WELSON BASSI

CARACTERIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO APLICADA AO ESTUDO DE TRANSITÓRIOS DE ORIGEM ATMOSFÉRICA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

São Paulo

2005

OK

WELSON BASSI

CARACTERIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES RESIDENCIAIS DE BAIXA TENSÃO APLICADA AO ESTUDO DE TRANSITÓRIOS DE ORIGEM ATMOSFÉRICA

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Geraldo Francisco Burani

São Paulo

2005

Bassi, Welson
Caracterização de equipamentos e instalações residenciais de baixa tensão aplicada ao estudo de transitórios de origem atmosférica / Welson Bassi - São Paulo, 2005.
108p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Descargas atmosféricas 2. Distribuição energia elétrica 3. Proteção contra surtos. 4. Redes de baixa tensão. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Energia e Automação Elétricas. II. t

Queridos pais, Valdenicio e Maria José, mais uma conquista nossa.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores

Geraldo Francisco Burani, Jorge Mieczyslaw Janiszewski e Alexandre Piantini, que ao longo desses anos de convívio, e na minha formação profissional, foram sempre exemplo, fontes de experiência, de conselhos (até de vida) e apoio aos estudos e ao trabalho.

Ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo, especialmente aos amigos da Seção de Alta Tensão, pelas oportunidades e condições que foram oferecidas para a realização deste trabalho.

À minha família, que me fez desistir da idéia de desistir disso tudo, por todo o incentivo e pelo desejo de sucesso.

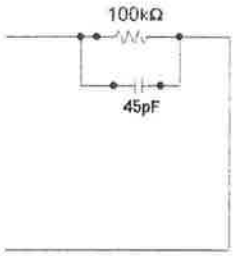
A todos que contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

ERRATA

- Na legenda do eixo vertical das seguintes figuras: Figura 3.6(b), Figura 3.8(b) e Figura 3.9(b), respectivamente nas páginas 22, 24 e 25:

onde se lê, "impedância [ohms]" leia-se "fase [graus]"

- Substituir a Figura 3.29(c), na página 46, pela figura abaixo:



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii

LISTA DE TABELAS xii

RESUMO xiii

ABSTRACT xiv

1 INTRODUÇÃO 1

2 REVISÃO DA LITERATURA 5

3 DESENVOLVIMENTO 15

3.1 Medições de impedância de entrada de equipamentos e instalações 15

3.1.1Descrição do sistema de medição 15

3.1.2 Impedância de entrada de equipamentos 19

3.1.3 Modelos de impedância de entrada dos equipamentos 40

3.1.4 Impedância de entrada de instalações residenciais 50

3.2 Suportabilidade dos equipamentos 59

3.2.1Introdução 59

3.2.2Requisitos de suportabilidade e/ou imunidade 61

3.2.3Ensaios de suportabilidade 69

3.2.3.1 Microcomputador 71

3.2.3.2 Televisor 14 polegadas 72

3.3 Comentários 73

4 APLICAÇÕES 75
4.1 Simulação de surtos em rede de distribuição 75
4.2 Simulação de surtos em instalação 84
4.2.1 Simulação de surtos na instalação - Caso B1 89
4.2.2 Simulação de surtos na instalação - Caso B2 91
4.2.3 Simulação de surtos na instalação - Caso B3 92
4.3 Comentários 93

5 COMENTÁRIOS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 96

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 103

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1: Representação da rede de distribuição e da carga residencial (adaptada de [1]) 6

Fig. 2.2: Representação da carga (adaptada de [4]) 7

Fig. 2.3: Representação da rede de distribuição (adaptada de [5]) 8

Fig. 2.4: Rede construída para estudos de sobretensões (adaptada de [6]) 9

Fig. 2.5:Efeito das capacitâncias (C) representando as instalações no valor de pico das sobretensões induzidas na rede de baixa tensão. Uc, Uo: tensões calculadas com e sem capacitâncias, respectivamente [7] 10

Fig. 2.6: Impedância de instalações (adaptada de [8]) 11

Fig. 2.7: Impedância de aparelhos elétricos (adaptada de [10]) 12

Fig. 2.8: Impedância de entrada de instalação consumidora TN e modelo correspondente [24]... 14

Fig. 3.1: Esquema geral das medições de impedância 16

Fig. 3.2: Equipamentos do sistema de medição 17

Fig. 3.3: Formas de onda de sobretensões devido a surtos atmosféricos e seus conteúdos espectrais (FFT) 18

Fig. 3.4: Impedância de entrada de televisor (TV1). (a) Módulo (b) Fase 20

Fig. 3.5: Impedância de entrada de televisor (TV2). (a) Módulo (b) Fase 21

Fig. 3.6: Impedância de entrada de televisor (TV3). (a) Módulo (b) Fase 22

Fig. 3.7: Impedância de entrada de forno de microondas (MO1). (a) Módulo (b) Fase 23

Fig. 3.8: Impedância de entrada de forno de microondas (MO2). (a) Módulo (b) Fase 24

Fig. 3.9: Impedância de entrada de forno de microondas (MO3). (a) Módulo (b) Fase 25

Fig. 3.10: Impedância de entrada de vídeo-cassete (VID1). (a) Módulo (b) Fase 26

Fig. 3.11: Impedância de entrada de vídeo-cassete (VID2). (a) Módulo (b) Fase 27

Fig. 3.12: Impedância de entrada de refrigerador (REF1). (a) Módulo (b) Fase 28

Fig. 3.13: Impedância de entrada de refrigerador (REF2). (a) Módulo (b) Fase 29

Fig. 3.14: Impedância de entrada de lava-roupas (ROU1). (a) Módulo (b) Fase 30

Fig. 3.15: Impedância de entrada de telefone sem fio (TEL1). (a) Módulo (b) Fase 31

Fig. 3.16: Impedância de entrada de conjunto de som (SOM1). (a) Módulo (b) Fase.....32

Fig. 3.17: Impedância de entrada de conjunto de som (SOM2). (a) Módulo (b) Fase.....33

Fig. 3.18: Impedância de entrada de microcomputador (PC1). (a) Módulo (b) Fase 34

Fig. 3.19: Impedância de entrada de microcomputador (PC2). (a) Módulo (b) Fase 35

Fig. 3.20: Impedância de entrada de microcomputador (PC3). (a) Módulo (b) Fase 36

Fig. 3.21: Impedância de entrada de monitor de vídeo (MON1). (a) Módulo (b) Fase.....37

Fig. 3.22: Impedância de entrada de monitor de vídeo (MON2). (a) Módulo (b) Fase.....38

Fig. 3.23: Impedância de entrada de monitor de vídeo (MON3). (a) Módulo (b) Fase.....39

Fig. 3.24: Curvas de impedância de entrada do grupo televisor (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....41

Fig. 3.25: Curvas de impedância de entrada do grupo forno de microondas (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....42

Fig. 3.26: Curvas de impedância de entrada do grupo videocassete (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....43

Fig. 3.27: Curvas de impedância de entrada do grupo refrigerador (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c) 44

Fig. 3.28: Curvas de impedância de entrada de lava-roupas (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....45

Fig. 3.29: Curvas de impedância de entrada de telefone sem fio (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....46

Fig. 3.30: Curvas de impedância de entrada do grupo conjunto de som (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....47

Fig. 3.31: Curvas de impedância de entrada do grupo microcomputador (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....48

Fig. 3.32: Curvas de impedância de entrada do grupo monitor de vídeo (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....49

Fig. 3.33: Sistema de aterramento TN.....51

Fig. 3.34: Curvas de impedância de entrada da instalação 1 (INST1) (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....52

Fig. 3.35: Curvas de impedância de entrada da instalação 2 (INST2) (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....53

Fig. 3.36: Curvas de impedância de entrada da instalação 3 (INST3) (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....54

Fig. 3.37: Curvas de impedância de entrada da instalação 4 (INST4) (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c).....55

Fig. 3.38: Curvas de impedância de entrada da instalação 5 (INST5) (a) Módulo (b) Fase Medidas e calculadas utilizando-se o modelo (c)..... 56

Fig. 3.39: Modelo simplificado adotado para representação das instalações residenciais..... 57

Fig. 3.40: Curvas de impedância de entrada das instalações e calculadas utilizando-se o modelo da Figura 3.39 **(a)** Módulo **(b)** Fase..... 58

Fig. 3.41: Impulso atmosférico superposto à tensão em 60 Hz 60

Fig. 3.42: Curva de imunidade de equipamentos de computação (ITI) (adaptada de [26])..... 63

Fig. 3.43: Tensão de circuito aberto do gerador de onda combinada, (1,2/50) [27]..... 65

Fig. 3.44: Corrente de curto-circuito do gerador de onda combinada, (8/20) [27]..... 66

Fig. 3.45: Impulso de tensão aplicado ao microcomputador 72

Fig. 3.46: Impulso de tensão aplicado ao televisor..... 72

Fig. 4.1: Topologia utilizada nas simulações de surtos na rede de distribuição [17]..... 76

Fig. 4.2: Representação detalhada de um trecho das linhas primária e secundária [17] Rp: resistência de aterramento do poste; Rc: resistência de aterramento do consumidor;C: carga; PR's: pára-raios do primário do transformador; T: transformador..... 76

Fig. 4.3: Resultados de simulação para o Caso A1..... 80

Fig. 4.4: Resultados de simulação para o Caso A2..... 80

Fig. 4.5: Resultados de simulação para o Caso A3..... 80

Fig. 4.6: Resultados de simulação para o Caso A4..... 81

Fig. 4.7: Resultados de simulação para o Caso A5..... 81

Fig. 4.8: Resultados de simulação para o Caso A6..... 81

Fig. 4.9: Resultados de simulação para o Caso A7..... 82

Fig. 4.10: Resultados de simulação para o Caso A8..... 82

Fig. 4.11: Resultados de simulação para o Caso A9..... 83

Fig. 4.12: Resultados de simulação para o Caso A10..... 83

Fig. 4.13: Modelo empregado para os condutores de uma instalação em [38]..... 85

Fig. 4.14: Modelo empregado para os condutores de uma instalação em [12]..... 86

Fig. 4.15: Modelo estudado para avaliação de modelos de linha de transmissão (condutores) (adaptada de [40])..... 87

Fig. 4.16: Parâmetros do modelo de linha de transmissão (condutores)..... 87

Fig. 4.17: Representação da instalação simulada 88

Fig. 4.18: Formas de onda de tensão (a) e corrente de curto-circuito (b) do Caso A1 89

