Religamento Monofásico” (autor : Carlos Portela)

Estimativa preliminar de gama plausível de impedância de curto-circuito dos autotransformadores ligados nos terminais das linhas de pouco mais de meia onda

Neste DT411 indico uma estimativa preliminar de gama plausível de impedância de curto-circuito dos autotransformadores ligados nos terminais das linhas de pouco mais de meia onda, supondo bancos trifásicos de autotransformadores monofásicos, com enrolamentos “principais” ligados em estrela aterrada e enrolamentos terciários ligados em triângulo (com eventual impedância inserida em série com os enrolamentos do triângulo), para uma das hipóteses construtivas plausíveis, e dentro de gamas que se afiguram possíveis sem dificuldades construtivas nem aumento de custo importantes.

Considero, como exemplo, um banco trifásico ligado num conjunto de terminais correspondente a tensão nominal, entre fases, 500 kV e num conjunto de terminais correspondente a relação de transformação, em vazio, 500 kV / (400 kV a 800 kV , com regulação de relação de transformação em carga). A impedância de curto-circuito indicada na Fig. 1, Z_{pu} , corresponde à impedância (módulo) do esquema equivalente do banco trifásico para operação balanceada (componente direta ou inversa) a frequência industrial, colocada diretamente em série nos terminais de tensão nominal com regulação em carga U_{20} (de 400 kV a 800 kV, entre fases), do banco trifásico, e está expressa em pu de $(800 \text{ kV})^2 / S_{nom}$, sendo S_{nom} a potência aparente “atravessante” nominal do banco trifásico, na tomada de 800 kV , expressa em MVA.

A impedância expressa em Ohm, $Z\Omega$, é

$$Z\Omega = Z_{pu} \cdot (800 \text{ kV})^2 / S_{nom}$$

Saliento que, com as convenções de definição adotadas, o fator de conversão de Z_{pu} em $Z\Omega$ é $(800 \text{ kV})^2 / S_{nom}$ e não $(U_{20})^2 / S_{nom}$

Na Fig. 1 indico uma estimativa da gama (delimitada em ordem de grandeza pelas curvas em vermelho e roxo) de Z_{pu} , em função de U_{20} , nas hipóteses acima mencionadas.

Noto que considero conveniente adotar algumas precauções de especificação destes autotransformadores, nomeadamente quanto a:

- Eventuais tomadas nos terminais de “500 kV” .
- Impedâncias de curto-circuito relativas ao enrolamentos principais e entre os enrolamentos principais e o enrolamento terciário.
- Potência nominal e tensão nominal do enrolamento terciário.
- Capacidade de sobrecarga de enrolamentos principais e de terciário.
- Comutadores de regulação em carga.

- Buchas.
- Coordenação de isolamento.
- Transformadores de corrente.
- Critério de atuação de proteções.

2/2

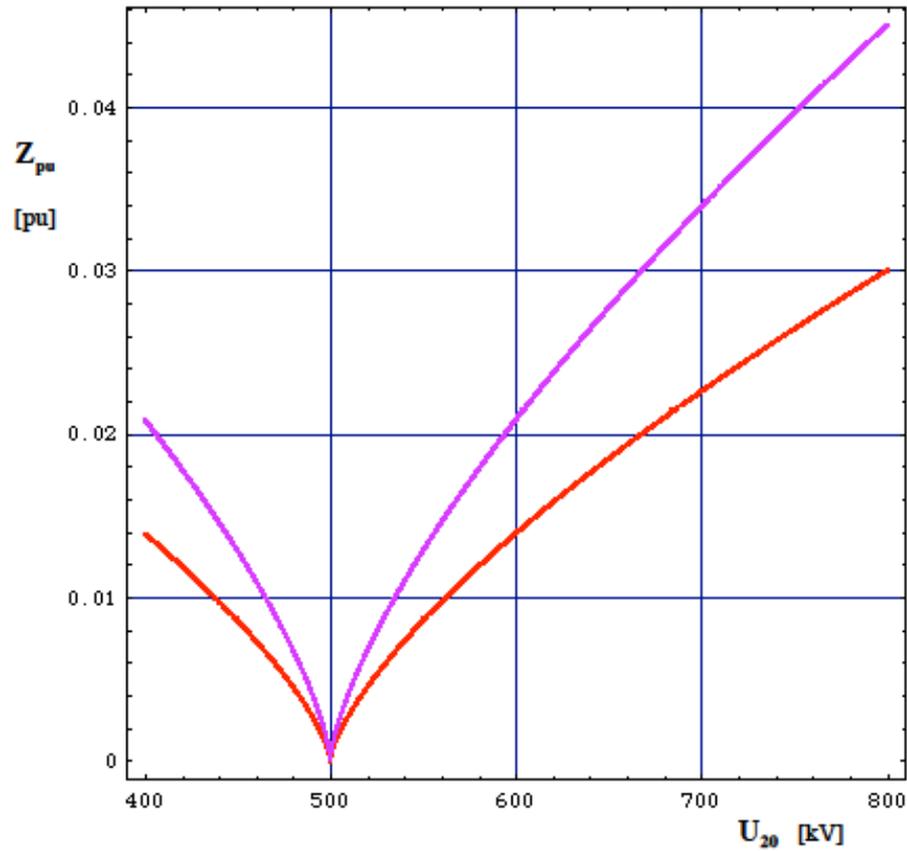


Fig. 1 – Estimativa da gama (delimitada, em ordem de grandeza, pelas curvas em vermelho e roxo) de Z_{pu} , em função de U_{20} , nas hipóteses mencionadas no texto.

Rio de Janeiro, 19 de Novembro de 2007

Carlos Portela

DT 412 - Exemplo 800 kV – 8 Bittern G

Linha de 2500 km, 800 kV com 8 cabos Bittern por fase, tendo os parâmetros a 60 Hz, para operação balanceada:

Impedância longitudinal unitária $0,006600 + i 0,17248 \Omega$

Admitância transversal unitária $i 9,902 \mu\text{S} / \text{km}$

Impedância característica $132,0 - i 2,5 \Omega$

Potência característica a 800 kV 4847 MW

Parâmetros homopolares :

Impedância longitudinal unitária $0,3415 + i 1,07154 \Omega /$

Admitância transversal unitária $i 3,9958 \mu\text{S} / \text{km}$

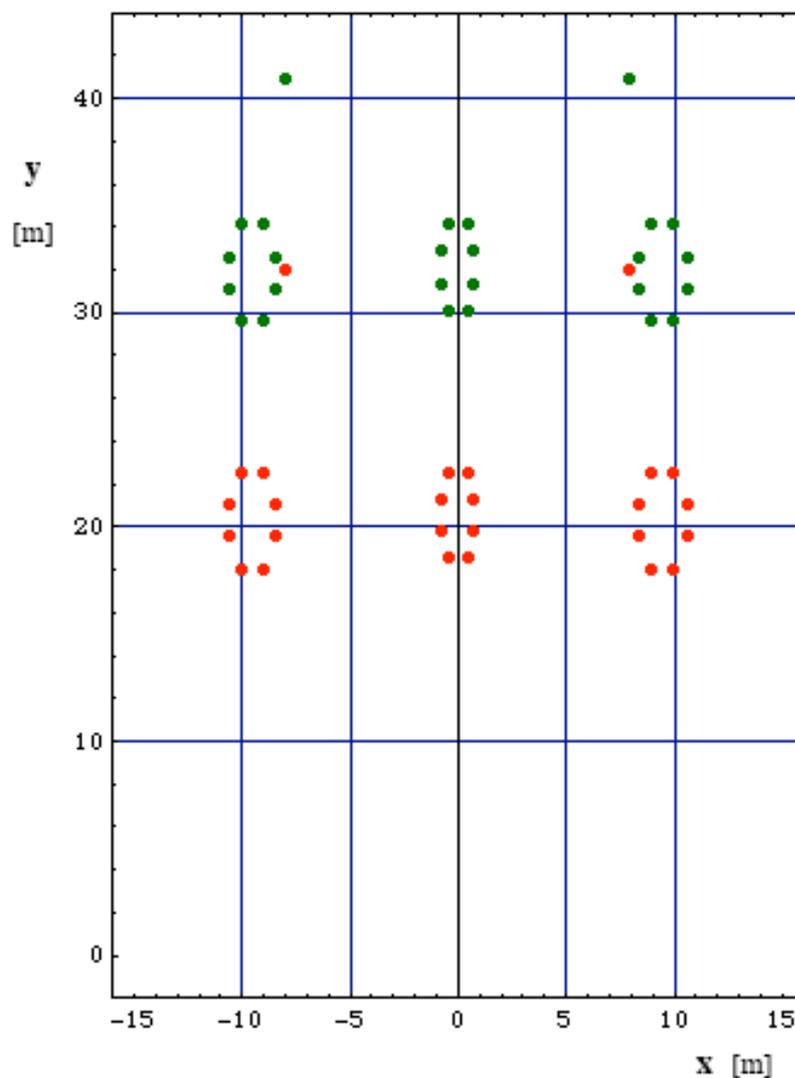


Fig. 1 – Disposição dos condutores, a meio do vão (em vermelho) e junto da estrutura (em verde), num vão de 500 m, em terreno plano horizontal, sem vento, com condutores a 25 °C .

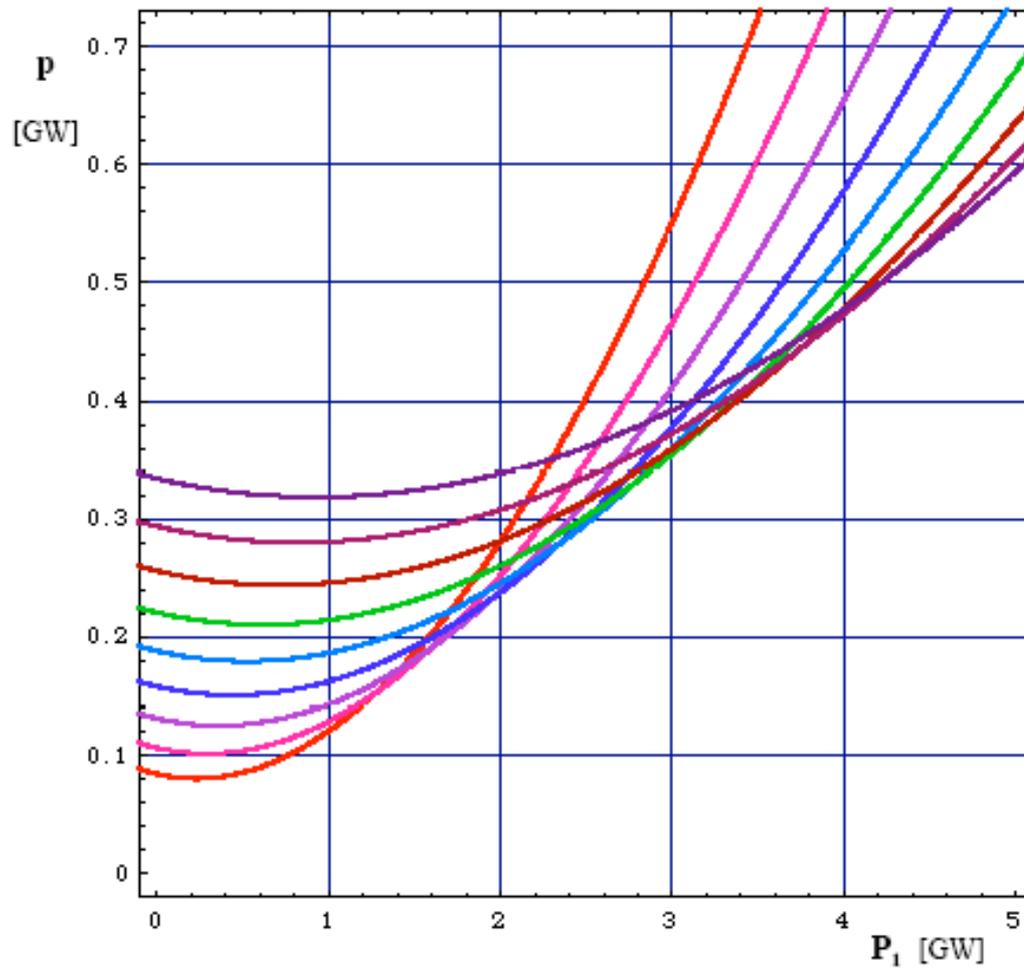


Fig. 2-a – Perdas na linha, p , em função da potência no terminal 1, P_1 , para diversos valores da tensão no terminal 1, $|U_1|$, correspondendo cada curva a um valor de $|U_1|$ (400 kV, 450 kV, ..., 750 kV, 800 kV), para $|U_2 / U_1| = 0,90$. A variação de $|U_1|$ e de $|U_2|$, por exemplo por meio de variação da relação de transformação de transformadores, permite que as perdas na linha correspondam, aproximadamente, à envolvente das curvas para $|U_1|$ (e eventualmente $|U_2 / U_1|$) variando numa gama selecionada.

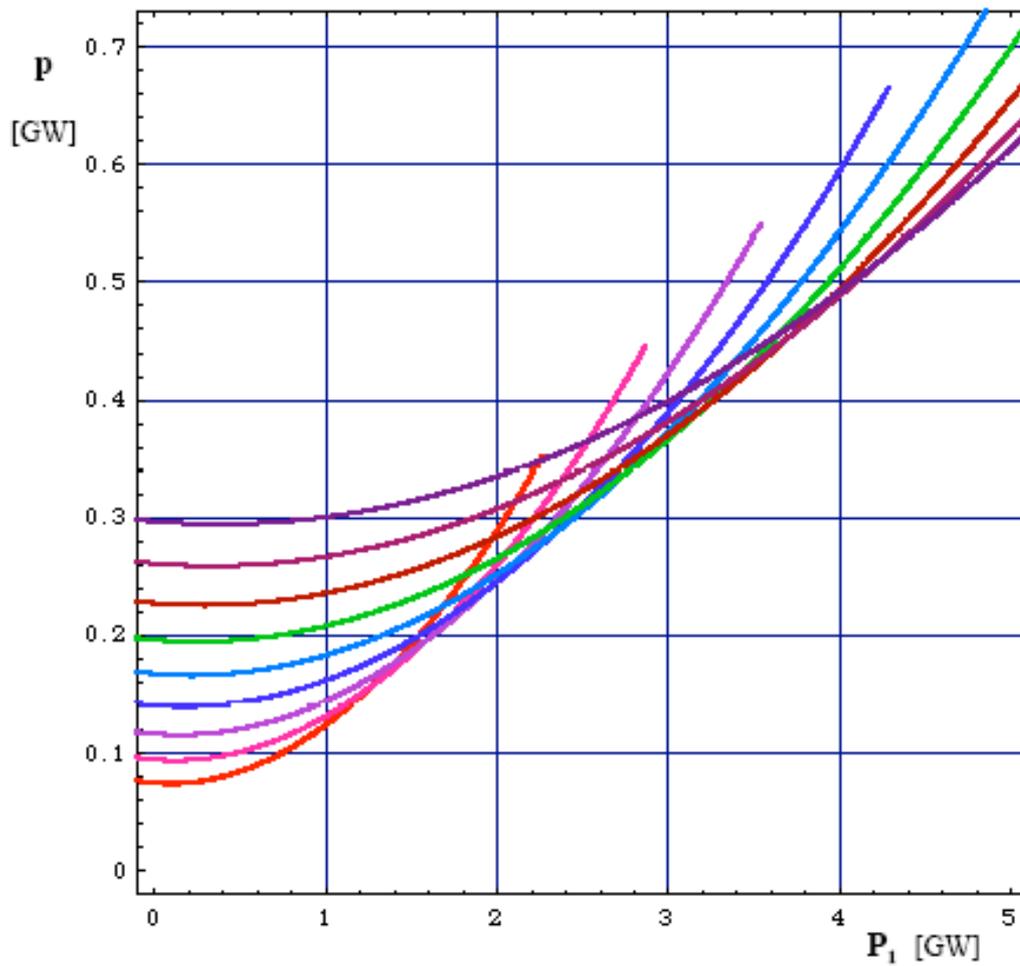


Fig. 2-b – Perdas na linha, p , em função da potência no terminal 1, P_1 , para diversos valores da tensão no terminal 1, $|U_1|$, correspondendo cada curva a um valor de $|U_1|$ (400 kV, 450 kV, ..., 750 kV, 800 kV), para $|U_2 / U_1| = 0,95$. A variação de $|U_1|$ e de $|U_2|$, por exemplo por meio de variação da relação de transformação de transformadores, permite que as perdas na linha correspondam, aproximadamente, à envolvente das curvas para $|U_1|$ (e eventualmente $|U_2 / U_1|$) variando numa gama selecionada.

ANEXO 5

Curvas relacionadas ao comportamento do arco no ar

As curvas apresentadas a seguir referem-se a aspectos físicos que condicionam os modelos “caixa-cinzenta”, como o utilizado nesse trabalho . Tais curvas retratam o comportamento do arco em bases empíricas anteriores ao da pesquisa em curso, servindo de base tanto para o desenvolvimento teórico quanto para cálculos diretos de ajuste do modelo estudado.