Fig. 4.19: Resultados da simulação Caso B1 90

Fig. 4.20: Resultados da simulação Caso B2 91

Fig. 4.21: Resultados da simulação Caso B3 92

Fig. 4.22: Avaliação do desempenho dos modelos de instalação simulados 94

Fig. 5.1: Localização das categorias na instalação (adaptada de [33]) 98

Fig. 5.2: Formas de onda normalizadas. a) 1,2/50 b) *Ring Wave* 100 kHz (adaptada de [33]) 99

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Tensões suportáveis de impulso atmosférico em instalações de baixa tensão [25].... 62

Tabela 4.1 - Lista dos casos simulados. 79

Tabela 5.1 - Aplicação das formas de onda para as diferentes categorias [33] 99

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caracterização das impedâncias de entrada, em função da freqüência, de instalações residenciais de baixa tensão e diversos equipamentos eletro-eletrônicos comumente encontrados. As respostas em freqüência medidas são ajustadas e modeladas por redes RLC simples, mas efetivas, que podem ser utilizadas em qualquer programa computacional para simulações de transitórios. A faixa de freqüências, até 5 MHz, permite o uso desses modelos em estudos associados a transitórios atmosféricos ou causados por chaveamentos. É importante ressaltar a existência de muito poucos trabalhos nesse assunto, pois, usualmente, as instalações de baixa tensão, ou os equipamentos conectados, são representadas por simples elementos concentrados, resistores, indutores ou capacitores. Por outro lado, sabe-se que os níveis de sobretensões em um sistema, ou instalação, são fortemente dependentes das cargas conectadas e, quanto mais precisos os modelos, melhores e mais confiáveis simulações são obtidas. Este trabalho inclui simulações com o programa computacional ATP utilizando os modelos desenvolvidos para avaliação de surtos em uma rede de distribuição típica submetida a descargas atmosféricas diretas no circuito primário. Além disso, utilizando o programa *Pspice*, são realizadas simulações da resposta interna de uma instalação residencial, com diversos equipamentos conectados, e submetida a surtos atmosféricos em sua entrada. O trabalho concentra informações práticas e úteis sobre estudos de surtos em sistemas e instalações de baixa tensão.

ABSTRACT

This work presents a study of impedance characteristics, over a wide range of frequencies, of residential low-voltage installations and electric-electronic appliances, commonly found in residential installations. The measured frequency responses are fitted and modeled by simple, but effective, RLC networks, that can be used in any software for transient simulations. The range of frequencies, up to 5 MHz, allows the use of these models considering lightning or switching studies. It is of importance to point the lack of publications focusing this topic, because usually the low-voltage installations, or connected equipment, are represented by simple lumped components inductances, resistances or capacitances. Otherwise, it is well known that the overvoltage level of a system, or installation, is strongly dependent on the connected loads and for more precise models, better and more reliable simulation results are obtained. This work includes ATP software simulations using the developed models for evaluation of surges in a typical distribution network subjected to direct lightning strikes at the primary circuit. Furthermore, simulations of internal response of a low-voltage installation with connected equipment and subjected to lightning surges in its entrance is performed using the *Pspice* software. The work summarizes practical and useful information about the low-voltage surge studies on low-voltage systems.

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

É fato, atualmente, a utilização cada vez mais intensa de cargas e equipamentos elétricos sensíveis nos mais diversos segmentos de atividade. No Brasil, tais equipamentos e cargas são conectados na sua absoluta maioria a redes aéreas convencionais, tanto nos circuitos de média quanto de baixa tensão o que torna bastante elevada a exposição a sobretensões causadas por descargas atmosféricas.

Recomendam-se, portanto, estudos com o objetivo de quantificar e/ou qualificar as sobretensões causadas por descargas atmosféricas diretas ou indiretas. Para realização de tais estudos, desde há vários anos, têm sido utilizados programas ou pacotes de simulação computacionais que necessitam de modelos dos componentes do sistema em análise. Nota-se grande número de publicações e trabalhos referentes a modelos de diversos componentes, isto é, transformadores, cabos e/ou condutores, aterramento e seu comportamento.

Entretanto, um componente fundamental de tal sistema não apresenta grande disponibilidade de informações, quais sejam as cargas e as instalações ligadas à rede de baixa tensão. Usualmente, como será visto adiante, elas são representadas por componentes simples baseados na sensibilidade do pesquisador, sem apoio em medições.

A representação das instalações de consumidores ligados às redes secundárias de distribuição na faixa de freqüências de interesse apresenta dificuldades que tornam praticamente impossível a elaboração de um modelo detalhado e absoluto para as condições encontradas na realidade. É possível, contudo, conseguir informações apoiadas em ensaios e medições em instalações reais e, então, obter modelos simples.

Este trabalho tem por objetivo caracterizar a impedância de instalações residenciais e cargas eletro-eletrônicas em função da freqüência e contribuir para definição de modelos simples, compostos basicamente de redes RLC, a serem utilizados em programas de simulação computacional. O trabalho traz ainda aplicações dos modelos apresentados em simulações com programas consagrados (*ATP, EMTP, Spice*), para avaliação do comportamento de sobretensões de origem atmosférica.

A proteção dos componentes de um dado sistema, principal objetivo dos estudos, é efetiva quando os níveis de sobretensões limitam-se a um nível tal em que sejam minimizados, ou virtualmente eliminados, os riscos de falhas. Portanto, torna-se necessário o conhecimento ou avaliação desses níveis admissíveis de sobretensões. Neste trabalho são apresentadas informações e indicações sobre a suportabilidade de equipamentos eletro-eletrônicos. Alguns ensaios de suportabilidade a impulso também foram realizados e são aqui apresentados.

Quanto à estrutura deste trabalho, inicialmente, no Capítulo 2, estão reunidos comentários sobre diversos estudos relacionados com o assunto ou que foram utilizados no processo de desenvolvimento e estabelecimento de modelos dos componentes utilizados neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta os resultados dos ensaios realizados bem como os modelos desenvolvidos e empregados no processo de simulação computacional. Foram utilizados recursos de equipamentos e laboratórios da Seção Técnica de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo. São também apresentadas informações acerca da suportabilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos.

O Capítulo 4 mostra aplicações dos modelos, através da simulação de uma rede de distribuição típica. Os resultados foram obtidos por meio de simulações computacionais, utilizando-se o programa ATP (*Alternative Transients Program*), uma versão livre do programa EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) para uso em microcomputadores e que, nos últimos anos, tem sido largamente empregado para estudos de transitórios em sistemas em que, devido à grande quantidade de elementos, uma abordagem analítica torna-se inviável.

Outro consagrado programa utilizado foi o *Pspice*, versão livre. Este programa foi empregado no desenvolvimento e avaliação de resposta em freqüência dos modelos das

instalações e equipamentos eletro-eletrônicos apresentados bem como cálculos de sobretensões em instalações empregando tais modelos.

O Capítulo 5 apresenta comentários referentes ao desenvolvimento do trabalho e dos resultados obtidos e, finalmente, sugestões de futuros trabalhos e desenvolvimentos sugeridos sobre o assunto e outros correlatos.

CAPÍTULO 2
REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo são apresentadas informações mais relevantes obtidas em diversas publicações.

Dada a complexidade e diversidade das instalações consumidoras poucas publicações específicas são encontradas sobre a modelagem das mesmas em freqüências relacionadas aos surtos atmosféricos.

Estudos podem ser encontrados buscando-se analisar o comportamento de redes de baixa tensão quando submetidos a surtos de origem atmosférica. Muitas vezes o enfoque destes estudos é o comportamento dos transformadores de distribuição e a modelagem das cargas conectadas é feita de maneira bastante simplificada [1-16].

Em [1] foram realizados ensaios em um sistema composto por um transformador real, uma linha primária e ramais de alimentação secundários construídos em escala, utilizando-se um fator de 8,36 para 1. As cargas dos consumidores foram simuladas representando-se a fiação da residência por capacitâncias de 15 nF e a carga, entre 10 A a 15 A por resistores de 22 Ω como visto na Figura 2.1. Nenhuma observação é feita quanto ao desempenho da carga em altas freqüências. Foram avaliadas a divisão de

correntes entre os aterramentos (do poste e consumidor) e as sobretensões resultantes nas cargas e no transformador.

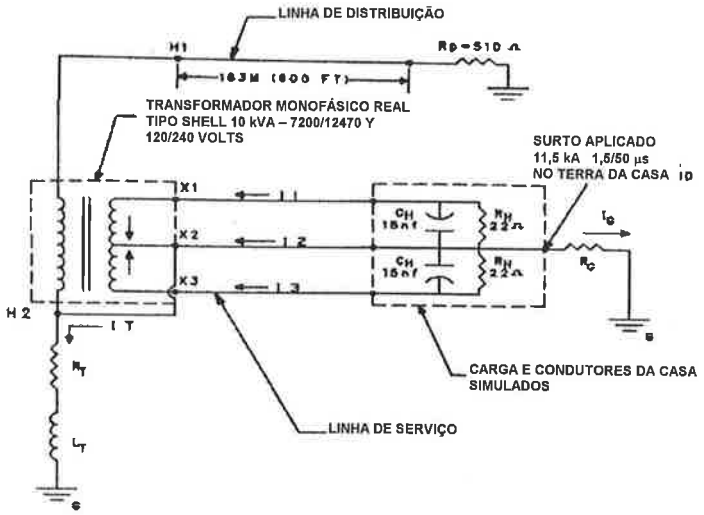


Fig. 2.1: Representação da rede de distribuição e da carga residencial (adaptada de [1]).

A suportabilidade de transformadores monofásicos a surtos atmosféricos no lado de baixa tensão foi estudada em [2]. Através de ensaios, os autores procuraram caracterizar a ocorrência de falhas no enrolamento primário devido à injeção de corrente no lado de baixa tensão. Novamente, as cargas conectadas no lado secundário do transformador foram representadas como em [1]. Estudo semelhante foi realizado em [3] através de simulações digitais. Foram utilizados modelos com parâmetros concentrados para representação das linhas (primária e secundária) e do transformador. As cargas foram representadas como 50 % resistiva e 50 % indutiva (motor) baseadas apenas em porcentagens da potência nominal do transformador operando em regime permanente.

Em [4] foram realizados estudos paramétricos utilizando-se o EMTP e alguns ensaios em laboratório. A modelagem utilizou parâmetros concentrados sendo que o transformador monofásico foi representado pelo modelo normalmente utilizado em análise de curto-circuitos e, adicionalmente, foram consideradas as capacitâncias entre seus terminais. As cargas dos consumidores foram representadas por resistências, como visto na Figura 2.2, considerando três quartos da carga total conectados fase-fase e o restante ligado entre fase e neutro. Os valores de R_H variaram de 4,61 Ω a 92,2 Ω e os valores de R_S variaram de 3,07 Ω a 61,4 Ω, valores correspondentes respectivamente a 1 e 0,05 p.u. da potência nominal de um transformador de 25 kVA.

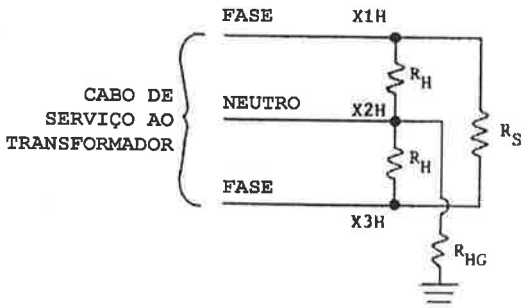


Fig. 2.2: Representação da carga (adaptada de [4]).

Em [5], utilizando parâmetros concentrados na representação do transformador, das linhas e das cargas, os autores desenvolveram expressões para avaliação das correntes e tensões no circuito secundário. Os autores, através das expressões desenvolvidas, analisam os efeitos das indutâncias do transformador, comprimento do circuito secundário, aterramentos e cargas na corrente que flui pelo neutro e na tensão resultante no consumidor. O transformador foi modelado por indutâncias, tal qual utilizado em

estudos de curto-circuito, desprezando-se resistências dos enrolamentos e ainda qualquer capacitância. As cargas foram representadas por resistores, ligados entre fase e neutro, como visto na Figura 2.3.

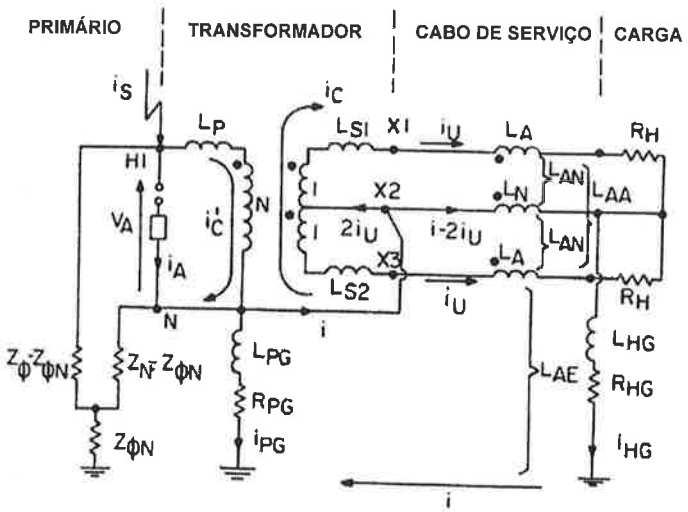


Fig. 2.3: Representação da rede de distribuição (adaptada de [5]).

Um estudo experimental, em escala real, foi apresentado em [6]. Um transformador monofásico de 15 kVA, com pára-raios primário instalado junto ao tanque, foi montado conjuntamente a uma linha secundária triplexada, com cerca de 45 m, como visto na Figura 2.4. Um gabinete de medidor de energia foi instalado no final da rede secundária e ainda foram construídos dois circuitos com cerca de 20 m, simulando a instalação interna até às cargas. Como cargas, foram instalados resistores com valores correspondentes a 400 W em 120 V, ou seja, 36 Ω.

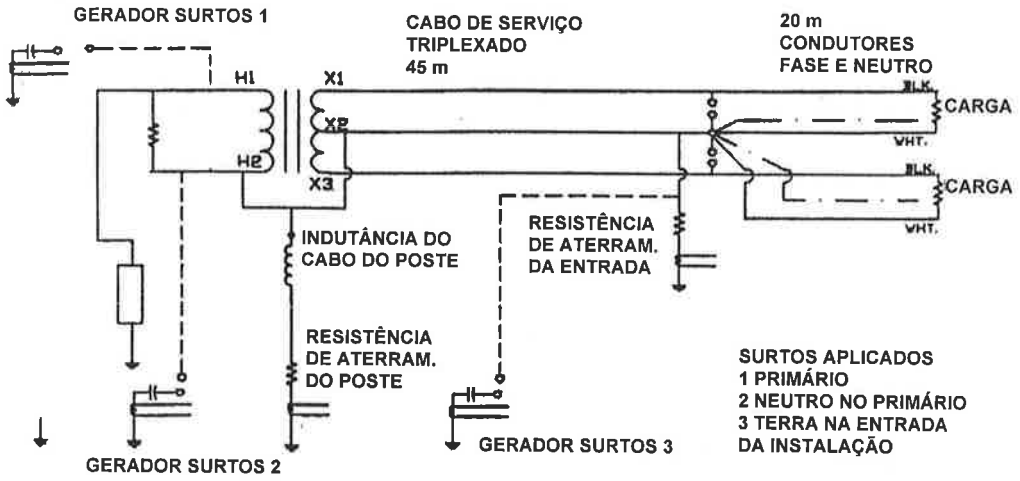


Fig. 2.4: Rede construída para estudos de sobretensões (adaptada de [6]).

Em [7] é apresentado um estudo qualitativo mostrando as principais causas de sobretensões atmosféricas em circuitos de baixa tensão, quais sejam: a transferência de sobretensões do circuito primário para o secundário através dos transformadores, sobretensões induzidas e descargas diretas no circuito secundário. A rede secundária configura-se em um sistema TT e as instalações dos consumidores foram representadas por capacitâncias concentradas variando de 4 nF a 8 nF. As sobretensões induzidas calculadas são fortemente atenuadas pela presença de cargas ressaltando-se, portanto, sua relevância. (Figura 2.5).

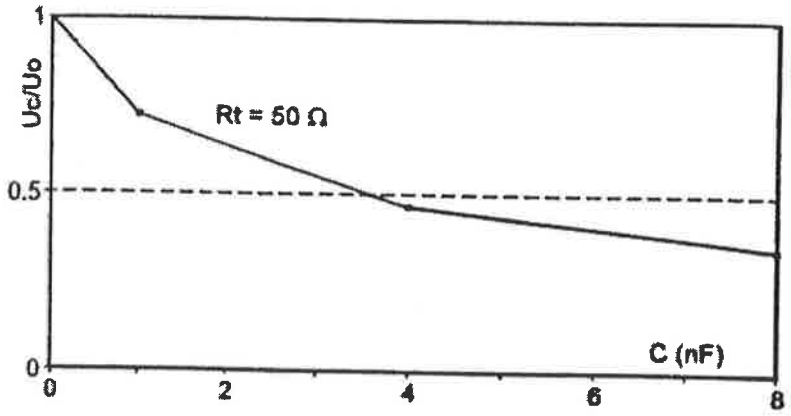


Fig. 2.5: Efeito das capacitâncias (C) representando as instalações no valor de pico das sobretensões induzidas na rede de baixa tensão. Uc, Uo: tensões calculadas com e sem capacitâncias, respectivamente [7].

Os trabalhos [1-7] de maneira geral utilizaram-se de modelos bastante simplificados para representação das cargas e/ou instalações. Esses trabalhos tinham como objetivo geral a avaliação da resposta de redes ou instalações frente à injeção de surtos associados a descargas atmosféricas.

Os trabalhos [29-32] trazem diversos resultados de medições de sobretensões induzidas em instalações residenciais. Para realização dos estudos os pesquisadores utilizaram uma instalação artificial especialmente construída para as medições e comentam a grande dificuldade representada pela diversidade e variedade de possibilidades no que se refere à instalação propriamente dita.

Em [36] é apresentado um estudo para avaliação de sobretensões induzidas nas entradas de instalações residenciais de baixa tensão. A presença das cargas dos consumidores foi representada por resistores de 30 Ω conectados entre fase e neutro.

Outras contribuições podem ser encontradas em estudos que objetivam modelar as instalações residenciais como meios transmissores de sinais de telecomunicação [8-9].

Em [8] os autores realizaram medições da impedância de instalações comerciais nos Estados Unidos e o principal resultado está mostrado na Figura 2.6 onde se vêem as curvas de impedância em função da freqüência, com valores máximos, médios e mínimos em cada freqüência considerando o conjunto das instalações estudadas.

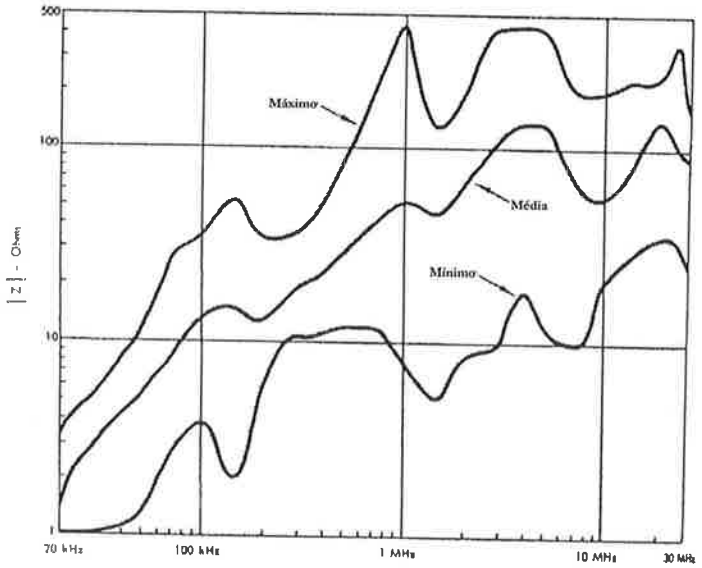


Fig. 2.6: Impedância de instalações (adaptada de [8]).

A impedância de entrada das instalações é dependente das impedâncias dos equipamentos elétricos e/ou eletrônicos presentes na própria instalação. Justifica-se, portanto a caracterização desses equipamentos nos estudos de transitórios.

Em [10] os autores apresentam resultados de medição de impedâncias de alguns aparelhos elétricos encontrados em instalações residenciais, até a freqüência de 500 kHz como mostrado na Figura 2.7.