RESULTADOS DE MODELAGEM DE ARCO NO AR, EM REGIME ESTACIONARIO [1]

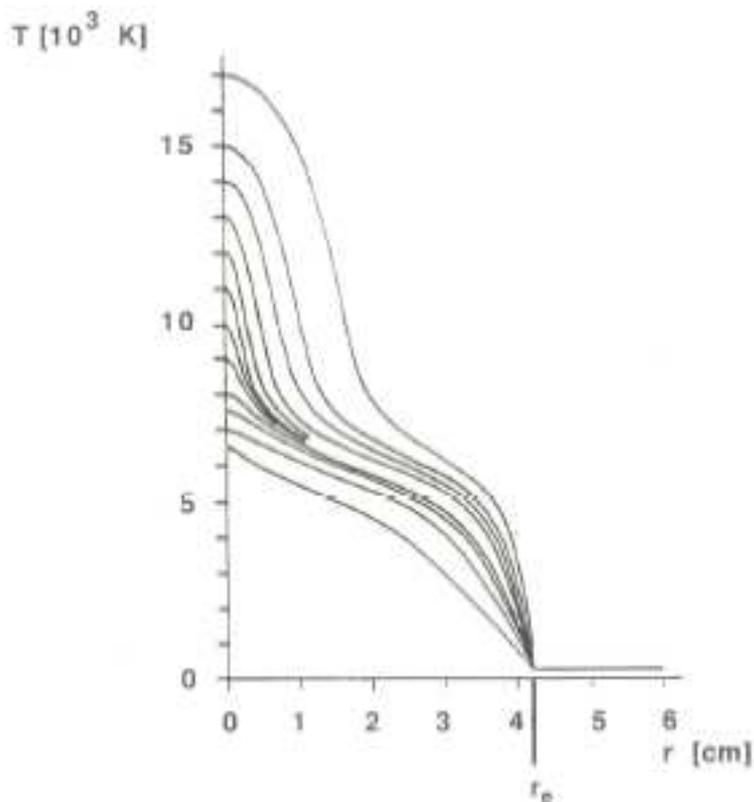


Fig. A5-1

Perfis de temperatura, num arco em condições estabilizadas, em função da distância, r , ao eixo [1].

[1] Portela, C. - Alguns Métodos de Análise de Comportamento de Arcos Elétricos no Ar . Exemplos de Aplicação - VIII SNPTEE, São Paulo, 1986, art. SP/GSP/47, 18 p.

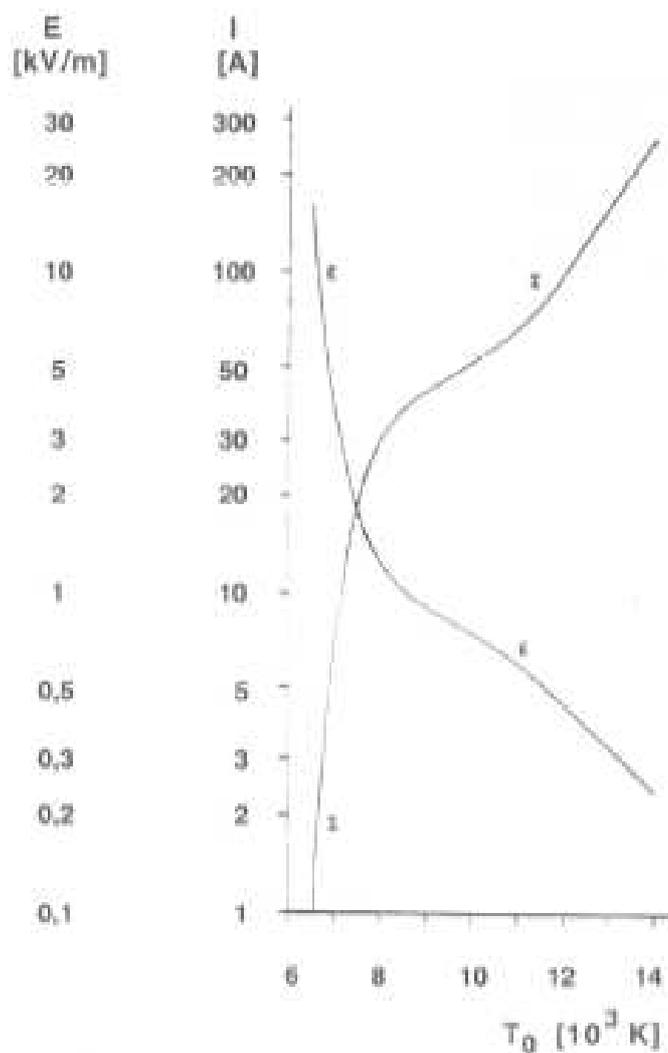


Fig. A5-2

Corrente, I, e campo elétrico, E, em função da temperatura central do arco, T₀, nas hipóteses de [1].

[1] Portela, C. - Alguns Métodos de Análise de Comportamento de Arcos Elétricos no Ar. Exemplos de Aplicação - VIII SNPTEE, São Paulo, 1986, art. SP/GSP/47, 18 p.

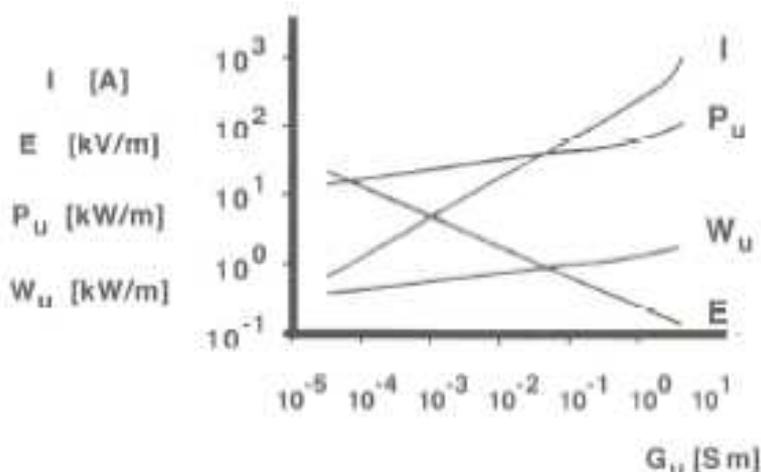


Fig. A5-3

Parâmetros I , E , P_u , W_u , em função de G_u , em condições estabilizadas, nas hipóteses de [1].

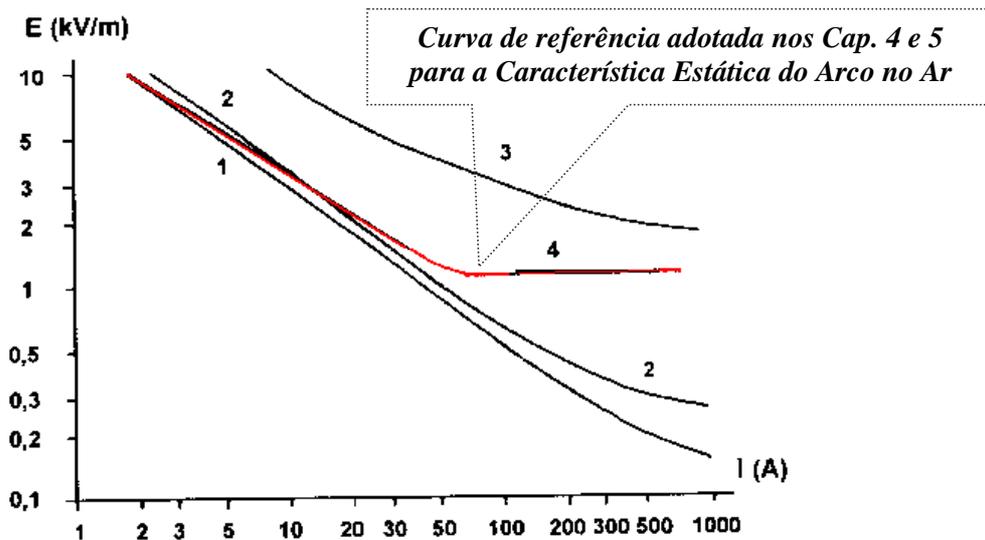


Fig. A5-4

Relação entre o campo longitudinal, E , e a corrente, I , para um arco em condições estacionárias [1].
 1 , 2 , 3 - resultados de simulação, para diferentes níveis de convecção.
 4 - Resultados experimentais, segundo King, L. - Electrical Research Association Report 6/XT 172.

[1] Portela, C. - Alguns Métodos de Análise de Comportamento de Arcos Elétricos no Ar . Exemplos de Aplicação - VIII SNPTEE, São Paulo, 1986, art. SP/GSP/47, 18 p.

ANEXO 6

Formulação da Impedância Incremental para Modelos de Arco

Formulação da Impedância Incremental para Modelos de Arco
Equação Básica **Impedância Incremental**

1) θ const. P_0 const. (modelo de Mayr)

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_1} \cdot \left[\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right]$$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p - \frac{1}{\theta_1}}{p + \frac{1}{\theta_1}}$$

2) θ const. $P_0 = a + b \cdot \sqrt{|i|} + c \cdot |i|$

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_2} \cdot \left[\frac{u \cdot i}{a + b \cdot \sqrt{|i|} + c \cdot |i|} - 1 \right]$$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p - \frac{\alpha^*}{\theta_2}}{p + \frac{1}{\theta_2}}$$

$$\alpha^* = \frac{b \cdot \sqrt{|i_1|}}{a + b \cdot \sqrt{|i_1|} + c \cdot |i_1|}$$

3) Modelo de Thiel

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_3} \cdot \left[\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right]$$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p - \frac{1}{\theta_3} \cdot (1-\beta)}{p + \frac{1}{\theta_3} \cdot (1+\beta)}$$

$$\theta_3 = A^* \cdot g^\alpha \quad P_0 = B \cdot g^\beta$$

4) Modelo de Cassie

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_4} \cdot \left[\left(\frac{u}{U_0} \right)^2 - 1 \right]$$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p}{p + \frac{2}{\theta_4}}$$

θ_4 constante, U_0 constante

5) $\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_5} \cdot \left[\left(\frac{|u|}{U_{0i}} \right) - 1 \right]$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p}{p + \frac{1}{\theta_5}}$$

θ_5 constante, U_0 constante

6) $\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_6} \cdot \left[\frac{u \cdot i}{P_0} - 1 \right]$

$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p - \frac{1}{\theta_6} \cdot (1-\gamma)}{p + \frac{1}{\theta_6}}$$

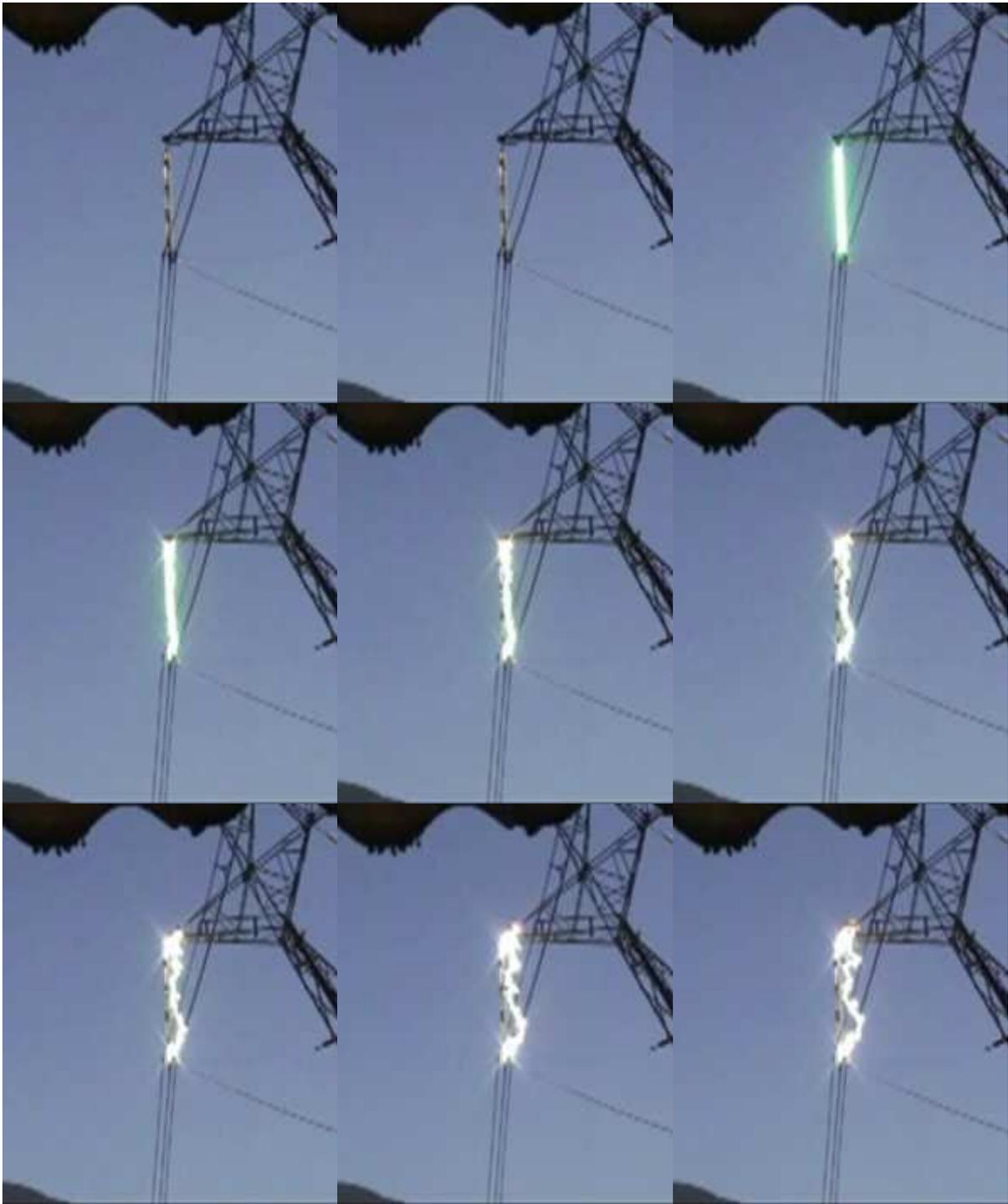
$$\theta_6 = A^* \cdot g^\alpha \quad P_0 = D \cdot i^\gamma$$

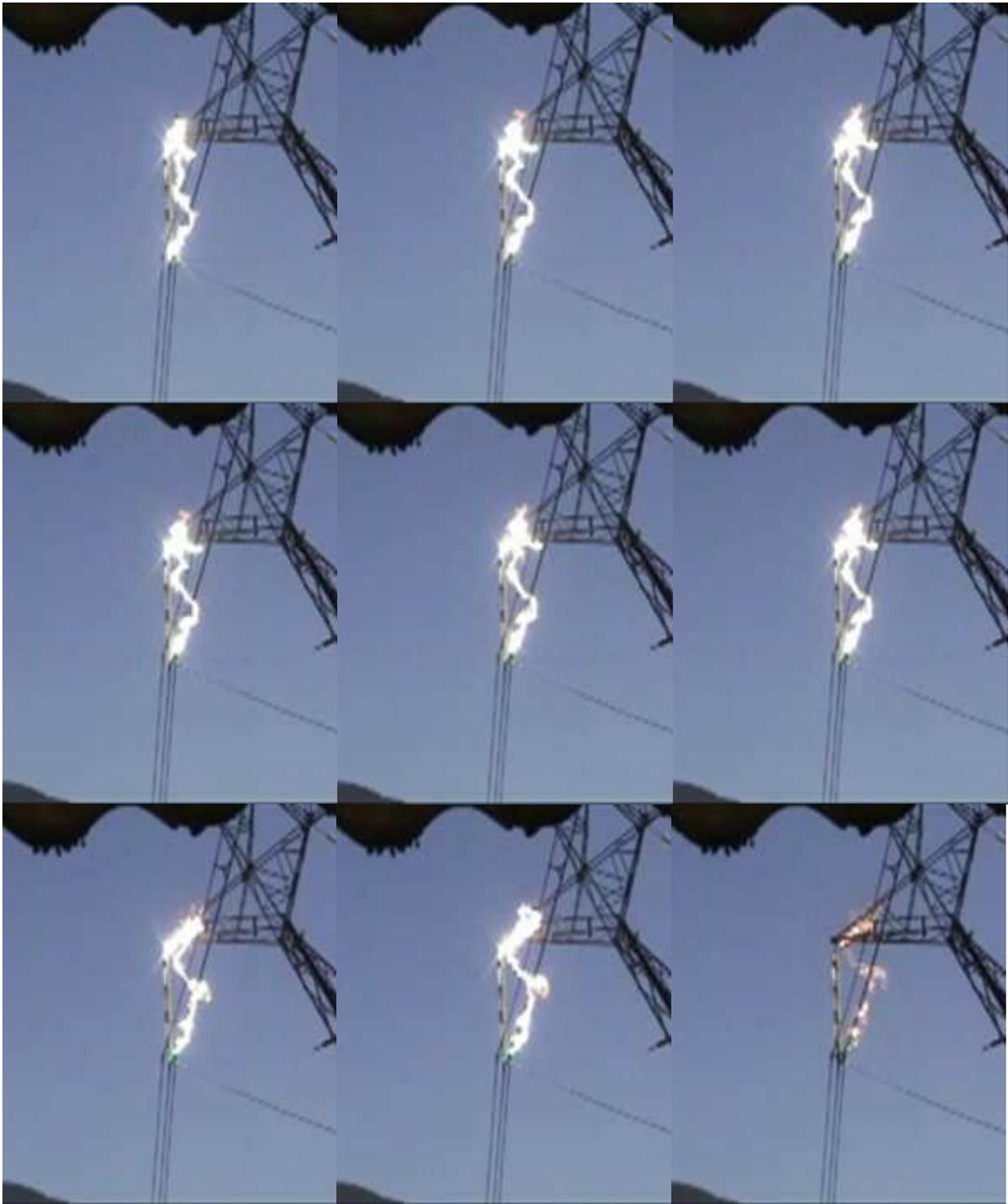
7) $\frac{1}{g} \cdot \frac{dg}{dt} = \frac{1}{\theta_7} \cdot \left[\left(\frac{u \cdot i}{P_0} \right)^\zeta - 1 \right]$