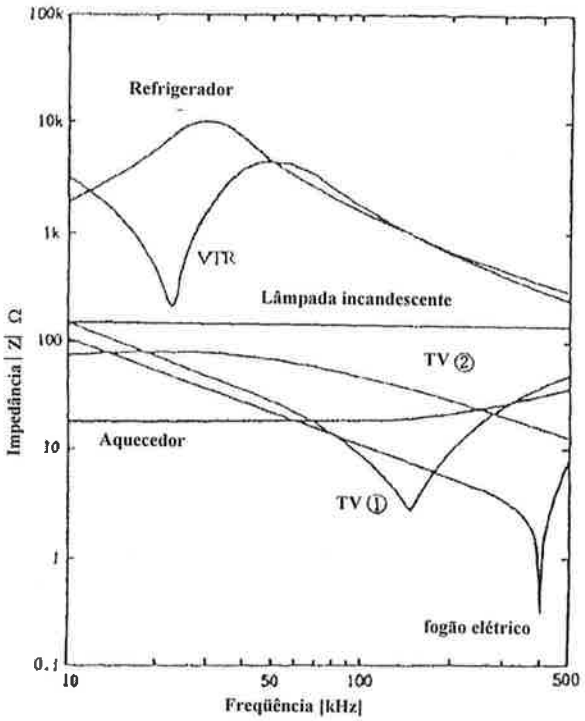


Fig. 2.7: Impedância de aparelhos elétricos (adaptada de [10]).

Diversos outros trabalhos [11-23], objetivando estudar o comportamento de sobretensões nas redes de baixa tensão ou ainda as solicitações em pára-raios ou dispositivos de proteção instalados em tais redes, fazem uso de modelos bastante

simplificados em se tratando dos consumidores residenciais, tipicamente valores discretos de capacitâncias ou resistências.

Em [24] podem ser encontrados diversos resultados de medições de resposta em freqüência (até 2 MHz), obtidos em uma única instalação residencial na Noruega. Conforme relato do autor, a impedância de entrada é, evidentemente, muito dependente das cargas ou equipamentos conectados. As cargas resistivas utilizadas para aquecimento levariam a valores muito baixos de impedância e foram desconectadas. Um outro ponto importante é que a técnica utilizada para obtenção da impedância em função da freqüência exigiu que os aparelhos fossem desligados, impossibilitando a medição das efetivas impedâncias dos equipamentos (como os motores dos refrigeradores). O autor aponta ainda que os equipamentos de grande importância para definição da impedância de entrada total da instalação em estudo foram as máquinas de lavar louças e roupas, bem como o equipamento de som e o microcomputador pessoal. Como resultados importantes do estudo, a Figura 2.8 mostra a curva de impedância de entrada da instalação estudada e, também, o modelo adotado para a representação da instalação. É sugerido no estudo que o circuito equivalente seja ainda simplificado, desprezando-se o comportamento capacitivo em freqüências mais baixas, aproximando-se a impedância de entrada da instalação estudada por um indutor de 3,5 μH.

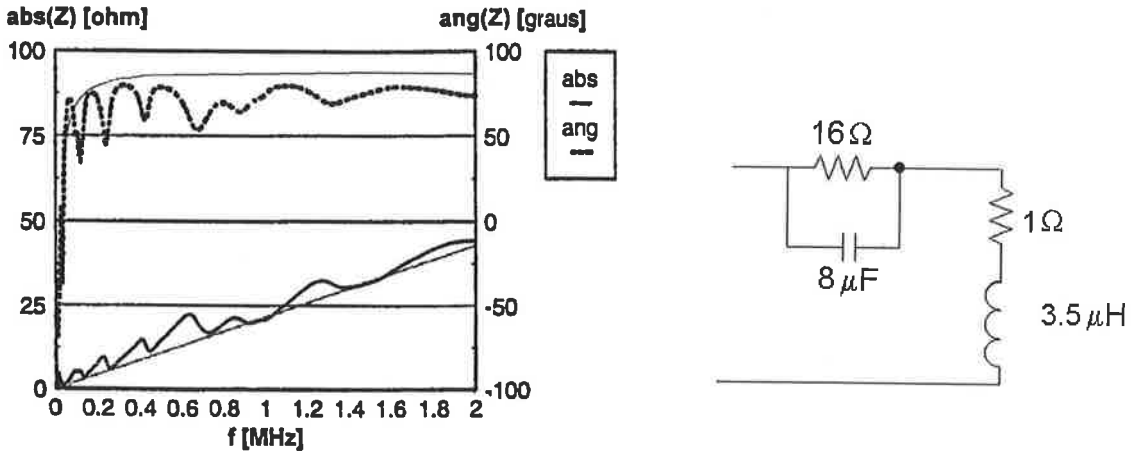


Fig. 2.8: Impedância de entrada de instalação consumidora TN e modelo correspondente [24].

Em síntese, a representação das instalações é complexa devido à grande diversidade de possibilidades de circuitos, cargas e componentes conectados e sua dinâmica. Isso se reflete na relativa escassez de informações na literatura e a abordagem utilizada pela maioria dos autores em realizar representações simplificadas, com componentes discretos e, via de regra, caminhando os estudos a análises paramétrica e/ou de sensibilidade a valores.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO

Neste Capítulo são apresentados os resultados de medições em instalações residenciais e em equipamentos eletro-eletrônicos, bem como modelos simplificados para representação dos mesmos para utilização em programas computacionais de cálculos de transitórios. Apresenta-se ainda uma avaliação de suportabilidade dos equipamentos.

3.1 Medições de impedância de entrada de equipamentos e instalações

Foram determinadas curvas características de impedância de entrada em função da freqüência em alguns equipamentos eletro-eletrônicos e algumas instalações residenciais.

3.1.1 Descrição do sistema de medição

Um sistema de medição foi desenvolvido com o objetivo de realizar as medições de impedância de entrada das instalações e de equipamentos em função da freqüência.

O sistema é composto basicamente por um gerador de sinais e um osciloscópio digital (Figura 3.1). Os valores eficazes de tensão e corrente aplicados à carga são medidos pelo osciloscópio e transferidos, utilizando-se o protocolo GPIB, ao microcomputador,

através de um programa desenvolvido para o trabalho que também calcula a impedância complexa em cada freqüência de interesse pela relação entre tensão e corrente e pela diferença de fase entre os sinais. Um amplificador é utilizado para medição da corrente (ordem de mA) em conjunto com uma ponta de prova composta por um dispositivo de efeito Hall (medição da componente DC e baixas freqüências) e um transformador de ferrite (medição da componente AC).

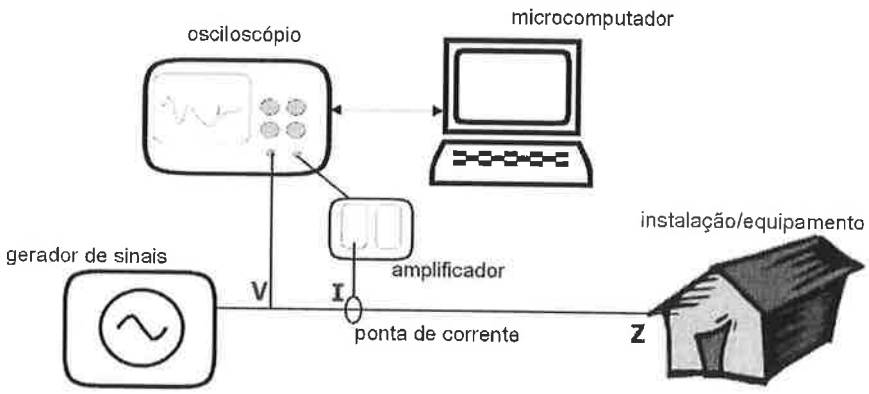


Fig. 3.1: Esquema geral das medições de impedância.

Relação de equipamentos:

1. *Gerador de sinais:* HP 8111A, 20 MHz
2. *Oscilosópio:* Tektronix, TDS 320, 8 bits, 100 MHz
3. *Ponta de prova de corrente*: Tektronix, A6302, 20 MHz
4. *Amplificador para ponta de corrente:* Tektronix, TM502
5. *Microcomputador:* PC 486, 66 MHz, com placa de aquisição de dados/controle National Instruments GPIB 488

A Figura 3.2 mostra os equipamentos utilizados nas medições.

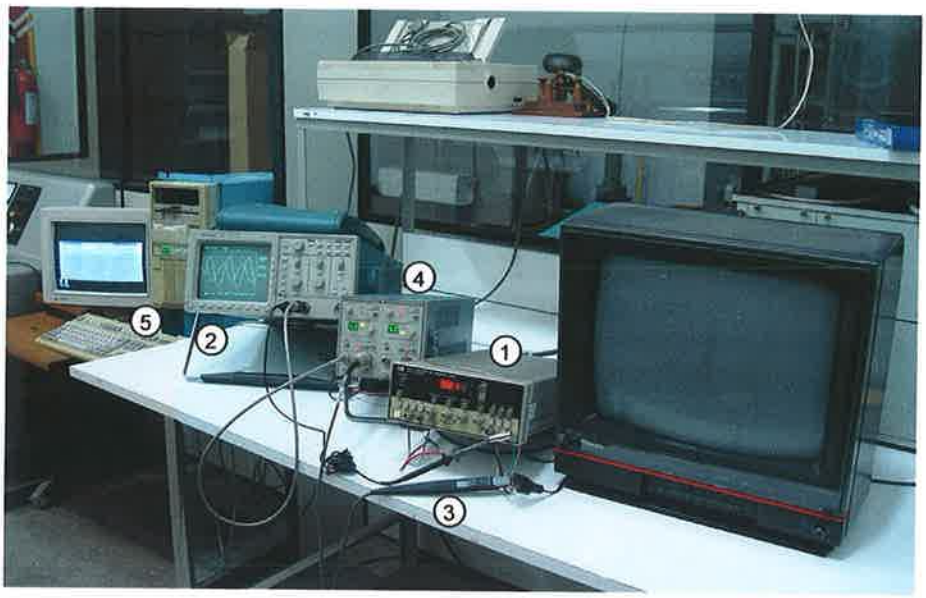


Fig. 3.2: Equipamentos do sistema de medição.

As medições de impedância foram efetuadas na faixa de até 5 MHz, valor este considerado adequado aos fenômenos associados a descargas atmosféricas. Como avaliação, foram calculados, utilizando-se método da transformada rápida de Fourier (FFT), diversos conteúdos espectrais de formas de onda típicas obtidas em simulações mostradas na Figura 3.3:

a) impulso atmosférico padronizado com tempo de frente de aproximadamente 1 μs e tempo de meio valor 50 μs;
b) sobretensão na rede secundária, causada por ocorrência de descarga direta na rede primária [17];
c) obtida em [34], resultado de tensão induzida na rede de baixa tensão;
d) resultado da transferência, via transformador de distribuição, de sobretensão induzida no primário [35].

Nota-se, em todos os casos, que faixa de freqüência de até 5 MHz inclui, praticamente, todo os componentes de freqüência dos sinais estudados.

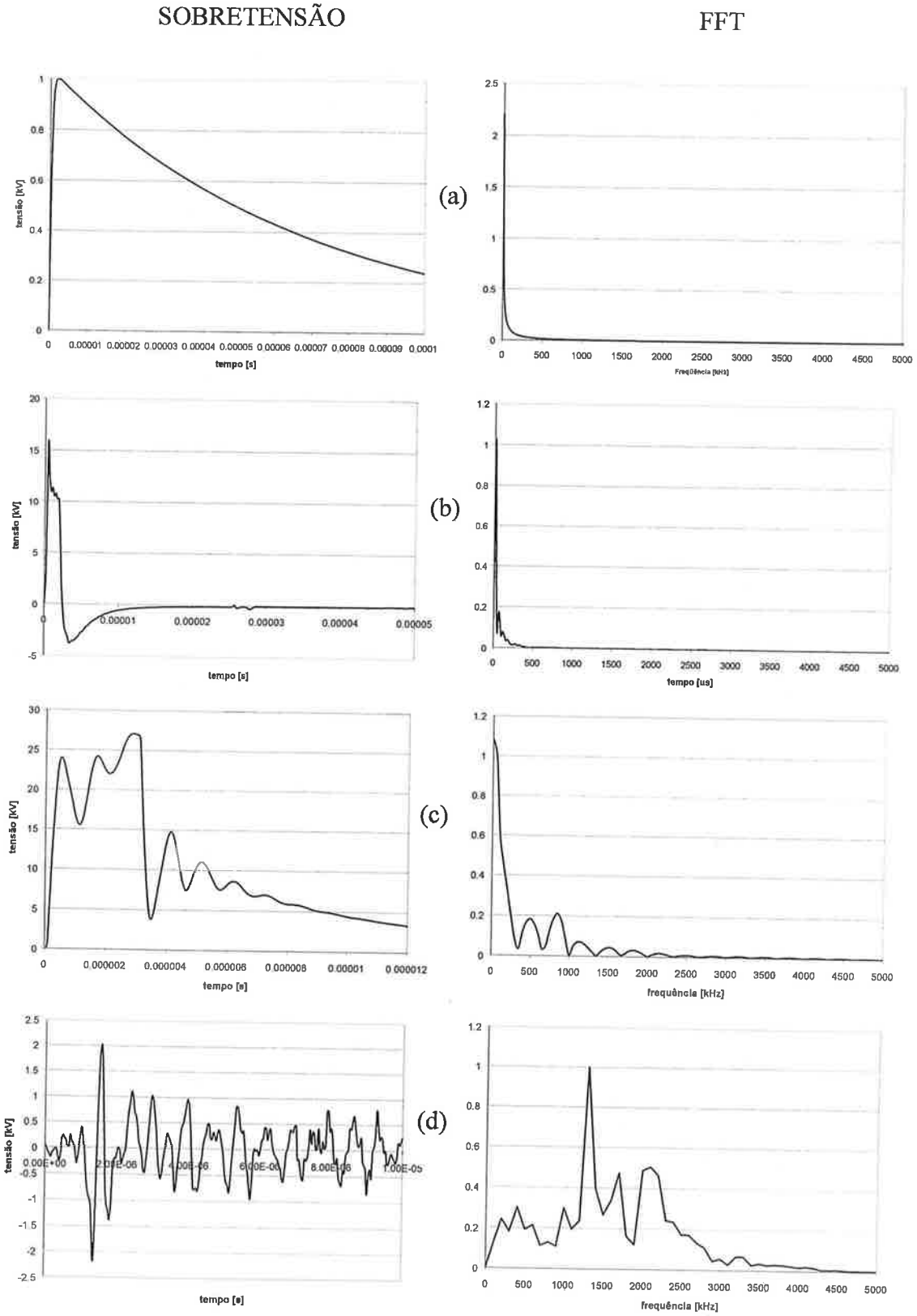


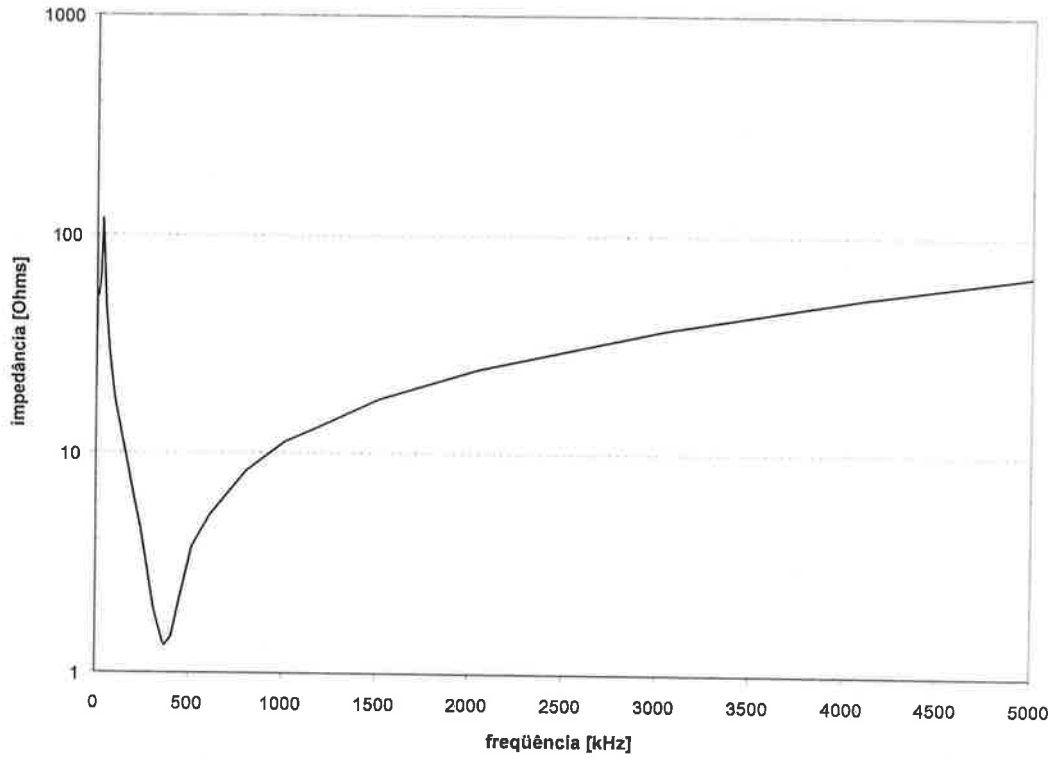
Fig. 3.3: Formas de onda de sobretensões devido a surtos atmosféricos e seus conteúdos espectrais (FFT).

3.1.2 Impedância de entrada de equipamentos

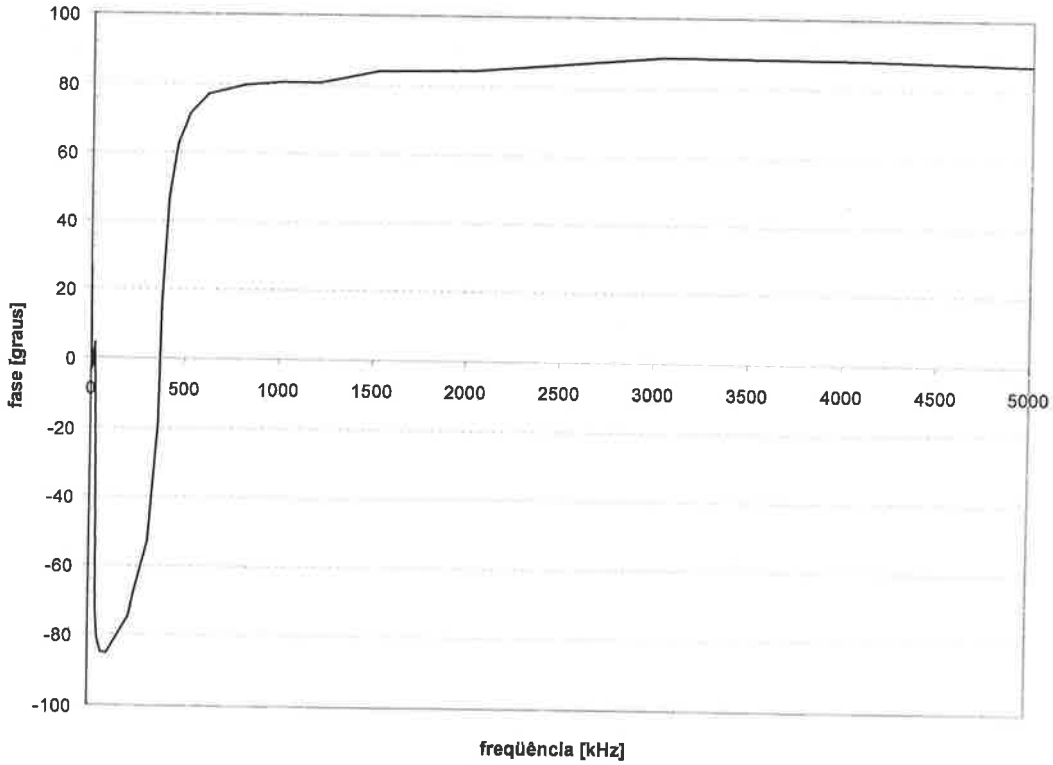
As Figuras 3.4 a 3.23 apresentam as curvas de impedância de entrada de equipamentos eletro-eletrônicos comumente encontrados no mercado.