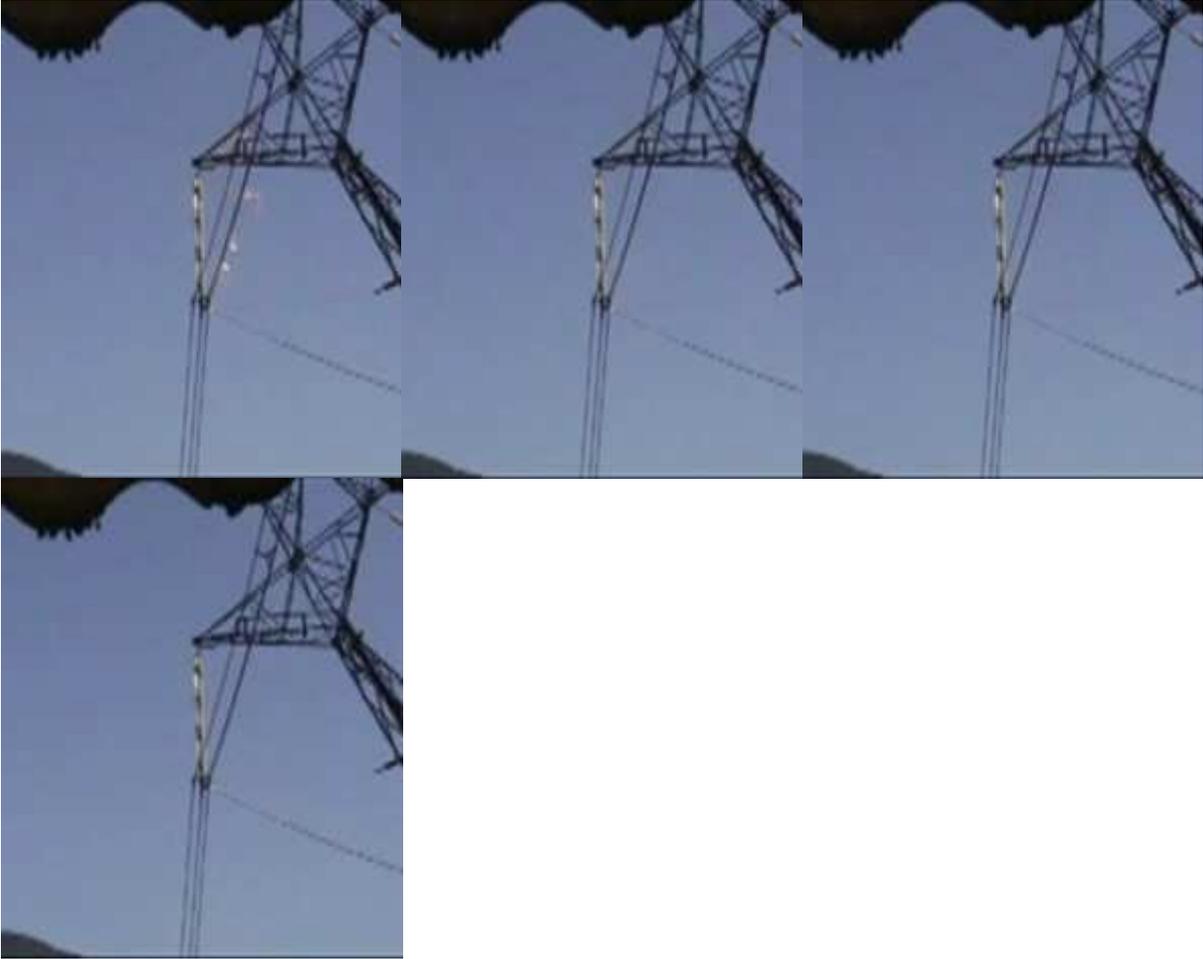
$$Z = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G_1} \cdot \frac{p - \frac{1}{\theta_7} \cdot \zeta \cdot (1-\beta)}{p + \frac{1}{\theta_7} \cdot \zeta \cdot (1+\beta)}$$

ANEXO 7

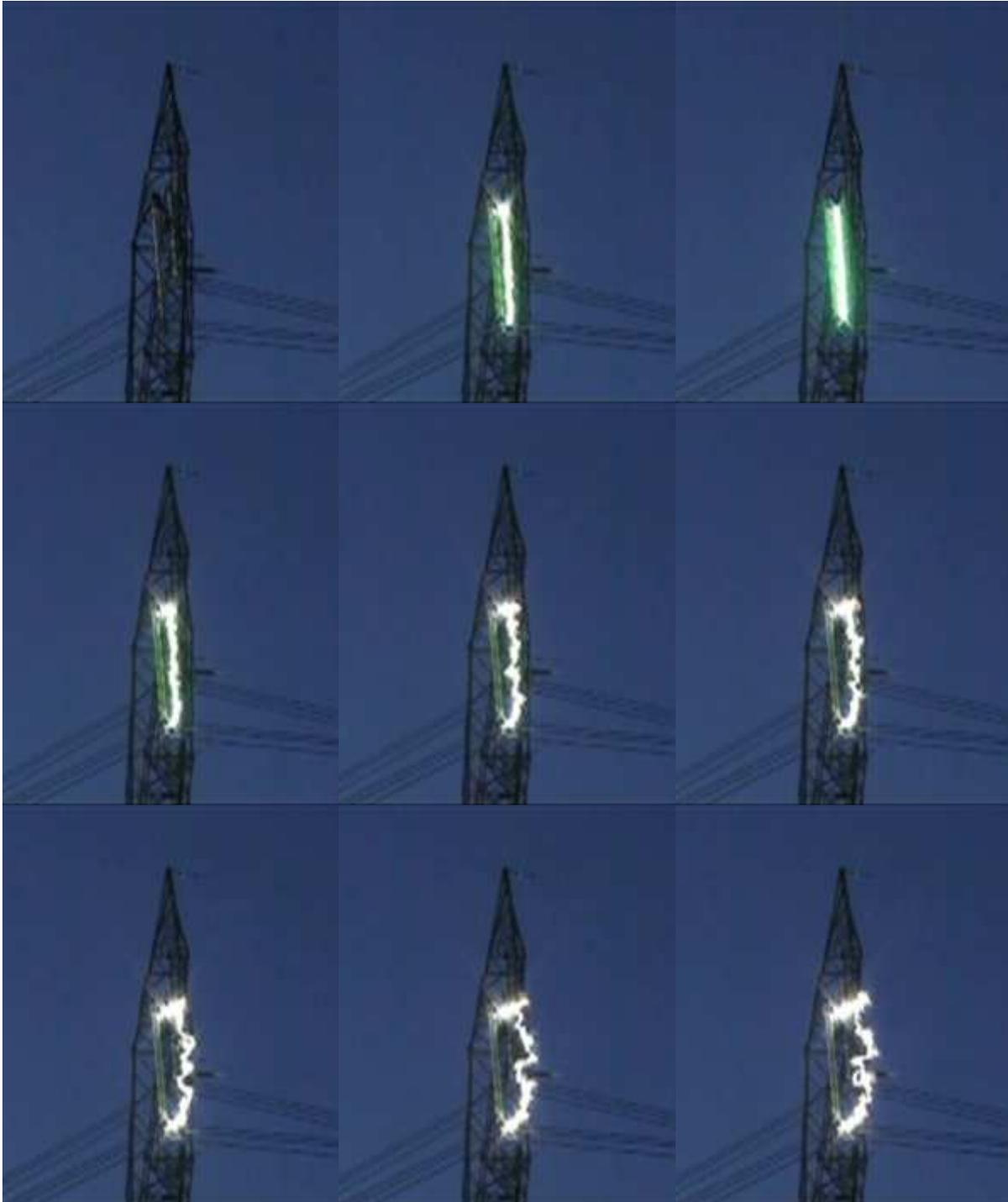
Imagens AP-02 – Ensaio 971

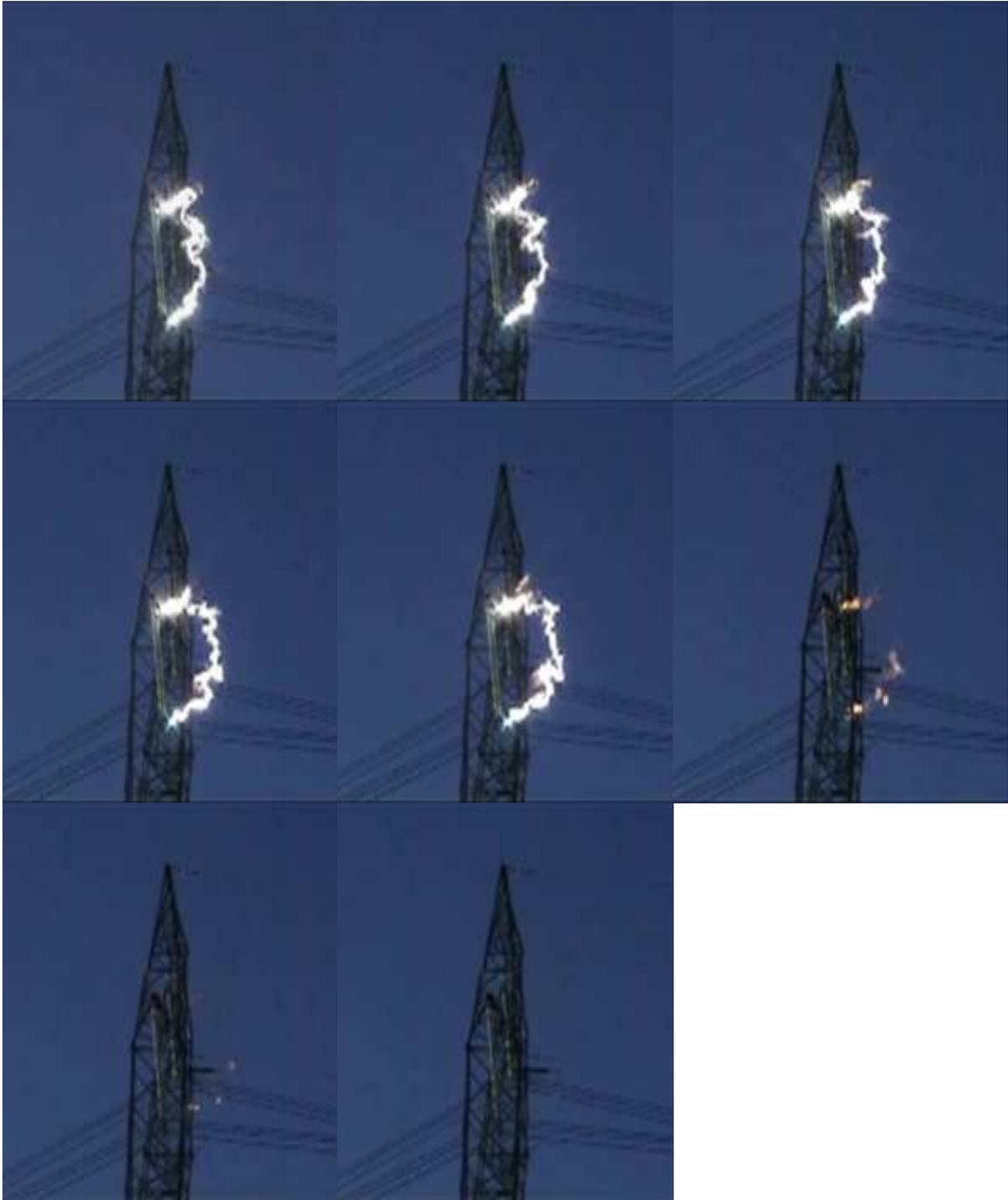






Imagens AT-04 – Ensaio 971



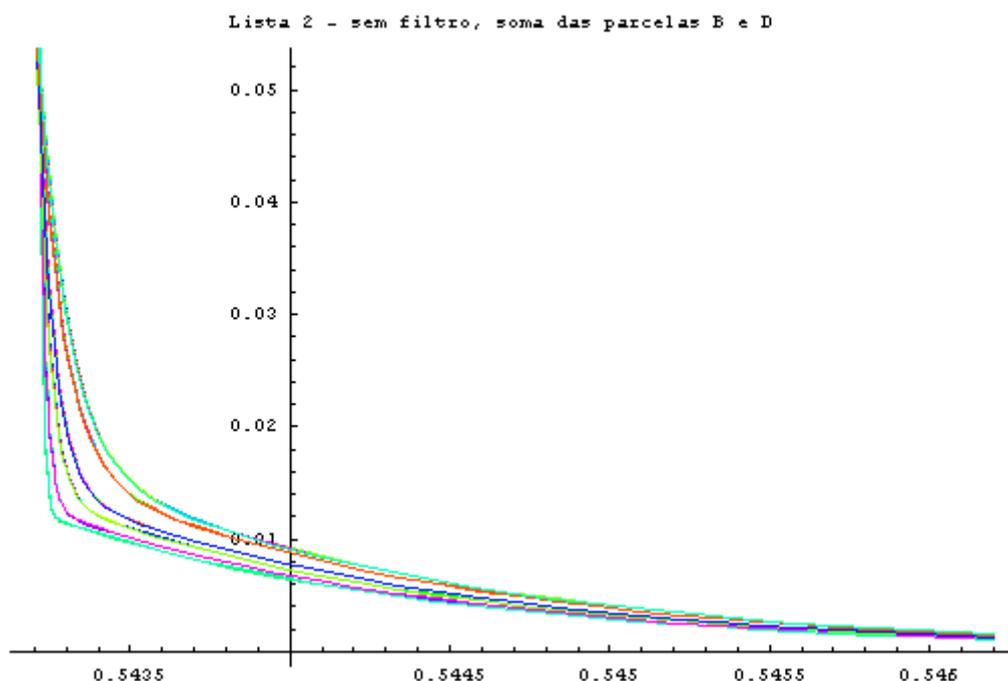
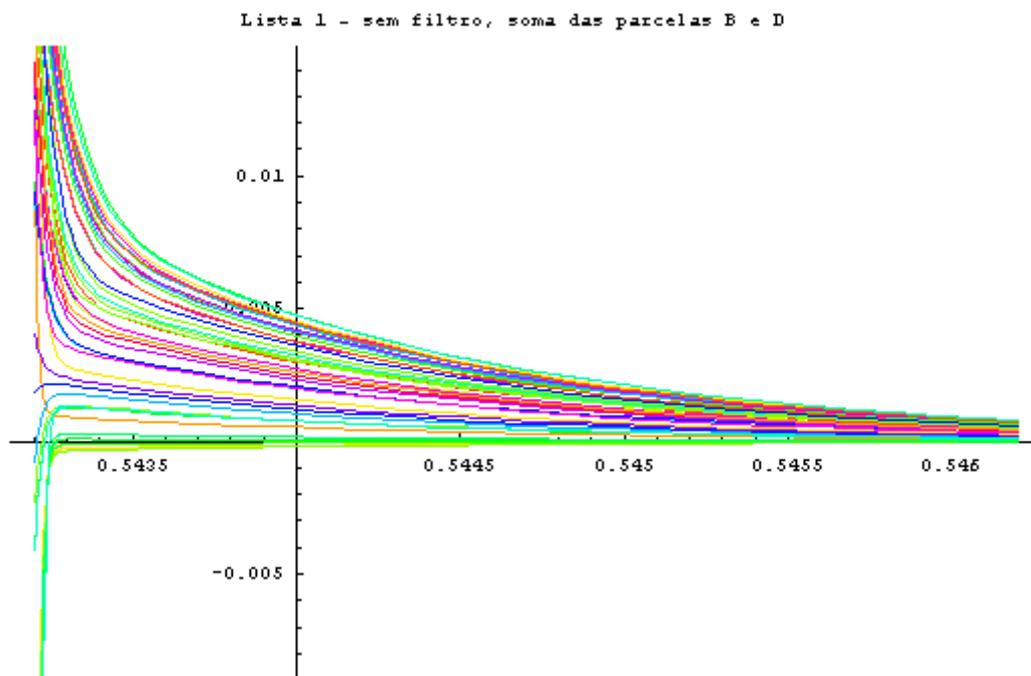


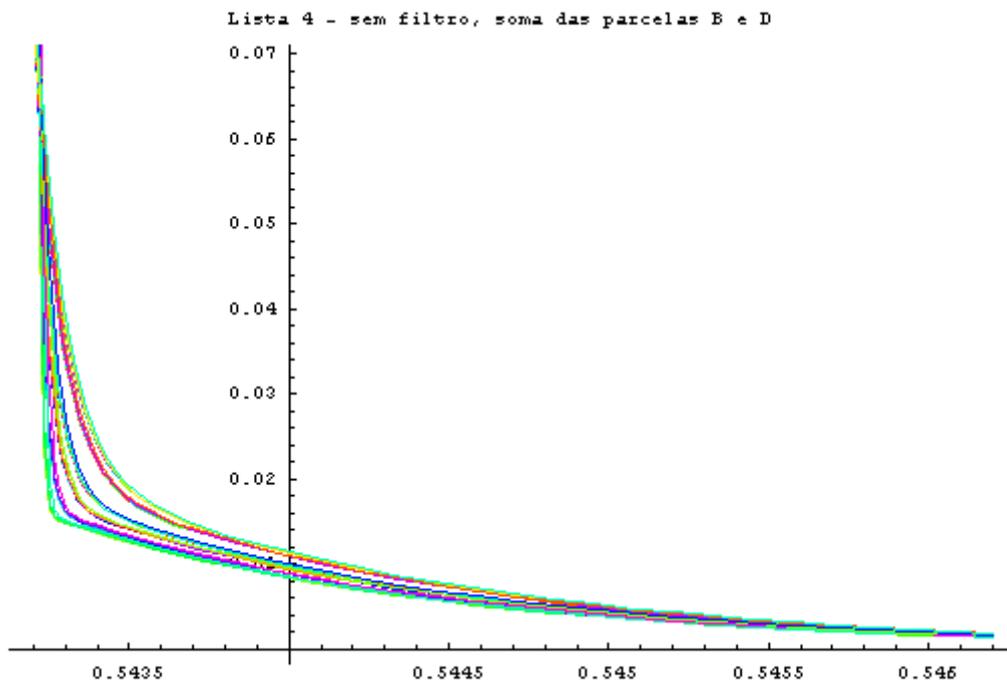
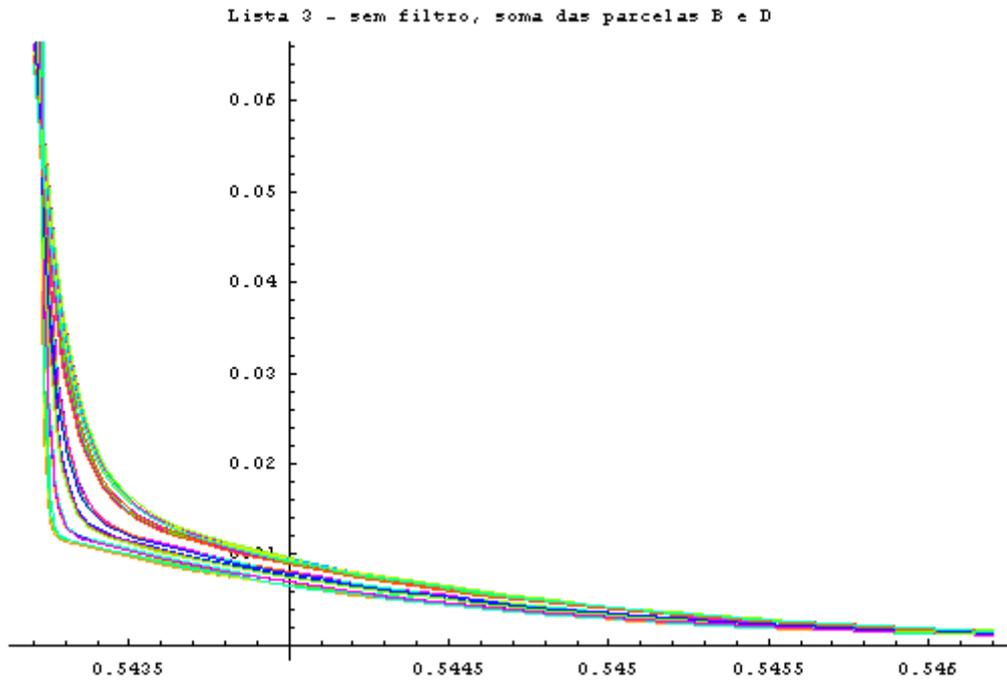
ANEXO 8

Cálculos das Constantes de Tempo do Arco a partir de dados experimentais

As curvas a seguir representam graficamente as listas de resultados obtidos a partir de cálculos envolvendo dados do ensaio 971 (corrente de 100 Aef), mencionados no Capítulo 5

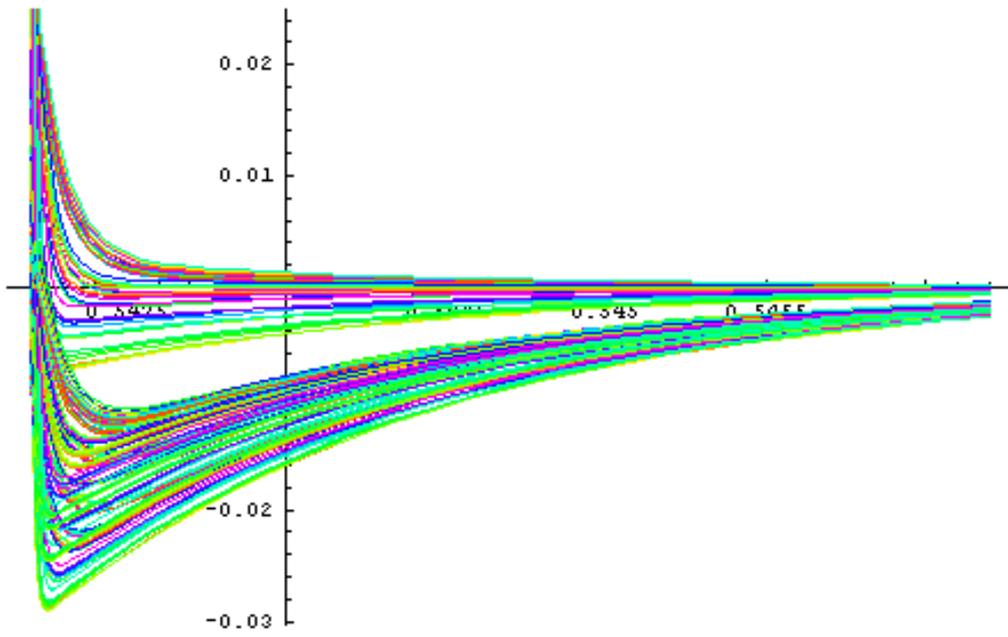
Foram consideradas 4 listas para o caso sem filtro, sendo que as 3 primeiras se limitam ao intervalo inicial de 1,5 ms do impulso e a última vai a 3ms, abrangendo a região “conturbada” da condutância do arco .



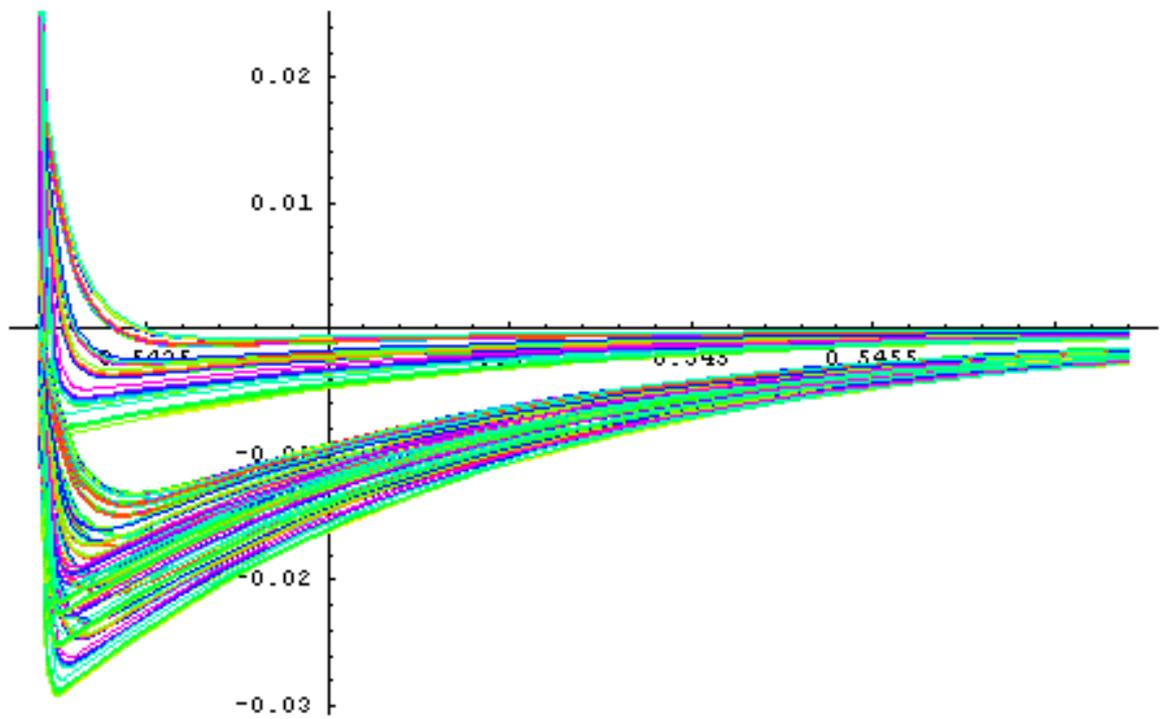


Para os casos com filtro, apresentados a seguir, foram consideradas 5 opções de filtro ($p = 50$, $p = 200$, $p = 450$, $p = 800$ e $p = 1250$), aplicados a 4 listas de amostragem de pontos dentro dos 1.5 ms iniciais do impulso.

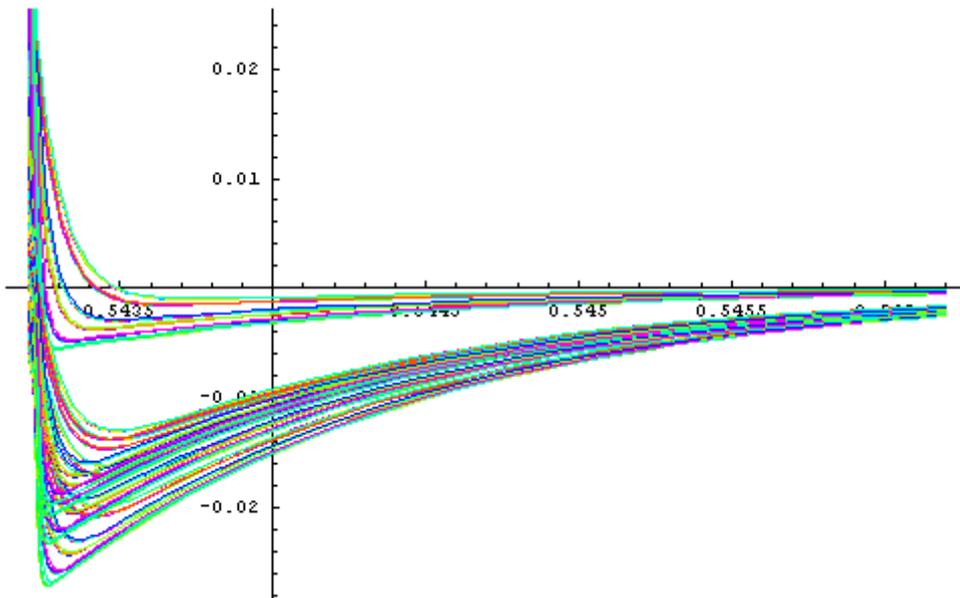
Lista 1 - com filtro, soma das parcelas B e D



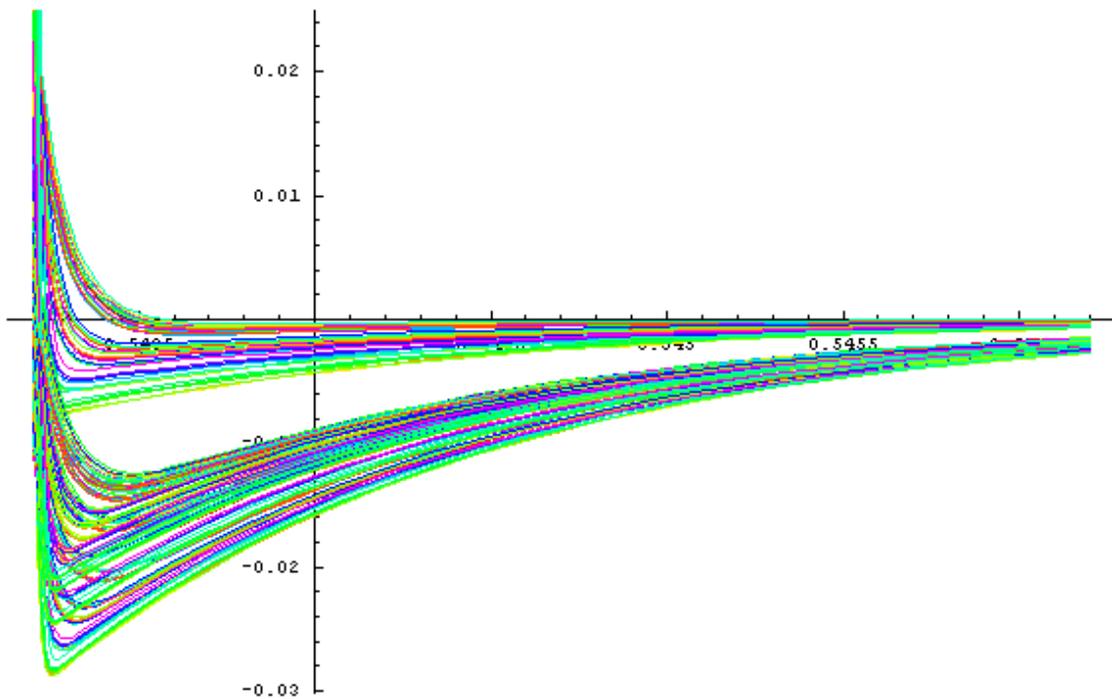
Lista 2 - com filtro, soma das parcelas B e D



Lista 3 - com filtro, soma das parcelas B e D



Lista 4 - sem filtro, soma das parcelas B e D

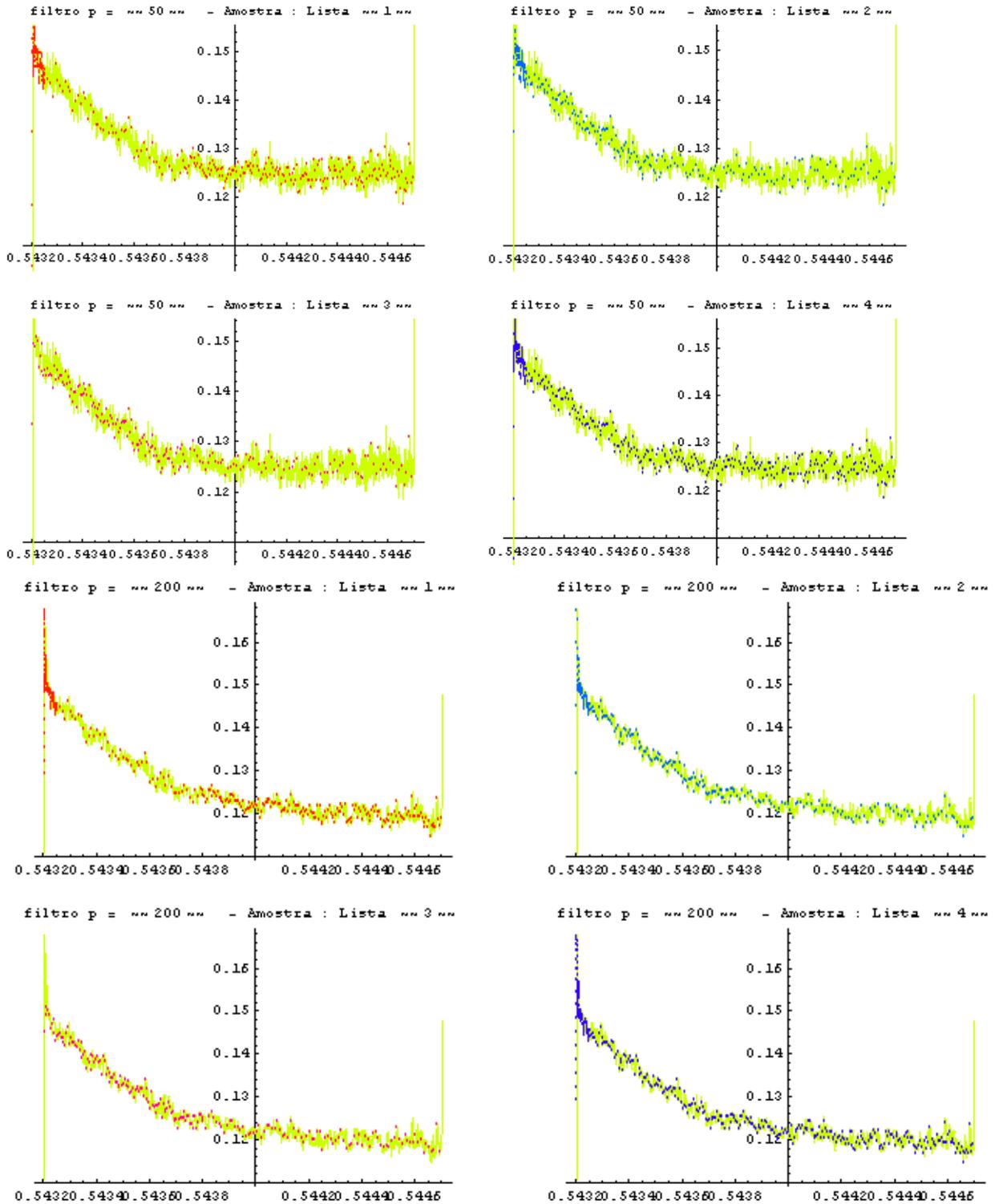


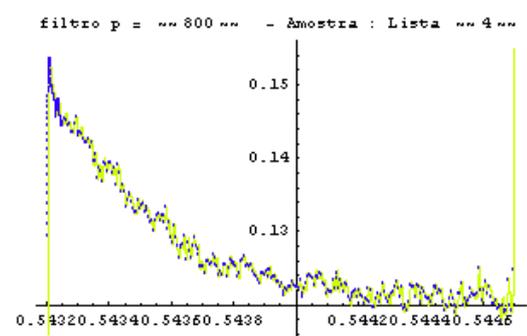
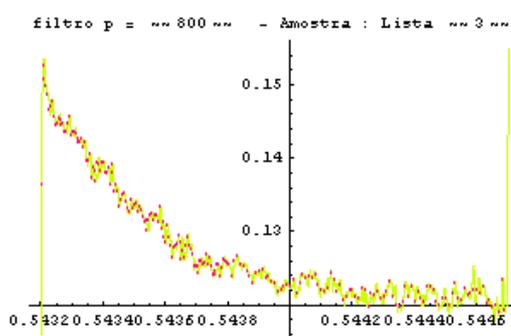
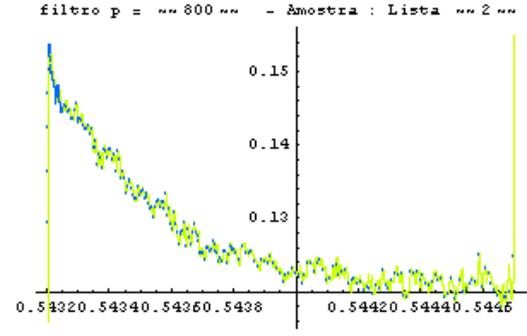
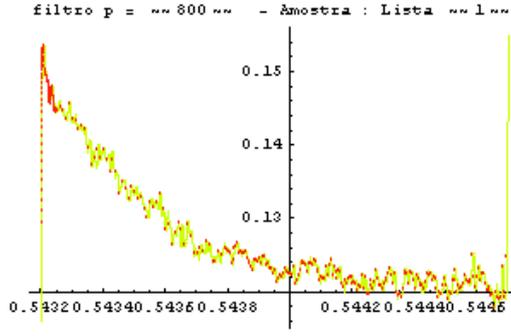
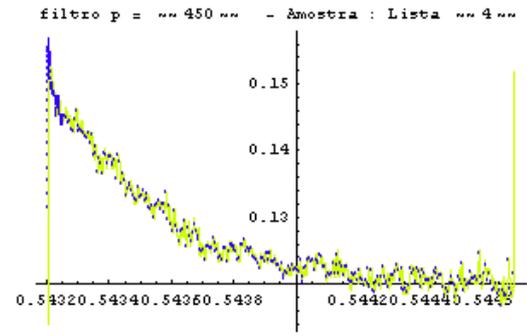
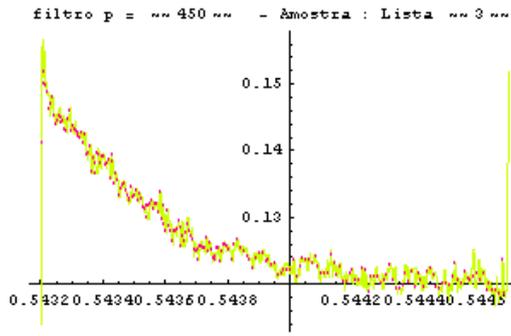
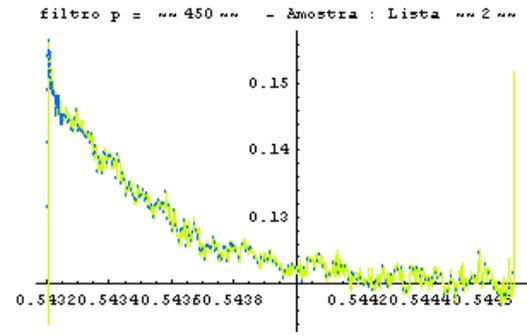
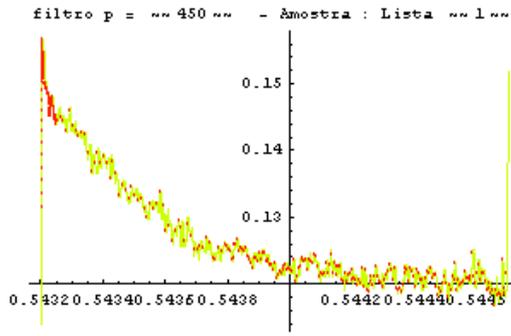
errata : a curva acima é **com** filtro