Os seguintes equipamentos foram ensaiados:

- Televisor (TV1), 29 polegadas, Fabricante 1, fabricação 2000, Figura 3.4;
- Televisor (TV2), 14 polegadas, Fabricante 2, fabricação 1992, Figura 3.5;
- Televisor (TV3), 20 polegadas, Fabricante 3, fabricação 1996, Figura 3.6;
- Forno de microondas (MO1), 700W, Fabricante 1, fabricação 2002, Figura 3.7;
- Forno de microondas (MO2), 800W, Fabricante 2, fabricação 1999, Figura 3.8;
- Forno de microondas (MO3), 1000W, Fabricante 3, fabricação 1997, Figura 3.9;
- Videocassete (VID1), 4 cabeças, Fabricante 1, fabricação 1991, Figura 3.10;
- Videocassete (VID2), 6 cabeças, Fabricante 2, fabricação 2000, Figura 3.11;
- Refrigerador (REF1), 440 litros, Fabricante 1, fabricação 1992, Figura 3.12;
- Refrigerador (REF2), 440 litros, Fabricante 2, fabricação 1999, Figura 3.13;
- Lava-roupas (ROU1), Fabricante 1, fabricação 2001, Figura 3.14;
- Telefone sem fio (TEL1), Fabricante 1, fabricação 2000, Figura 3.15;
- Conjunto de som (SOM1), Fabricante 1, fabricação 2001, Figura 3.16;
- Conjunto de som (SOM2), Fabricante 2, fabricação 1995, Figura 3.17;
- Microcomputador (PC1), PC 486, 66 MHz, fabricação 1994, Figura 3.18;
- Microcomputador (PC2), PENTIUM II, 400 MHz, fabricação 1998, Figura 3.19;
- Microcomputador (PC3), PENTIUM IV, 2,4 GHz, fabricação 2005, Figura 3.20;
- Monitor de vídeo (MON1), 14 pol., Fabricante 1, fabricação 1994, Figura 3.21;
- Monitor de vídeo (MON2), 14 pol., Fabricante 2, fabricação 1999, Figura 3.22;
- Monitor de vídeo (MON3), 15 pol., Fabricante 3, fabricação 2005, Figura 3.23;

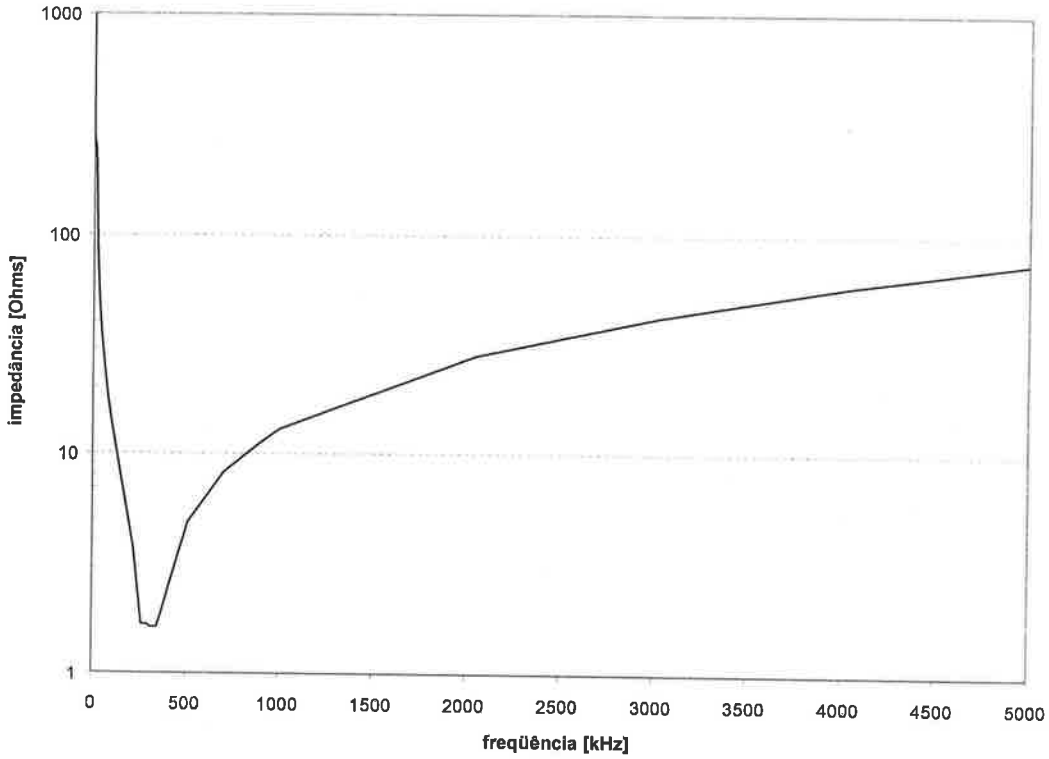


(a)

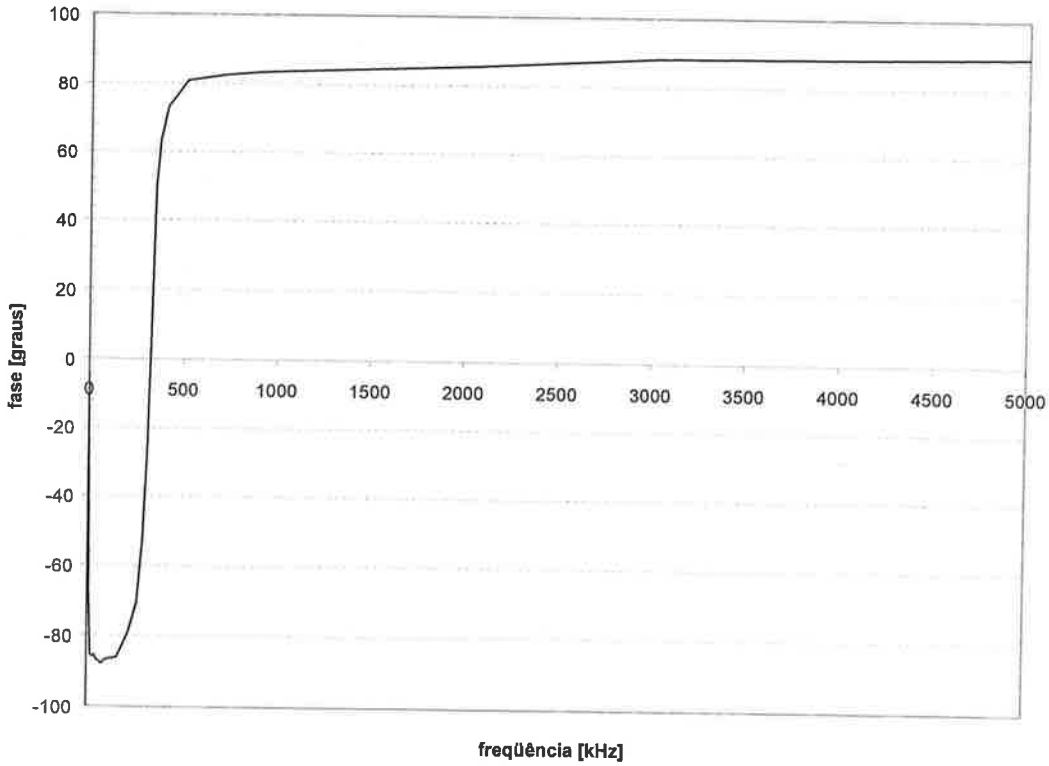


(b)

Fig. 3.4: Impedância de entrada de televisor (TV1). (a) Módulo (b) Fase.

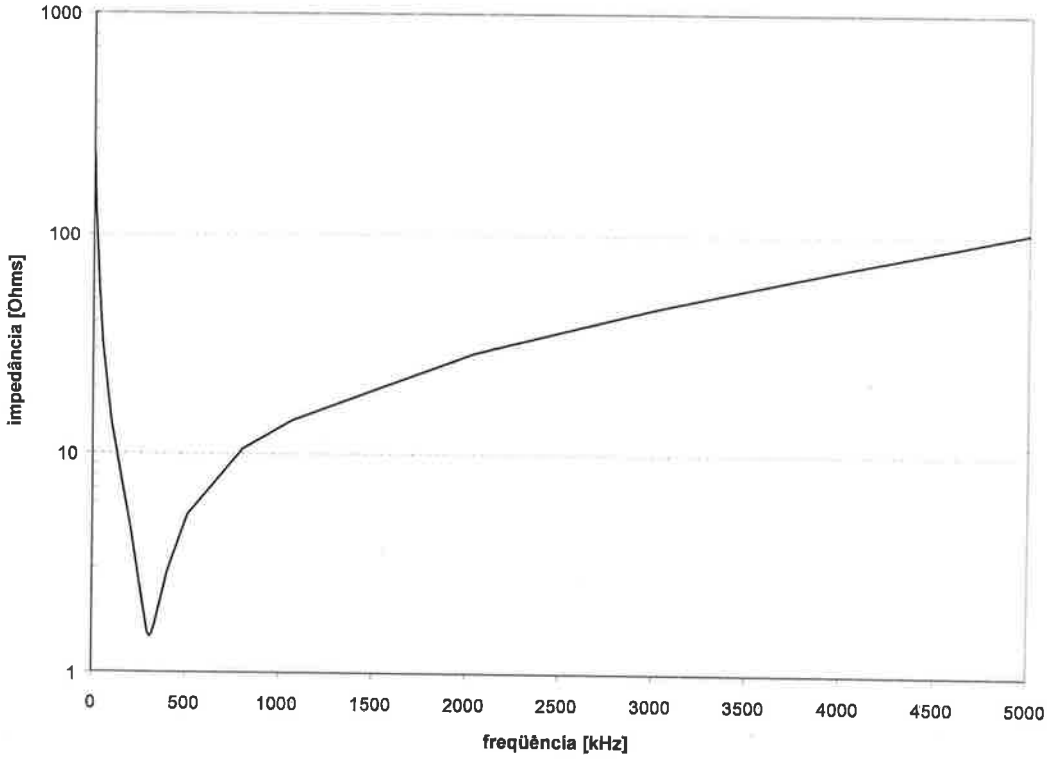


(a)