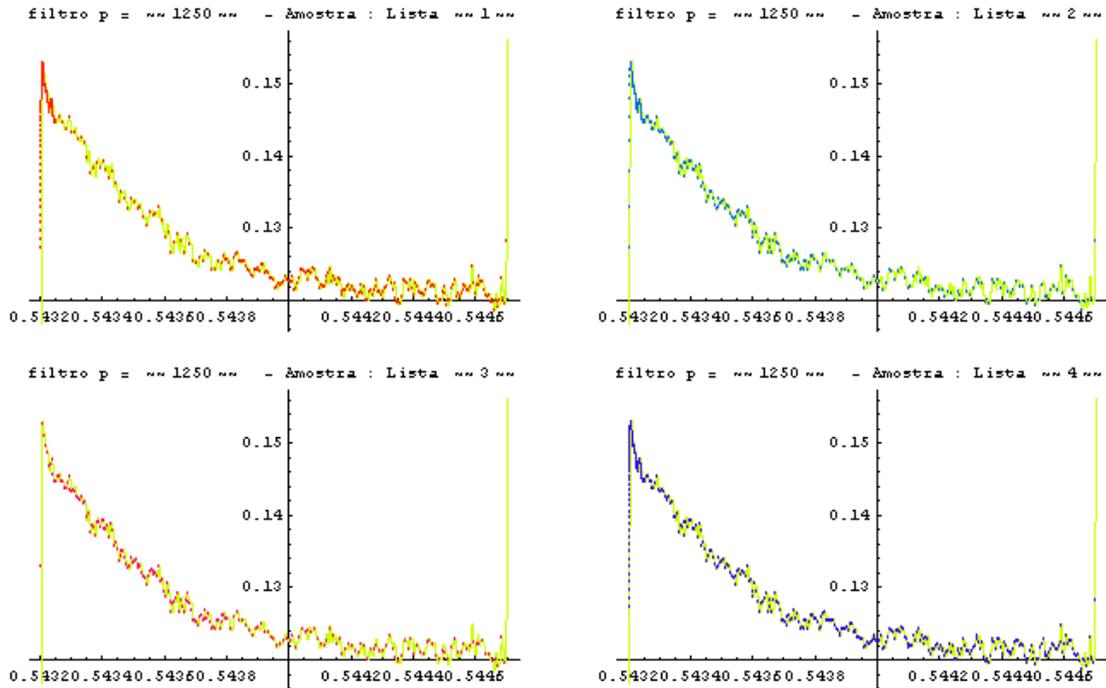
Obs :

1. Além da variação de filtro, foram variados ainda os valores de θ_1 e θ_2 .
2. θ_2 compõe a parcela com B.
3. Os valores considerados para θ_1 e θ_2 . foram :
 θ_1 : 0,35 μ s ; 0,80 μ s ; 1,06 μ s ; 1,175 μ s ; 2,2 μ s ; 2,8 μ s ; 3,36 μ s ; 6,62 μ s
 θ_2 : 10 μ s ; 20 μ s ; 36,6 μ s ; 50 μ s ; 78,2 μ s ; 90 μ s

As próximas figuras ilustram as listas de amostragem de pontos consideradas :







Valores de $g_0 = g(t_0)$, onde $t_0 =$ instante de referência. Para cada valor de $g(t) \times l(t)$ filtrado, tem-se como $g_0 : \{ 0,128832 ; 0,110725 ; 0,115943 ; 0,116686 \}$.

A seguir, listagens de saída que apresentam síntese de alguns cálculos :

Valor mínimo de “B”, para os 5 tipos de filtro e 4 listas consideradas :

```
In[151]:= TableForm[bmin]
Out[151]/TableForm=
  0.018814      0.0159583      0.0182808      0.0195148      0.0200697
  0.0230849      0.0154957      0.0172339      0.0181834      0.0185128
  0.030009      0.0193925      0.0218409      0.0233629      0.0239185
  0.0196906      0.0152253      0.017339      0.0183366      0.0187884

In[150]:= Sort[Flatten[bmin]]
Out[150]= {0.0152253, 0.0154957, 0.0159583, 0.0172339, 0.017339, 0.0181834, 0.0182808,
  0.0183366, 0.0185128, 0.0187884, 0.018814, 0.0193925, 0.0195148, 0.0196906,
  0.0200697, 0.0218409, 0.0230849, 0.0233629, 0.0239185, 0.030009}
```

Valor mínimo de “D”, para os 5 tipos de filtro e 4 listas consideradas :

```
In[152]:= TableForm[dmin]
Out[152]/TableForm=
 -0.00246776      0.0248527      0.0197154      0.0163666      0.0151148
  0.00118873      0.025897      0.0214249      0.0185166      0.0174667
  0.00158782      0.0259189      0.0215189      0.018659      0.0176285
  0.000628176      0.0257979      0.0210864      0.0180142      0.01687

In[153]:= Sort[Flatten[dmin]]
Out[153]= {-0.00246776, 0.000628176, 0.00118873, 0.00158782, 0.0151148, 0.0163666,
  0.01687, 0.0174667, 0.0176285, 0.0180142, 0.0185166, 0.018659, 0.0197154,
  0.0210864, 0.0214249, 0.0215189, 0.0248527, 0.0257979, 0.025897, 0.0259189}
```

Valores máximos de “B” e “D”, valores médios de “B” e “D” para os 5 tipos de filtro e 4 listas consideradas :

TableForm[bmax]

0.211921	0.137492	0.145658	0.152062	0.161467
0.221614	0.154773	0.166207	0.171874	0.175817
0.349518	0.236989	0.246566	0.248446	0.246527
0.184471	0.133197	0.137623	0.141201	0.148682

TableForm[dmax]

0.0080503	0.0304316	0.0259231	0.0230043	0.0218838
0.00910637	0.0307183	0.0267181	0.0241084	0.0231501
0.00607966	0.0287987	0.024776	0.0221412	0.0211865
0.00824083	0.0301842	0.0259554	0.0232072	0.0221731

TableForm[meanb]

0.0341255	0.0248339	0.0303461	0.0341569	0.0367669
0.037584	0.0269228	0.0307746	0.0332966	0.0347335
0.0587336	0.0391466	0.0427447	0.0448659	0.0455839
0.0302646	0.0240698	0.0287268	0.031955	0.0342403

TableForm[meand]

0.00155666	0.0268436	0.0220892	0.0189795	0.0177998
0.00439006	0.0278	0.0235791	0.0208322	0.0198365
0.00400738	0.0274508	0.0232544	0.0205146	0.0195236
0.00387356	0.0275751	0.0231902	0.0203239	0.0192525

ln[156]= Mean[Flatten[meanb]] ln[157]= Mean[Flatten[meand]]

Out[156]= 0.0351936 Out[157]= 0.0186336

ln[158]= (* vou escolher um D inicial como valor médio com filtro 5 das listas 2,3 e 4 : *)
dini = (0.019836469626734108 + 0.019523553223817738 + 0.01925250049117496) / 3

Out[158]= 0.0195375

As tabelas a seguir apresentam o cálculo de B para o D estipulado. Como análise de seus resultados tem-se os seguintes valores:

bmin // TableForm

-0.10858278819973757`	0.023375677228153414`	0.019041463353639664`	0.015547754540012018`	0.014390664865091876`
-0.09126877637329334`	0.02487492467174385`	0.020322967078603715`	0.016876950700617933`	0.015607582369797755`
-0.046036766416435206`	0.03333325203946489`	0.02632644332161067`	0.021685900154543625`	0.020009847580051948`
-0.10811491743139681`	0.02441114428745364`	0.020257406587528986`	0.016533081955538445`	0.015267755289110169`

bmax // TableForm

-0.00338864104507054`	0.3397732527058196`	0.25541313045680175`	0.20108222338851292`	0.18731780643443285`
-0.002307539770044192`	0.4118828101880628`	0.3231483137533618`	0.26365644913843495`	0.24406600248026664`
0.0037234984280229704`	0.4993804795122983`	0.3926689506731615`	0.31846596009395006`	0.28904434304867366`
-0.0038177276551571693`	0.34495434404504854`	0.26032245081562694`	0.20554293234269636`	0.19125555260514443`

meanb // TableForm

-0.013209535582208824`	0.049727731134542895`	0.0417398633384675`	0.036711718796042736`	0.03594940386519029`
-0.008721783795168326`	0.059303928098877516`	0.049005021135907705`	0.04230959598992404`	0.04039380149606796`
-0.006668177366099746`	0.07694871698451367`	0.06216639111511971`	0.052273991020459716`	0.04864516656446959`
-0.013284366987901773`	0.05107134330585877`	0.04276702639775099`	0.03751557567334488`	0.03662506115578973`

bmax//TableForm

0.339773	0.255413	0.201082	0.187318
0.411883	0.323148	0.263656	0.244066
0.49938	0.392669	0.318466	0.289044
0.344954	0.260322	0.205543	0.191256

bmin//TableForm

0.0233757	0.0190415	0.0155478	0.0143907
0.0248749	0.020323	0.016877	0.0156076
0.0333333	0.0263264	0.0216859	0.0200098
0.0244111	0.0202574	0.0165331	0.0152678

Mean[bmax] // TableForm

0.39899772161280733`
0.307888211424738`
0.24718689124089857`
0.2279209261421294`

Mean[bmin] // TableForm

0.02649874955670395`
0.02148707008534576`
0.01766092183763951`
0.016318962526012937`

`meanb // TableForm`

<code>0.049727731134542895`</code>	<code>0.0417398633384675`</code>	<code>0.036711718796042736`</code>	<code>0.03594940386519029`</code>
<code>0.059303928098877516`</code>	<code>0.049005021135907705`</code>	<code>0.04230959598992404`</code>	<code>0.04039380149606796`</code>
<code>0.07694871698451367`</code>	<code>0.06216639111511971`</code>	<code>0.052273991020459716`</code>	<code>0.04864516656446959`</code>
<code>0.05107134330585877`</code>	<code>0.04276702639775099`</code>	<code>0.03751557567334488`</code>	<code>0.03662506115578973`</code>

`In[204]:= Mean[meanb]`

`Out[204]= {0.0592629, 0.0489196, 0.0422027, 0.0404034}`

`In[205]:= Mean[%]`

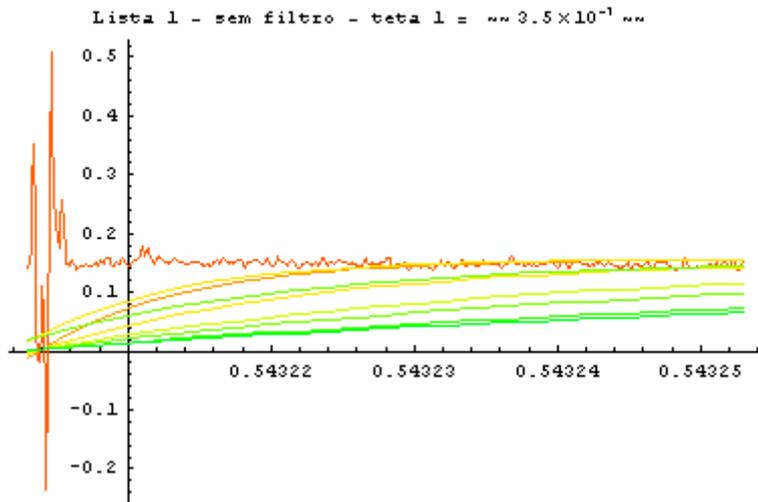
`Out[205]= 0.0476971 >>> valor que adotarei para B` `q dá uma relação B/D = 2.44131`

Os gráficos a seguir comparam a função definida no Cap.5 (5.11), com os coeficientes calculados para as diferentes combinações de θ_1 e θ_2 , com os valores medidos e corrigidos para a variação da condutância do tempo.

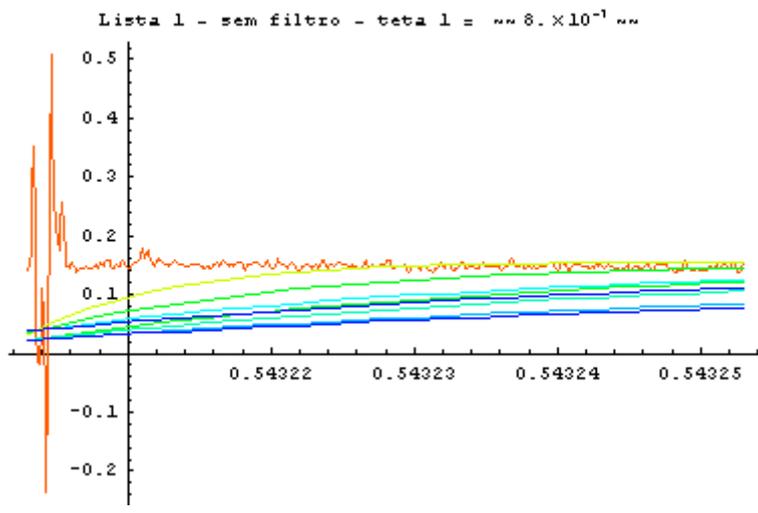
Para cada gráfico se fixou uma constante de tempo, ora θ_1 , ora θ_2 , , apresentando então as funções calculadas segundo a variação da constante de tempo não fixada. Ou seja, os gráficos que apresentam θ_1 fixo, apresentam as curvas calculadas para os θ_2 , considerados. Da mesma forma, onde se tem θ_2 , fixo são apresentadas as funções calculadas com os diferentes valores de θ_1 considerados.

Para todos os gráficos tem-se ---- : gcoru(t) “medido” e as demais retas as funções calculadas conforme explicitado acima.

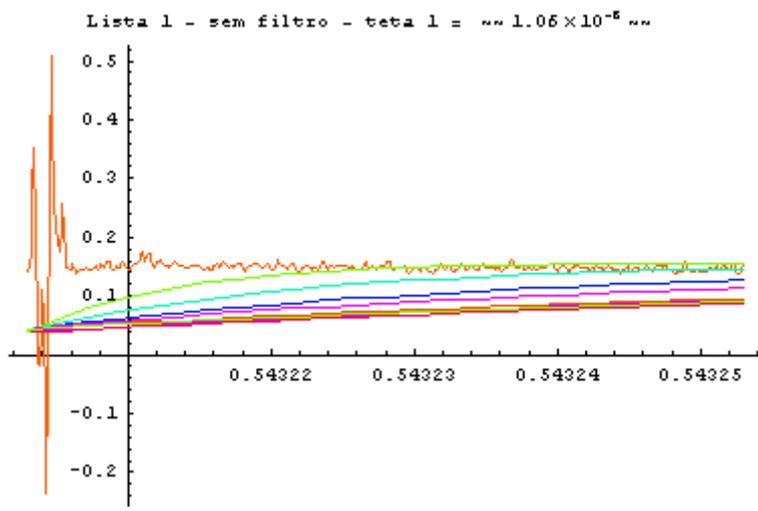
$gcor_u(t)$



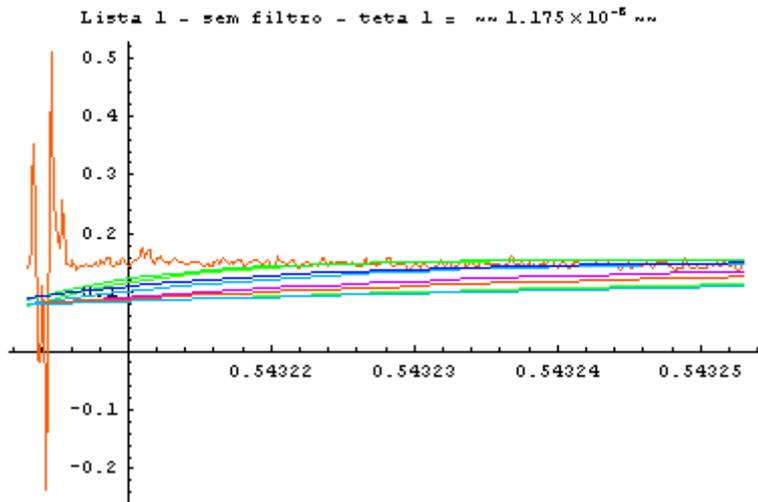
$gcor_u(t)$



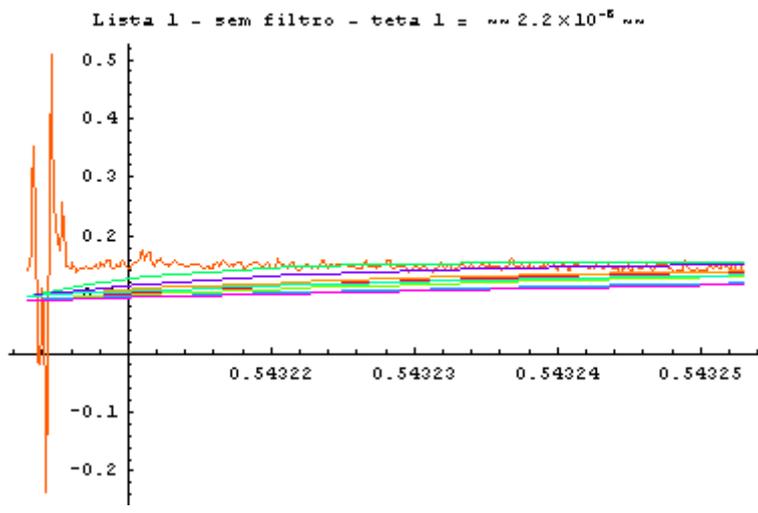
$gcor_u(t)$



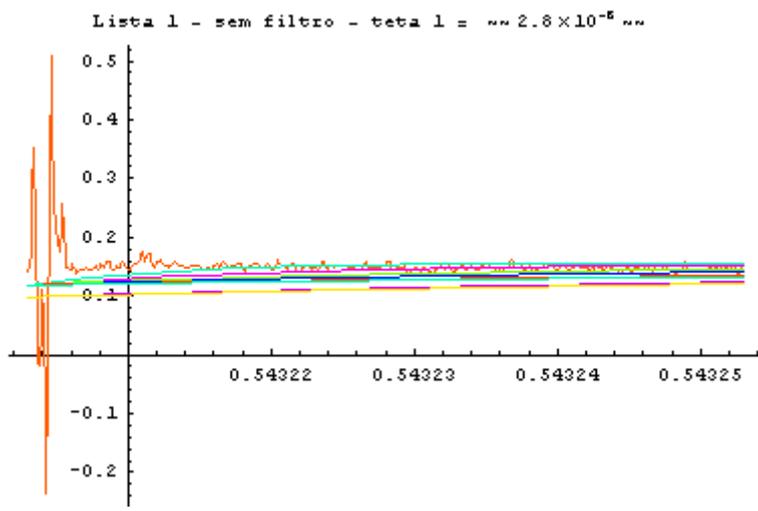
$gcor_u(t)$



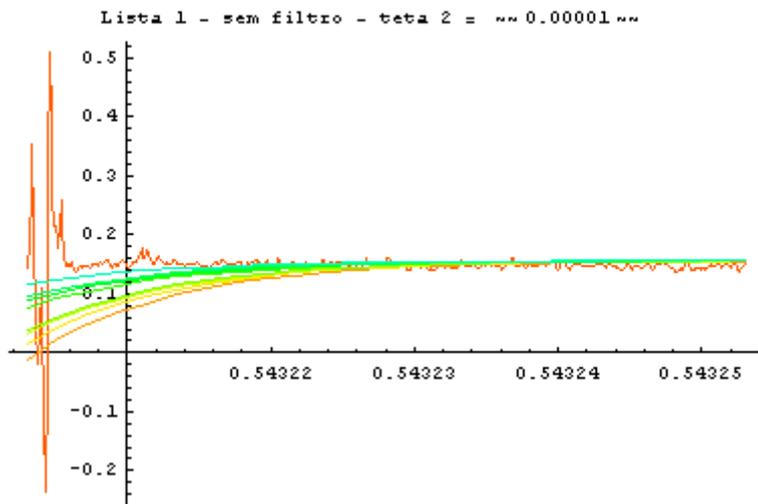
$gcor_u(t)$



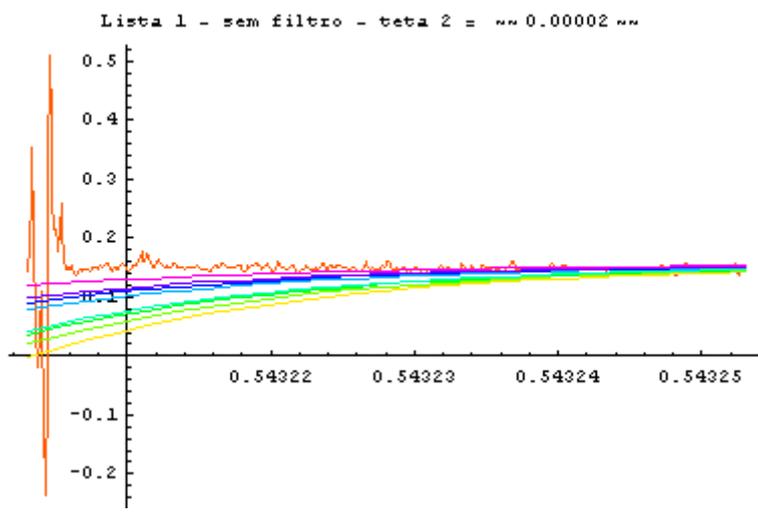
$gcor_u(t)$



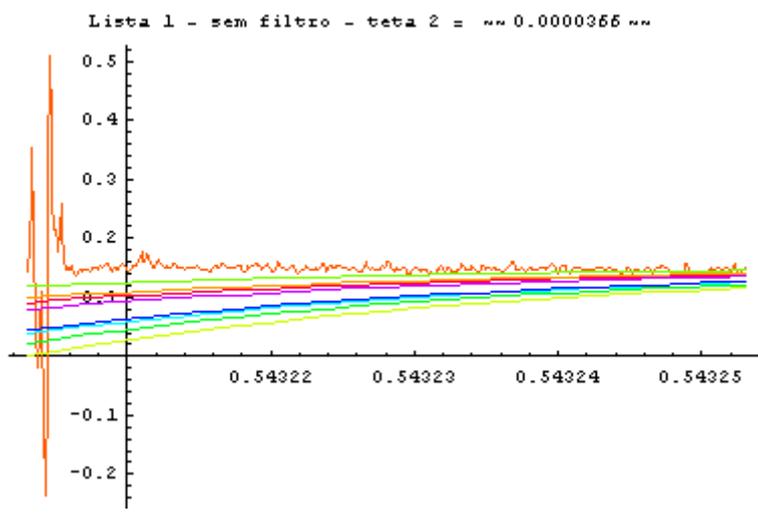
$gcor_u(t)$



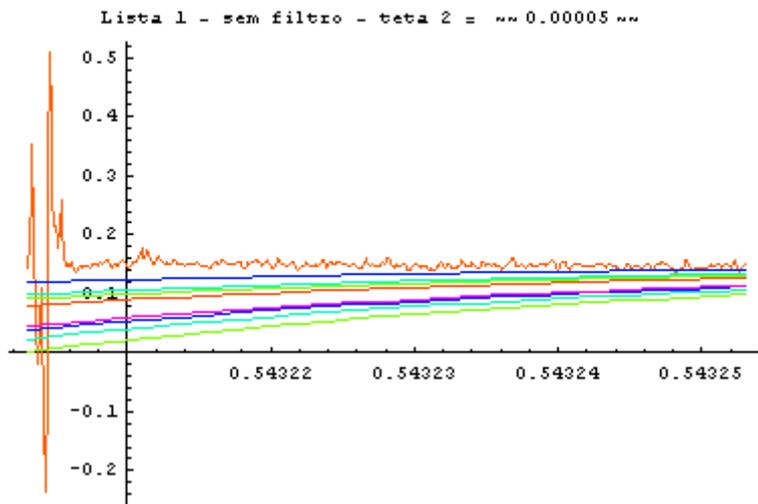
$gcor_u(t)$



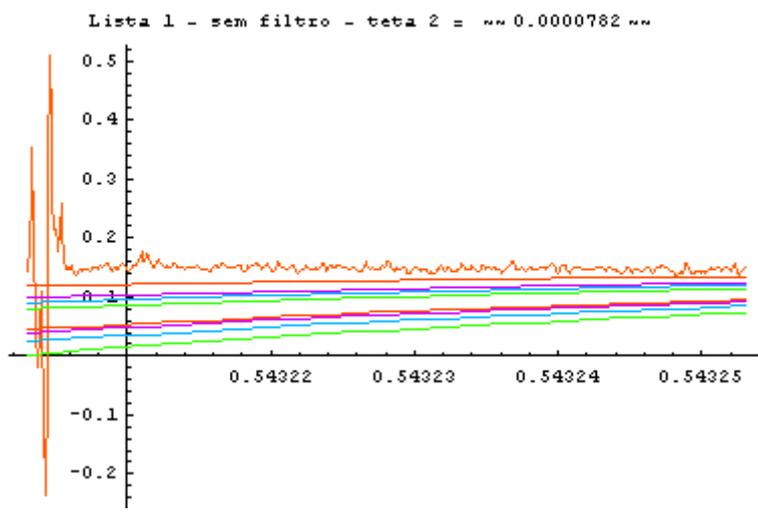
$gcor_u(t)$



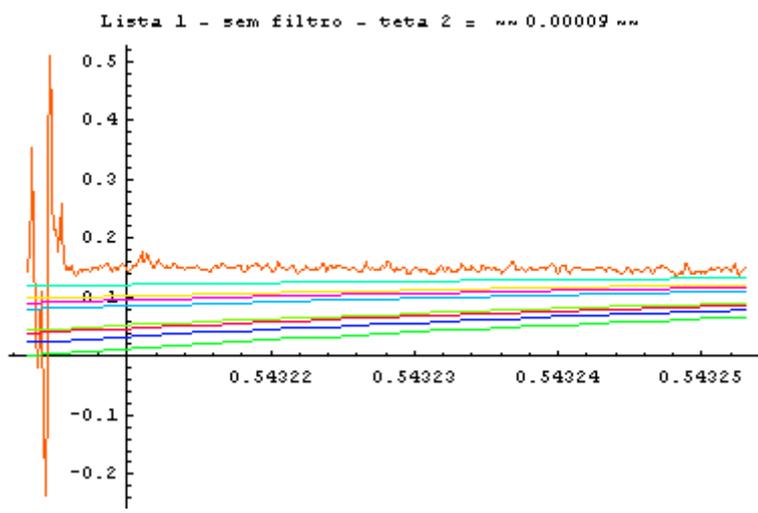
$gcor_u(t)$



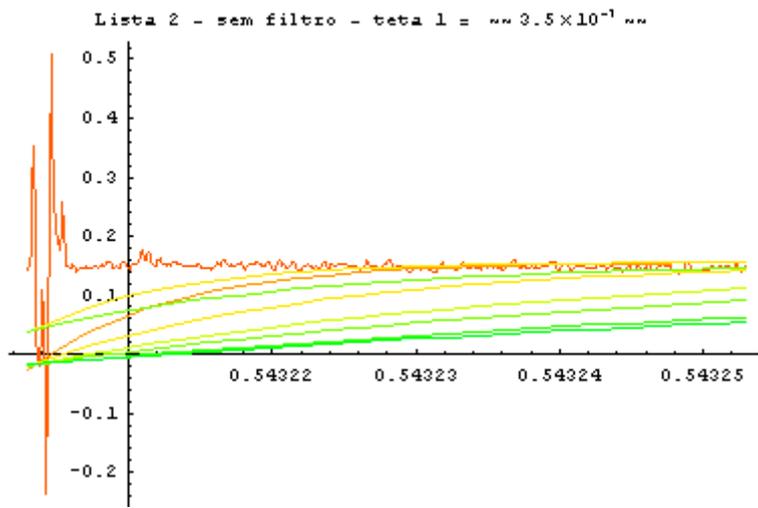
$gcor_u(t)$



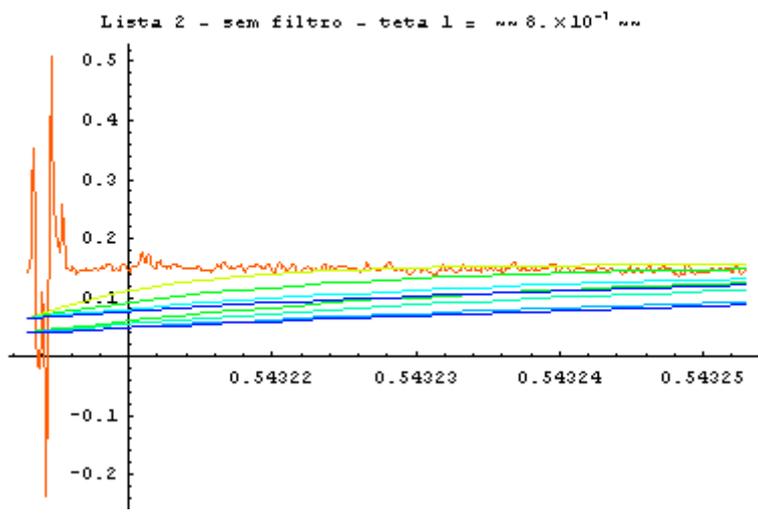
$gcor_u(t)$



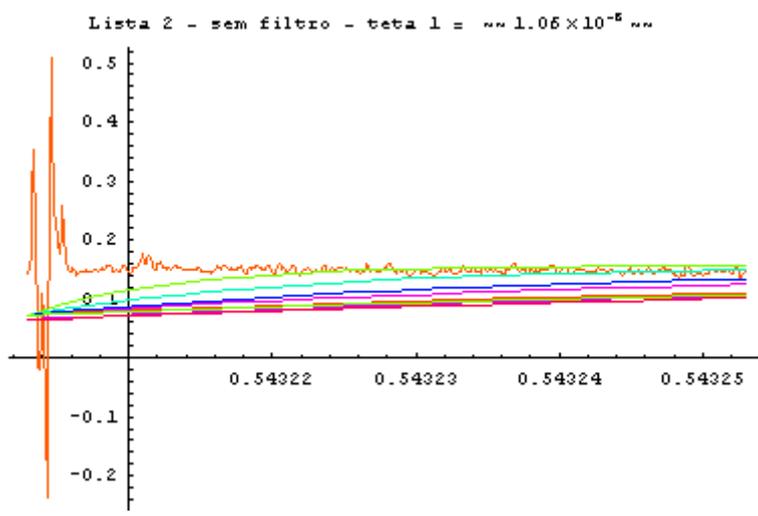
$gcor_u(t)$



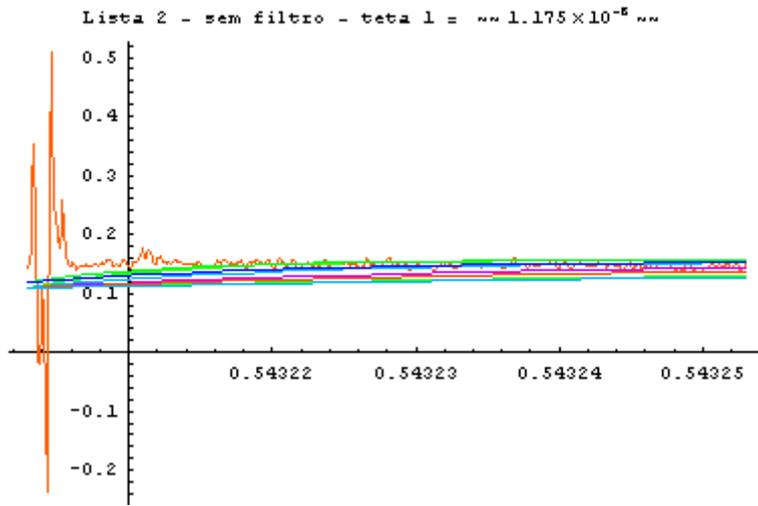
$gcor_u(t)$



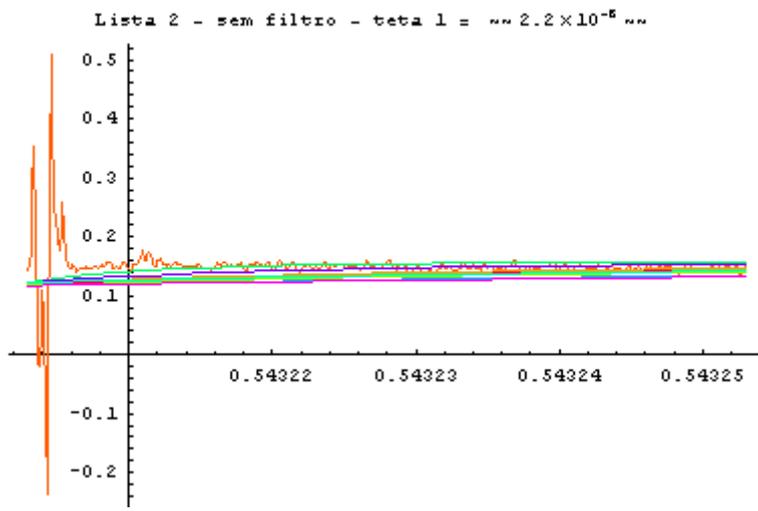
$gcor_u(t)$