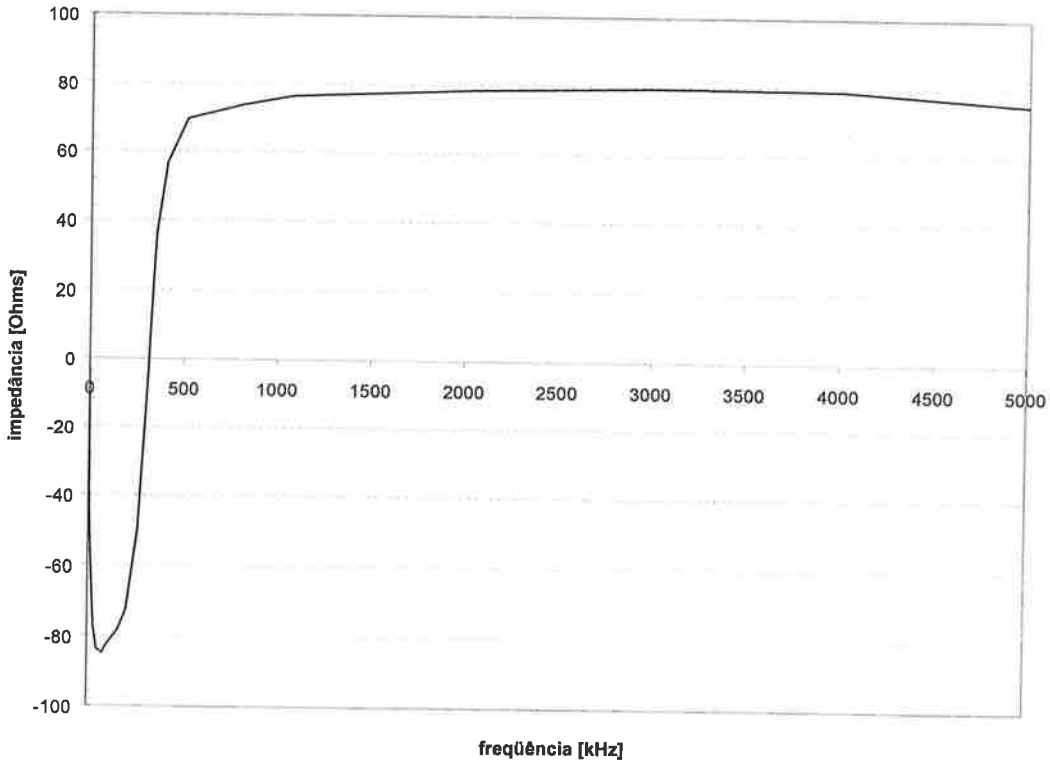


(b)

Fig. 3.5: Impedância de entrada de televisor (TV2). (a) Módulo (b) Fase

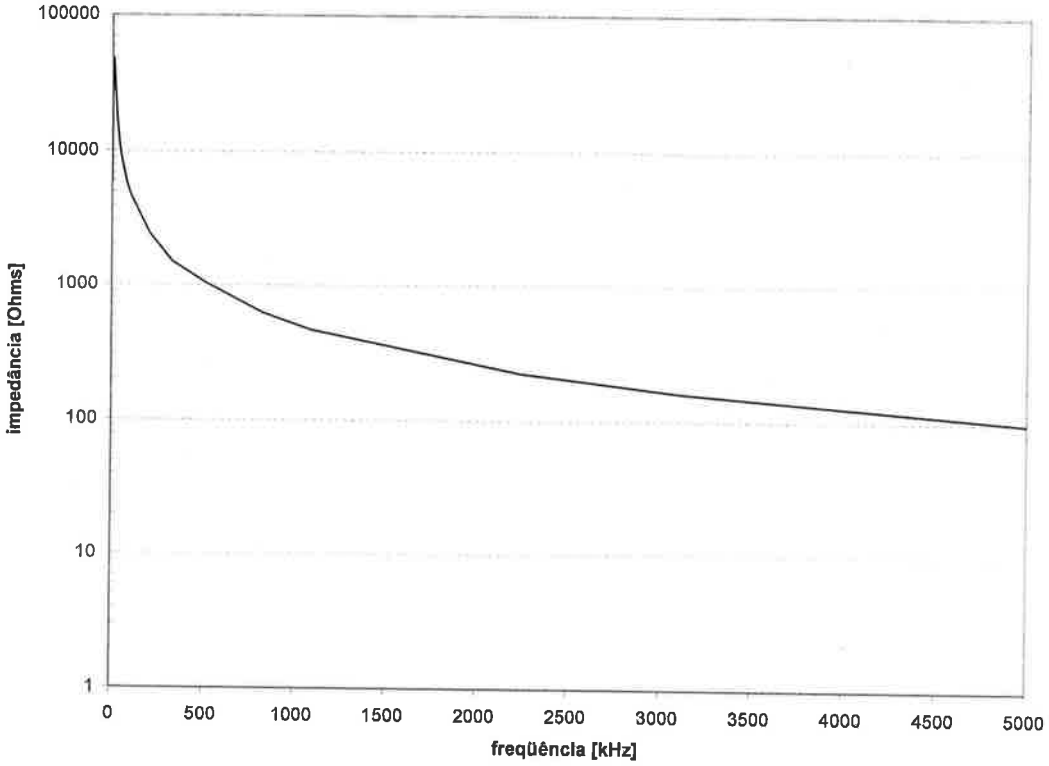


(a)

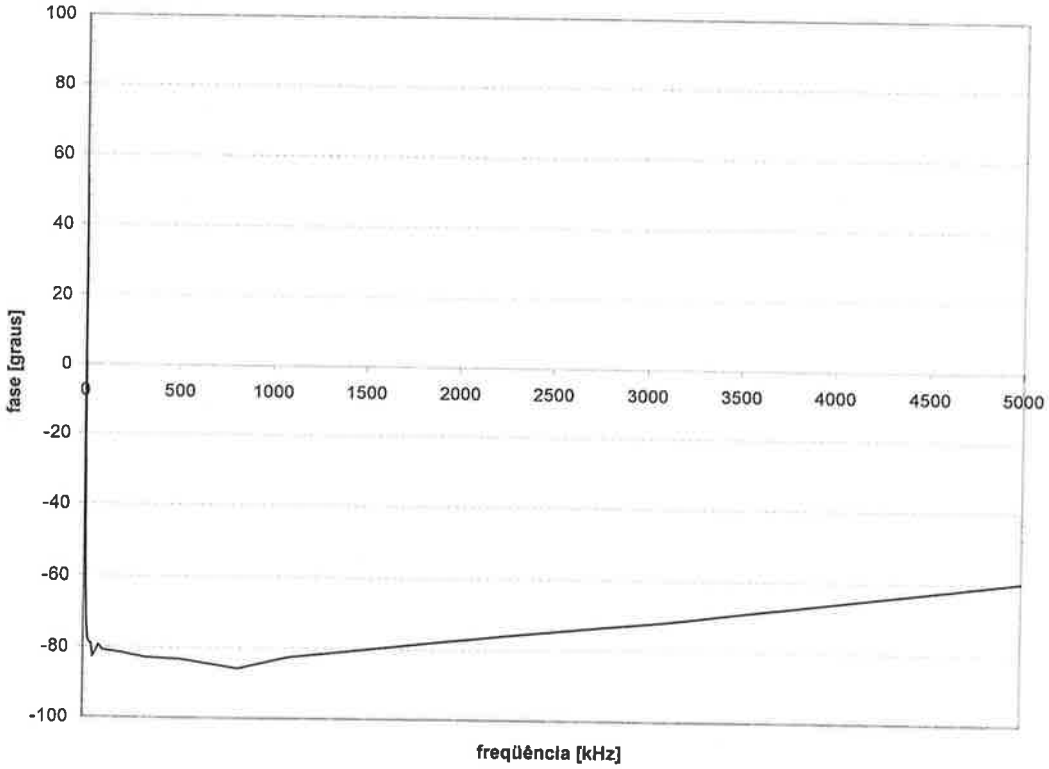


(a)

Fig. 3.6: Impedância de entrada de televisor (TV3). (a) Módulo (b) Fase

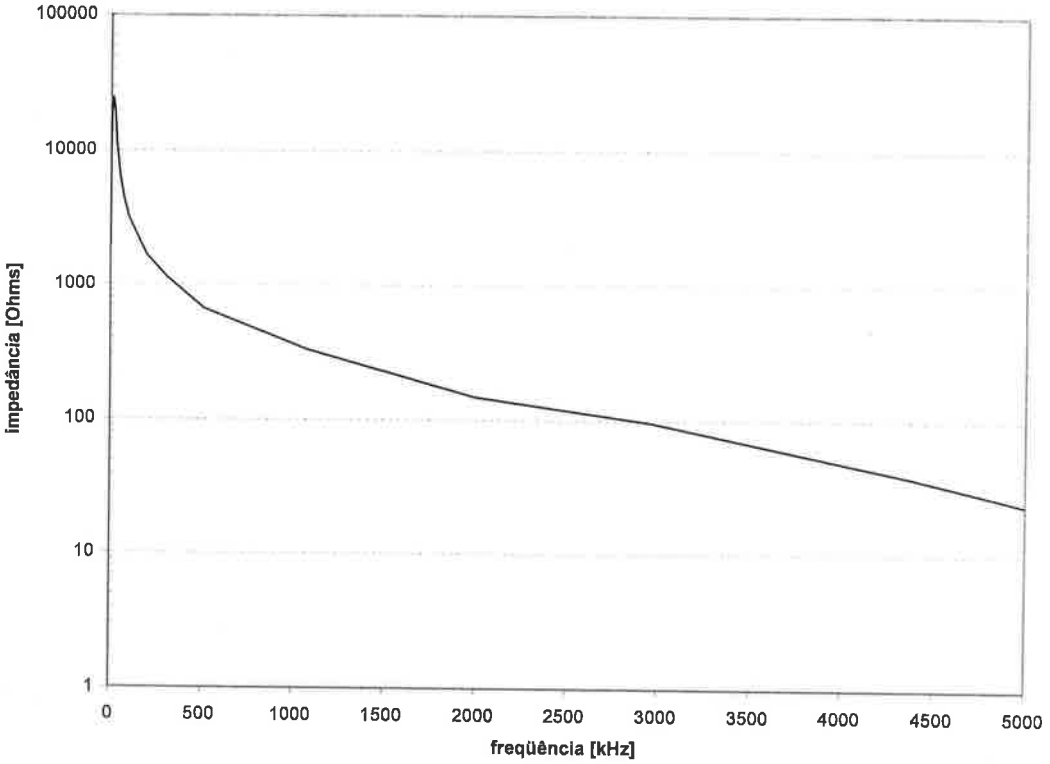


(a)