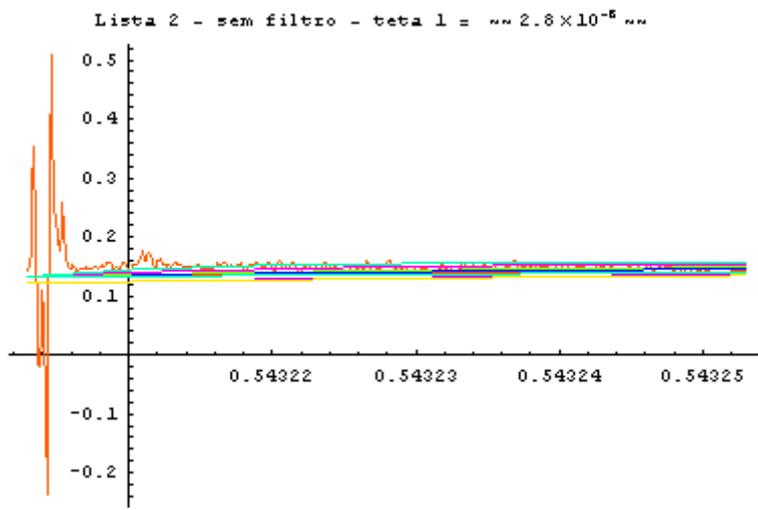
$gcor_u(t)$



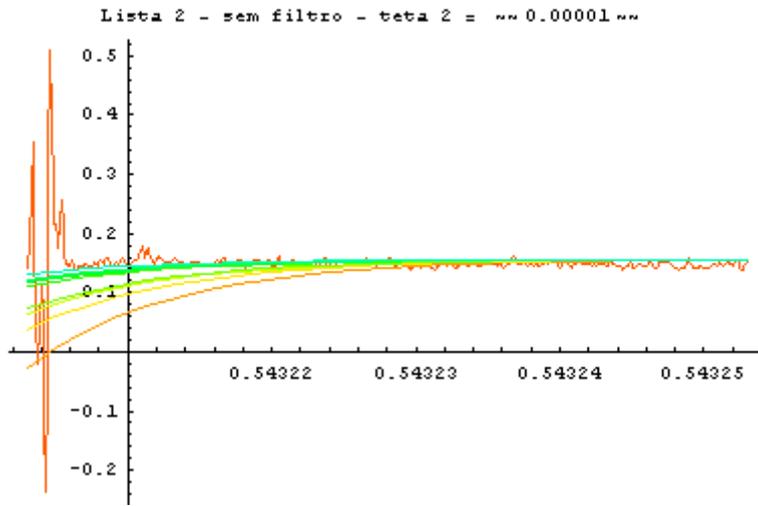
$gcor_u(t)$



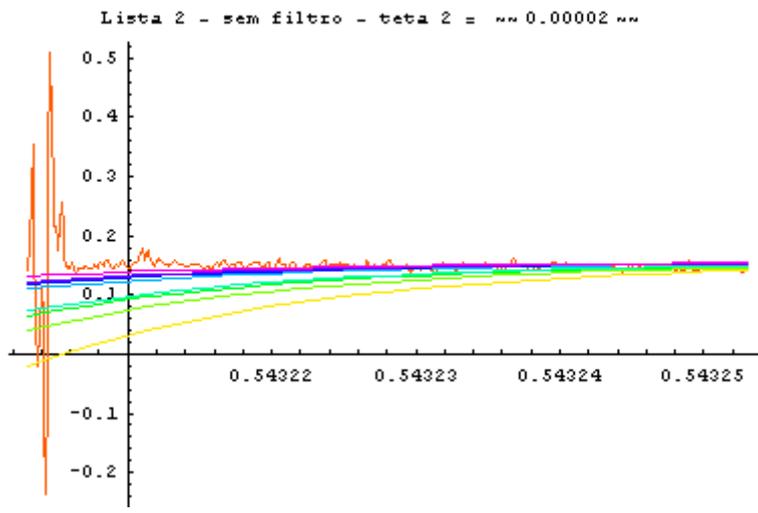
$gcor_u(t)$



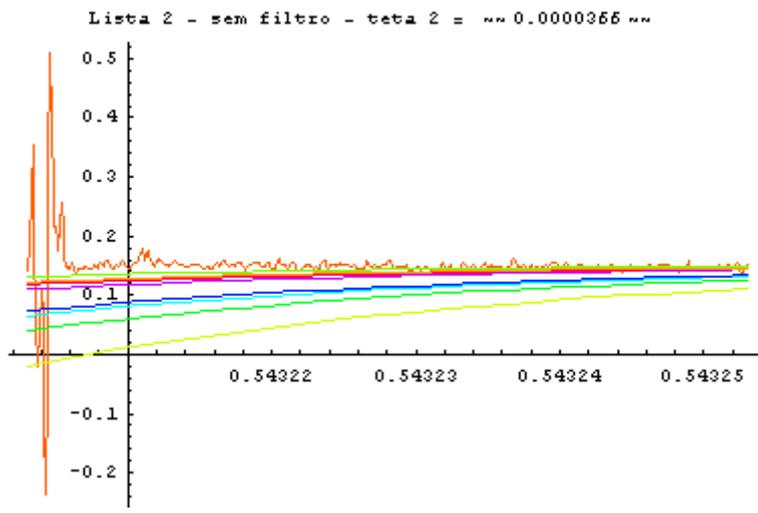
$gcor_u(t)$



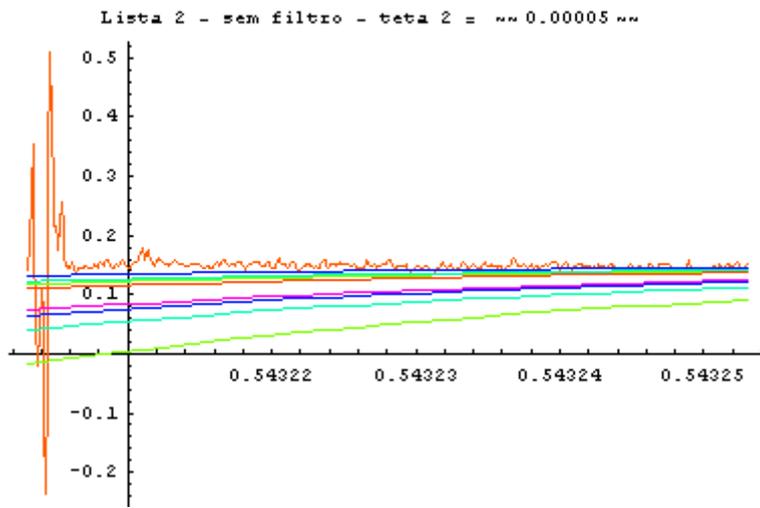
$gcor_u(t)$



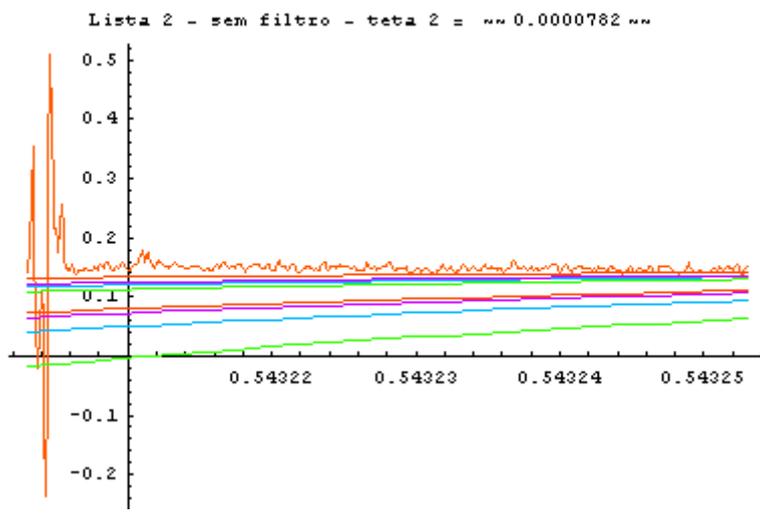
$gcor_u(t)$



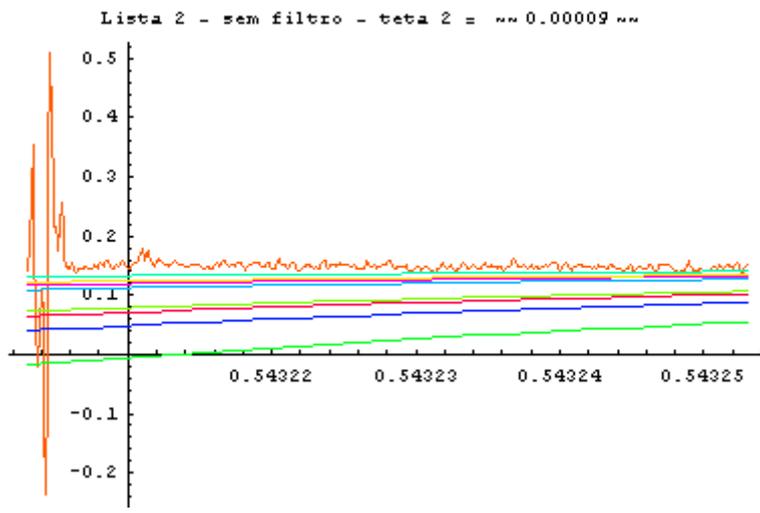
$gcor_u(t)$



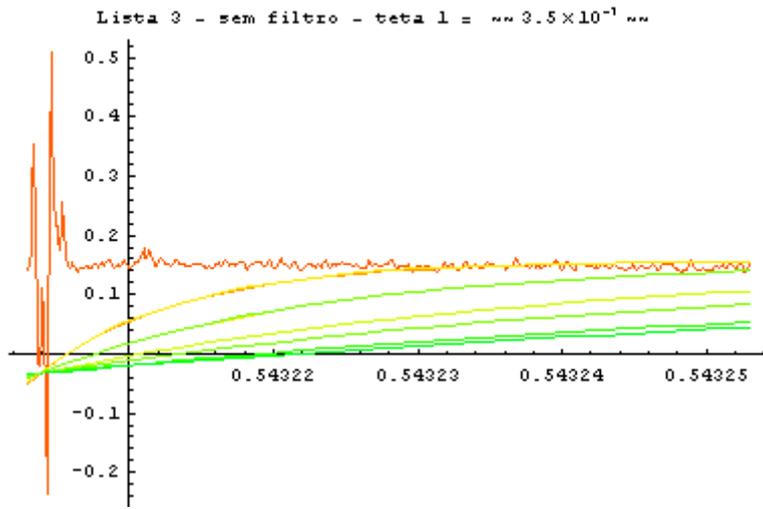
$gcor_u(t)$



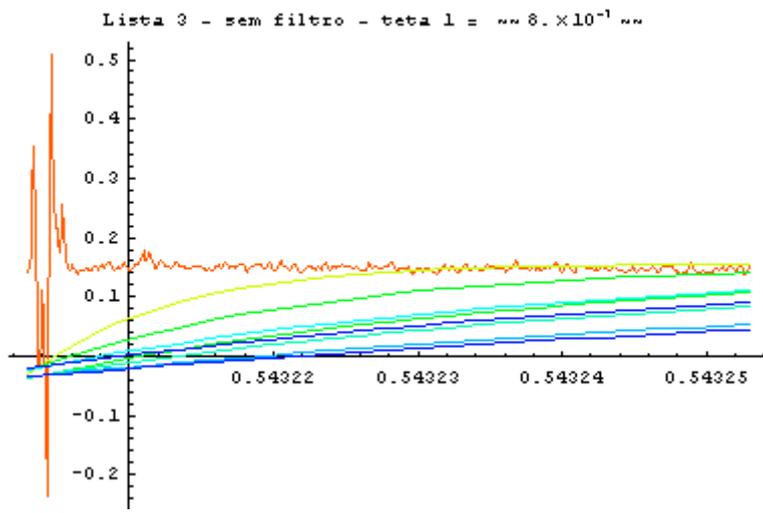
$gcor_u(t)$



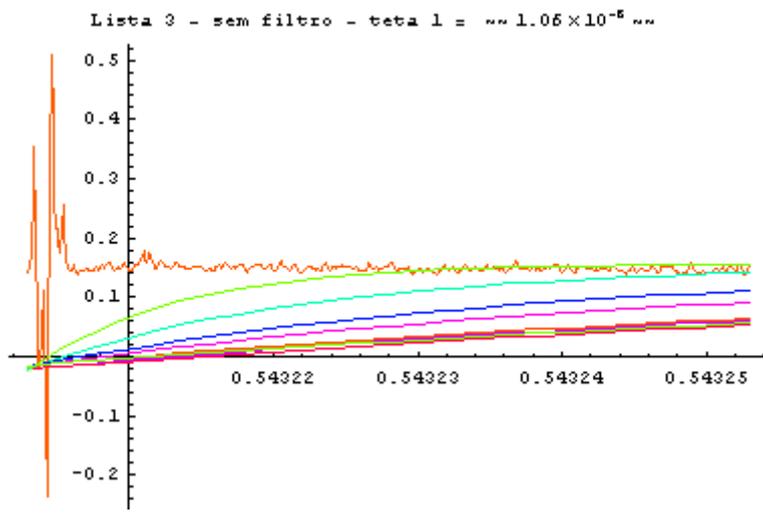
$gcor_u(t)$



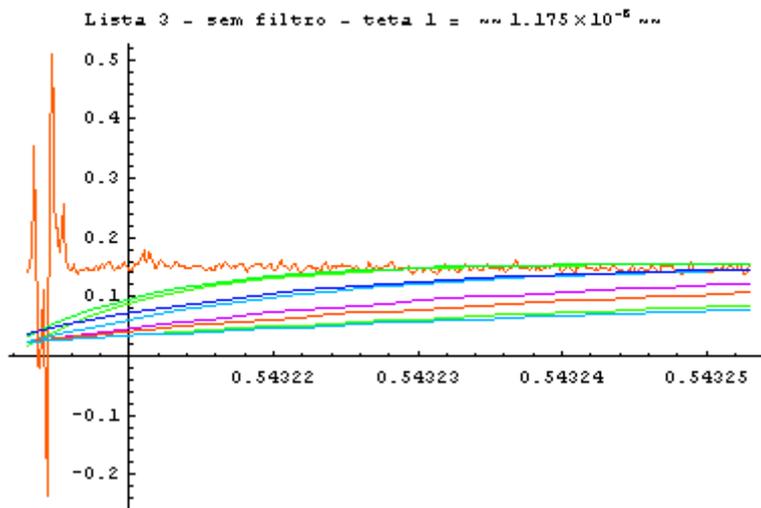
$gcor_u(t)$



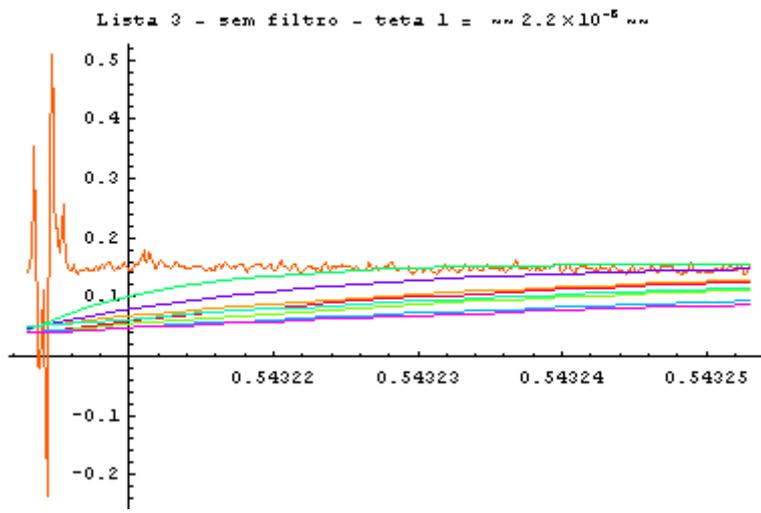
$gcor_u(t)$



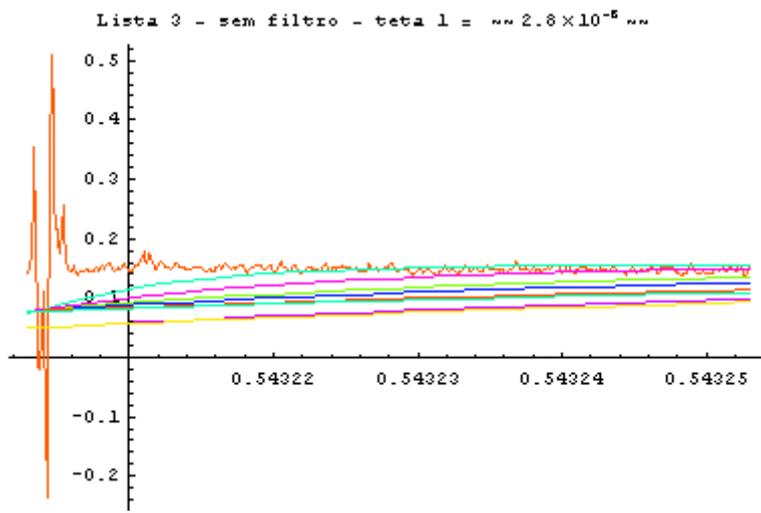
$gcor_u(t)$



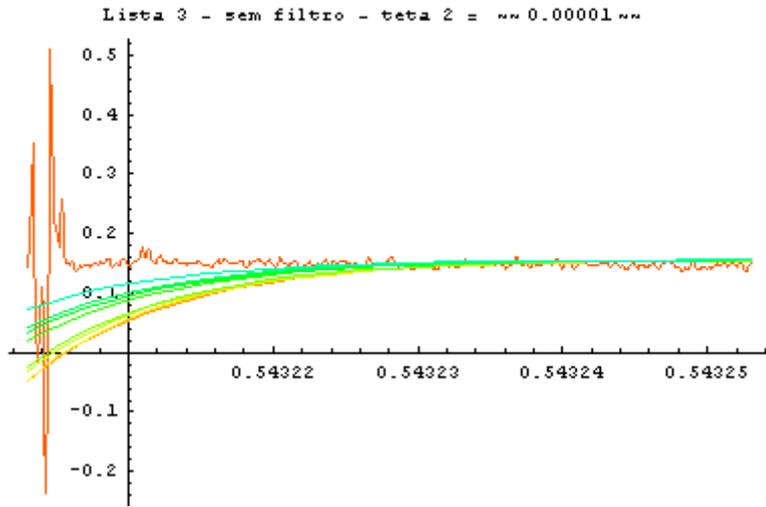
$gcor_u(t)$



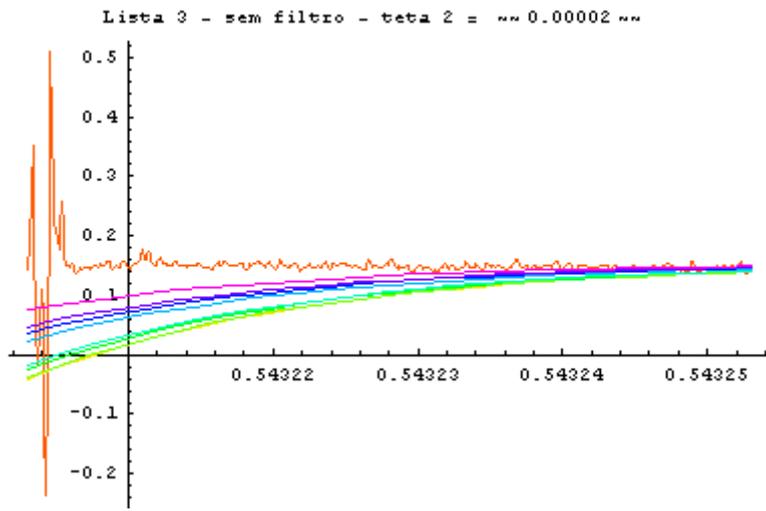
$gcor_u(t)$



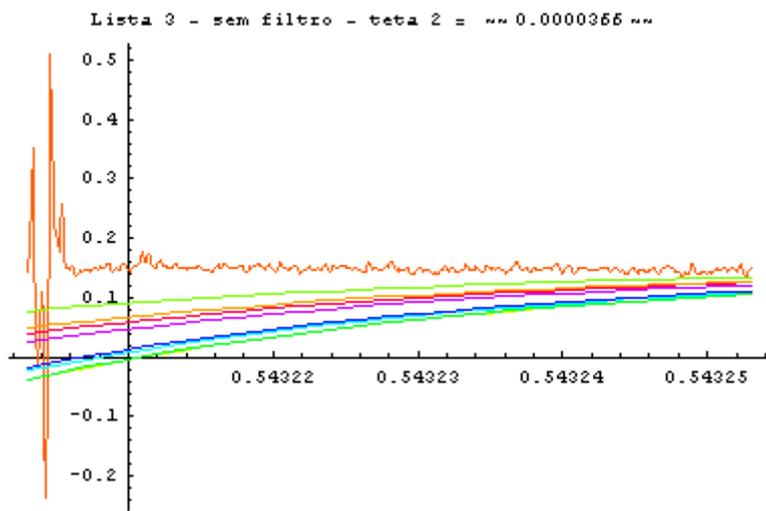
$gcor_u(t)$



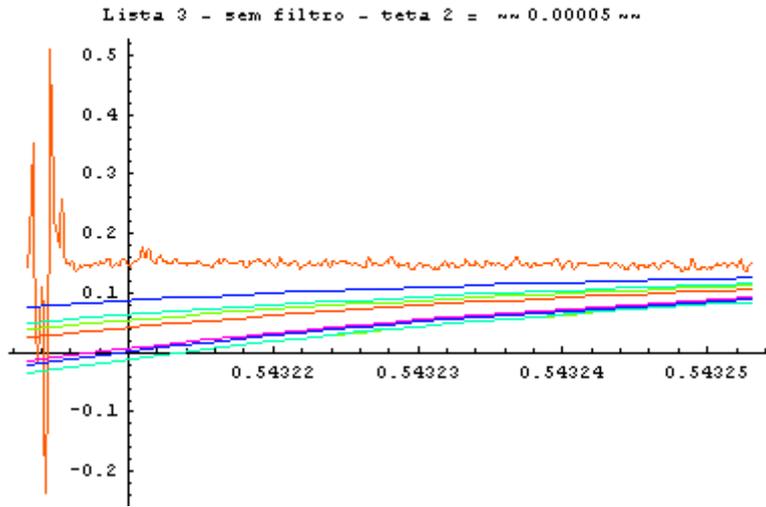
$gcor_u(t)$



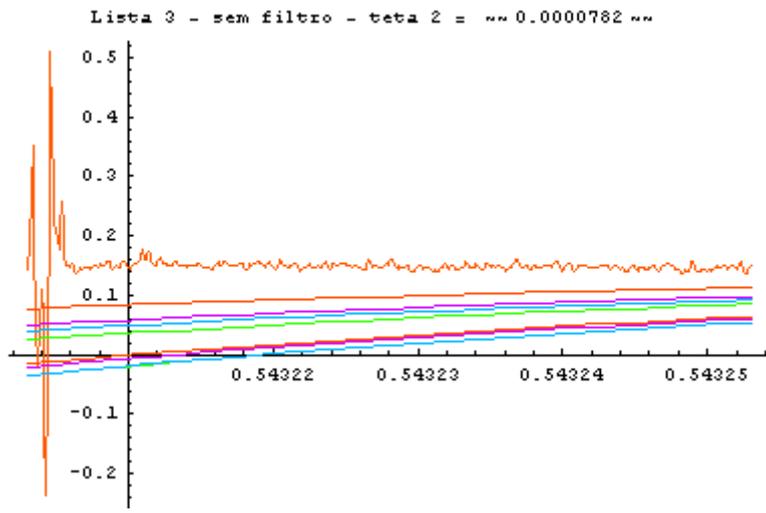
$gcor_u(t)$



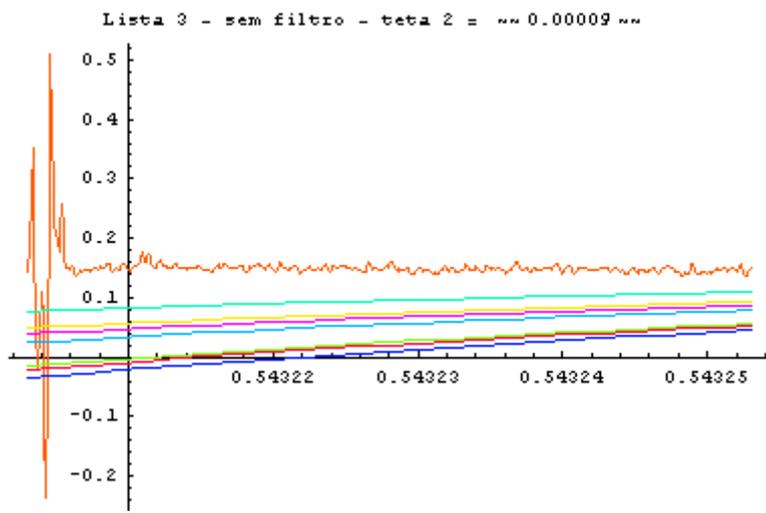
$gcor_u(t)$



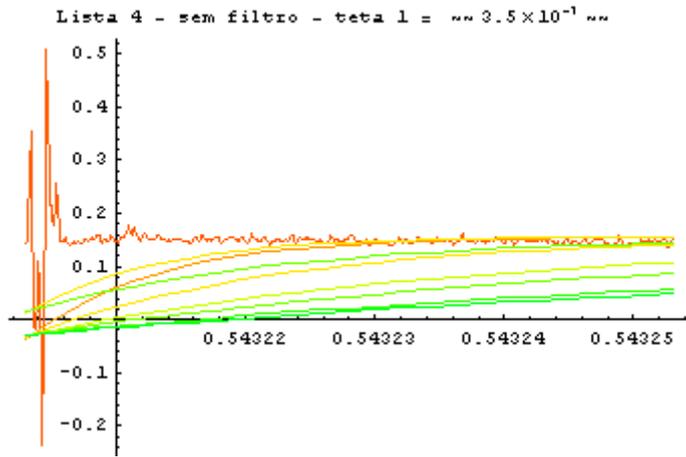
$gcor_u(t)$



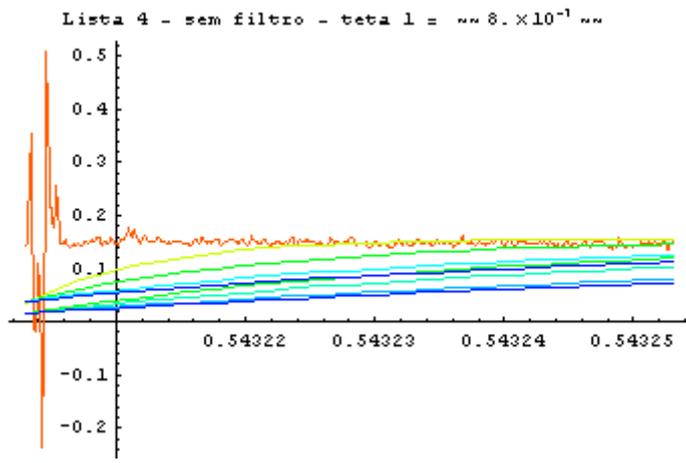
$gcor_u(t)$



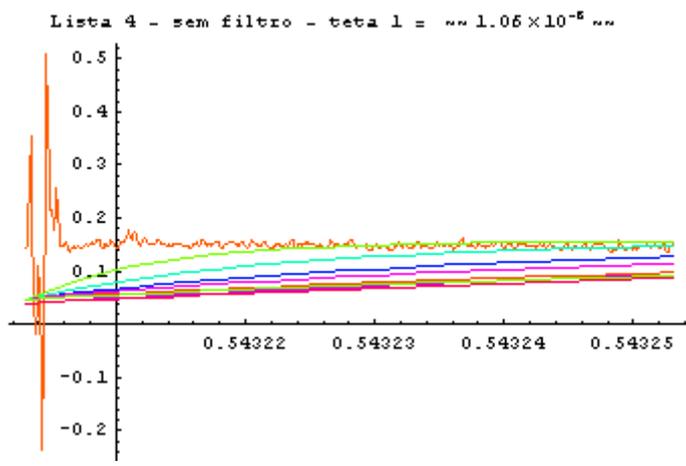
$gcor_u(t)$



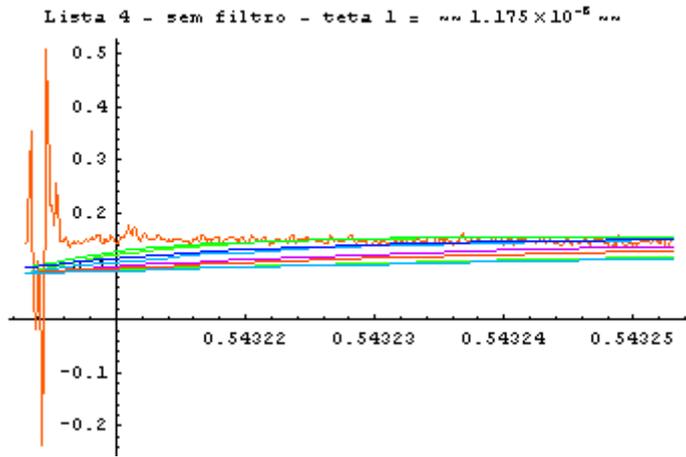
$gcor_u(t)$



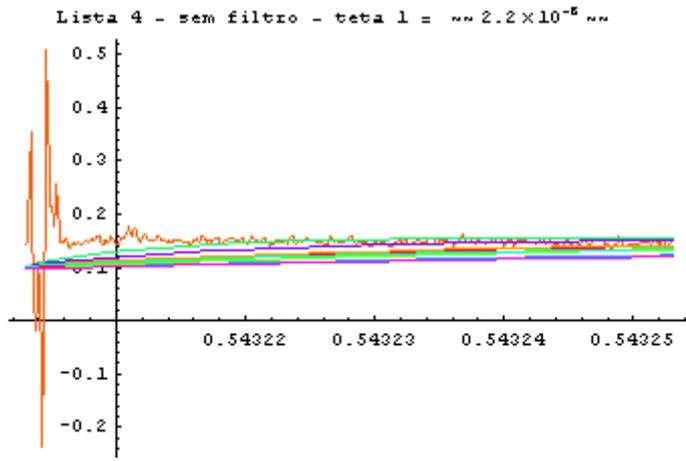
$gcor_u(t)$



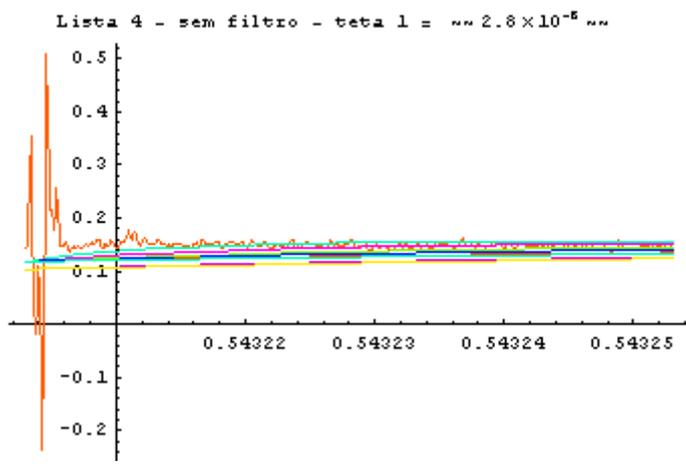
$gcor_u(t)$



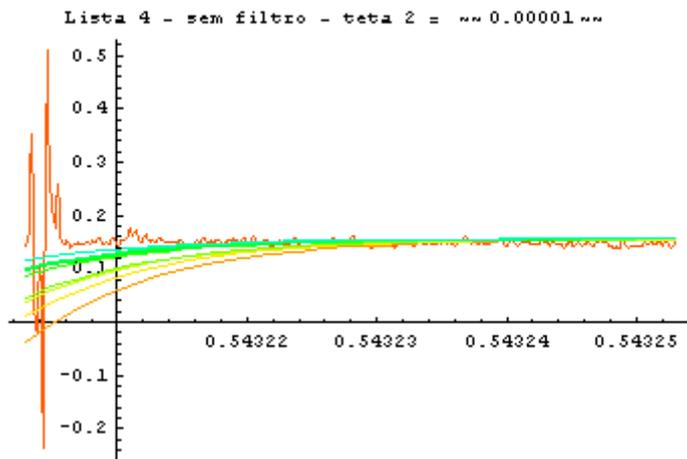
$gcor_u(t)$



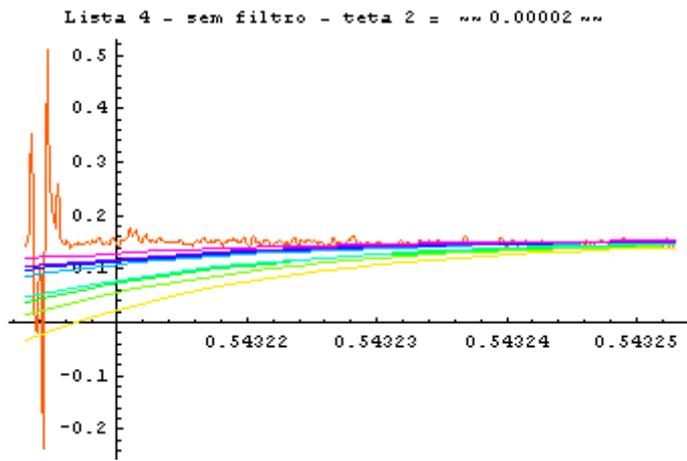
$gcor_u(t)$



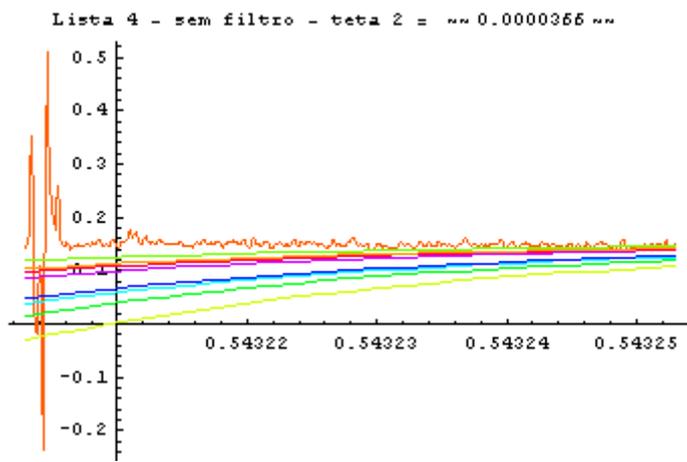
$g_{cor_u}(t)$



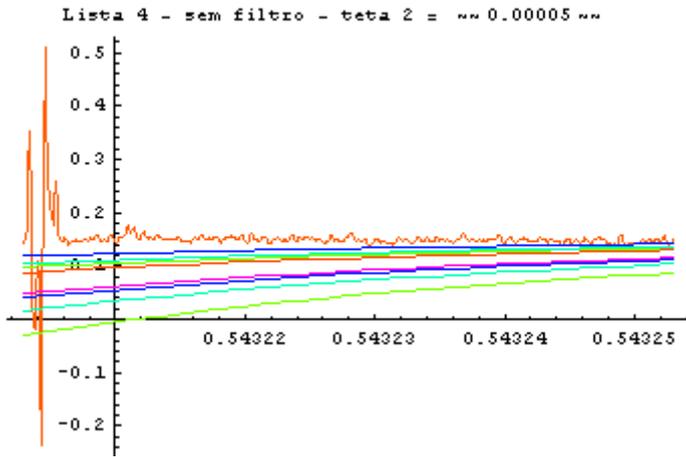
$g_{cor_u}(t)$



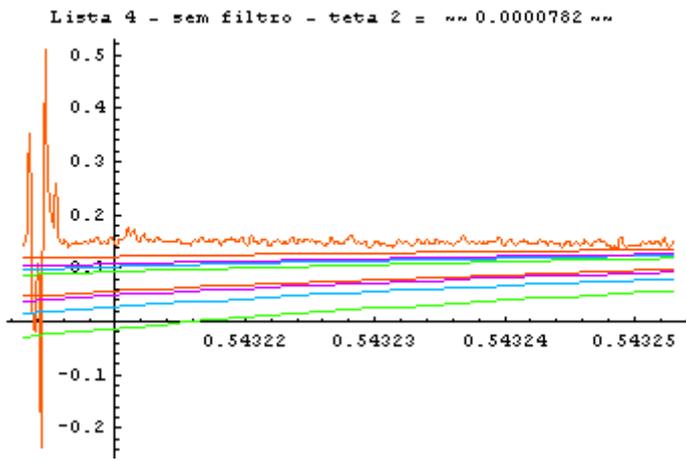
$g_{cor_u}(t)$



$g_{cor_u}(t)$



$gcor_u(t)$



$gcor_u(t)$