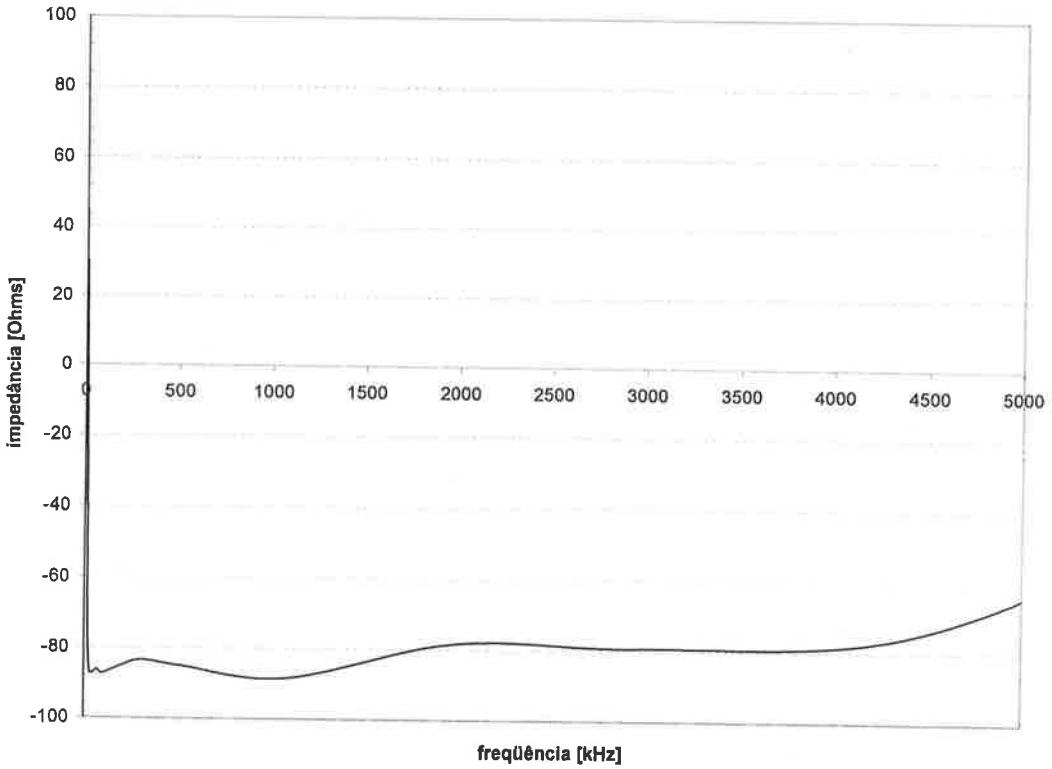


(b)

Fig. 3.7: Impedância de entrada de forno de microondas (MO1). (a) Módulo (b) Fase

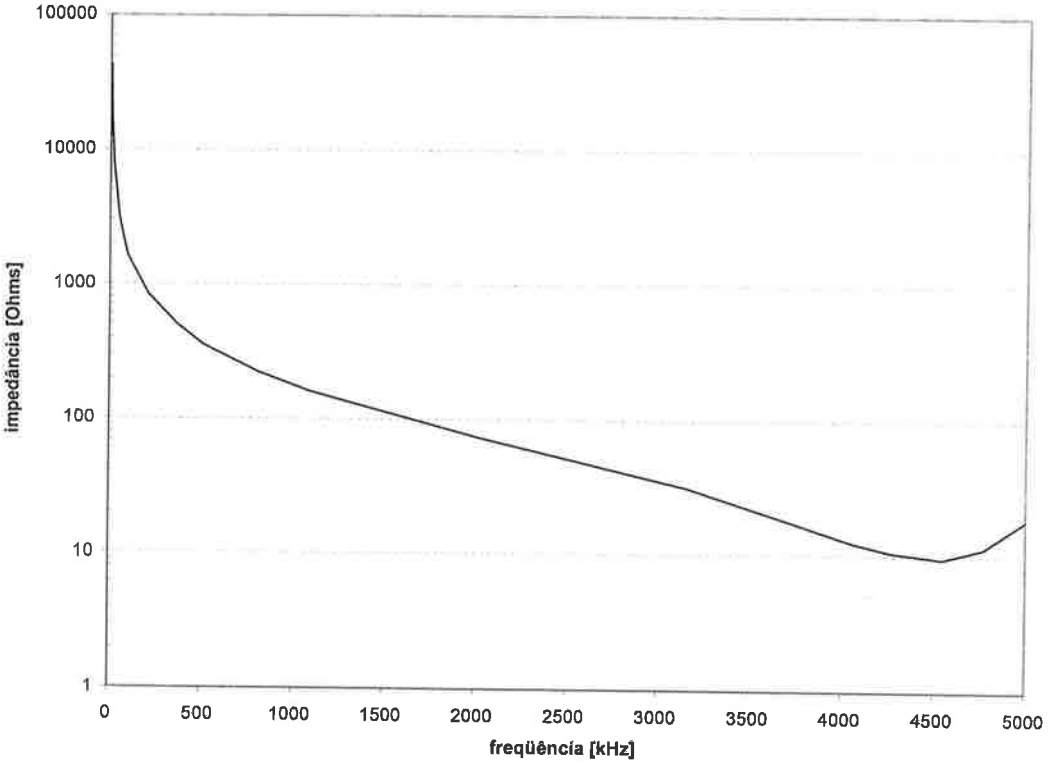


(a)

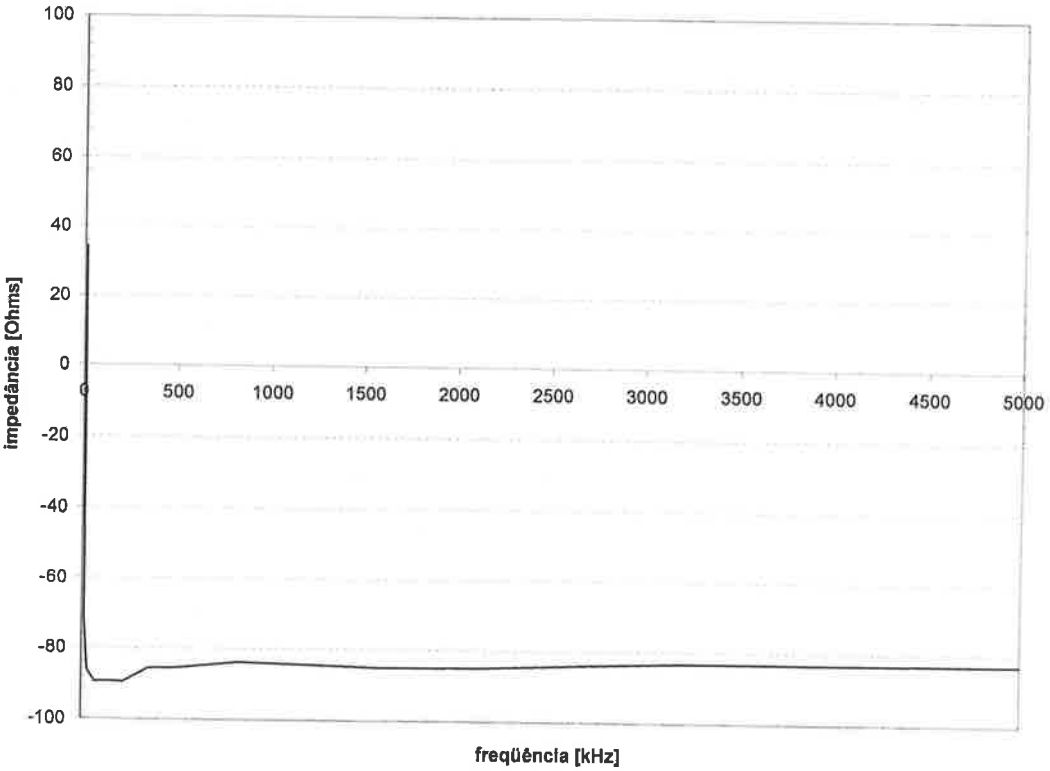


(b)

Fig. 3.8: Impedância de entrada de forno de microondas (MO2). (a) Módulo (b) Fase

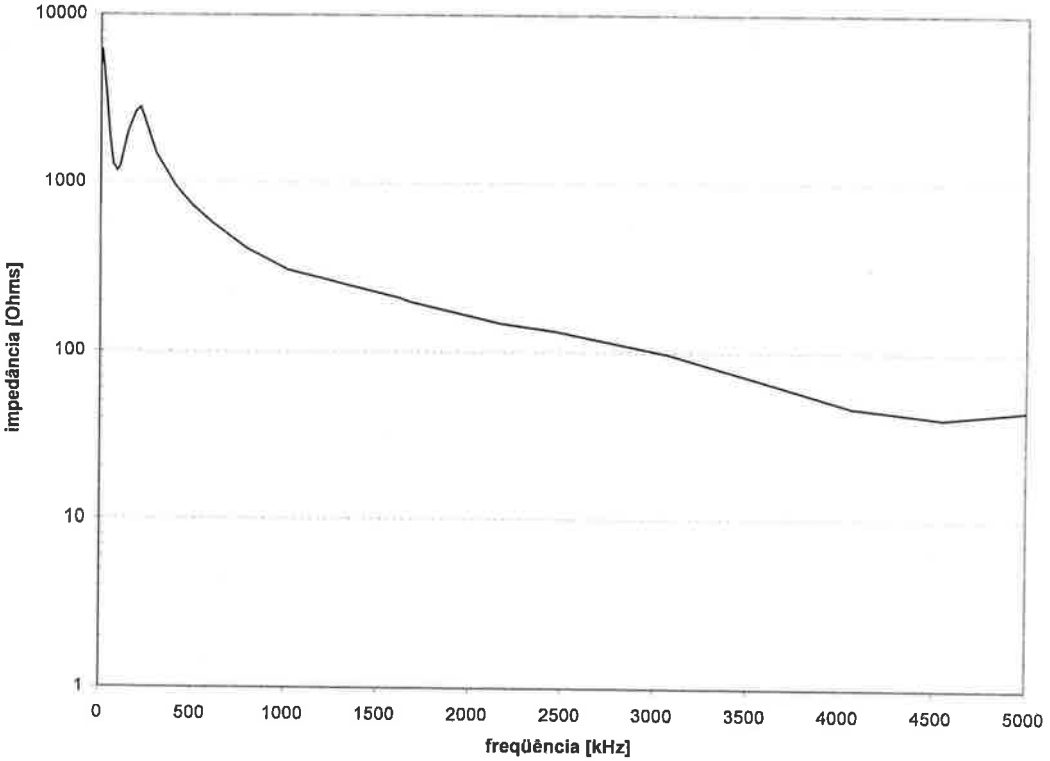


(a)

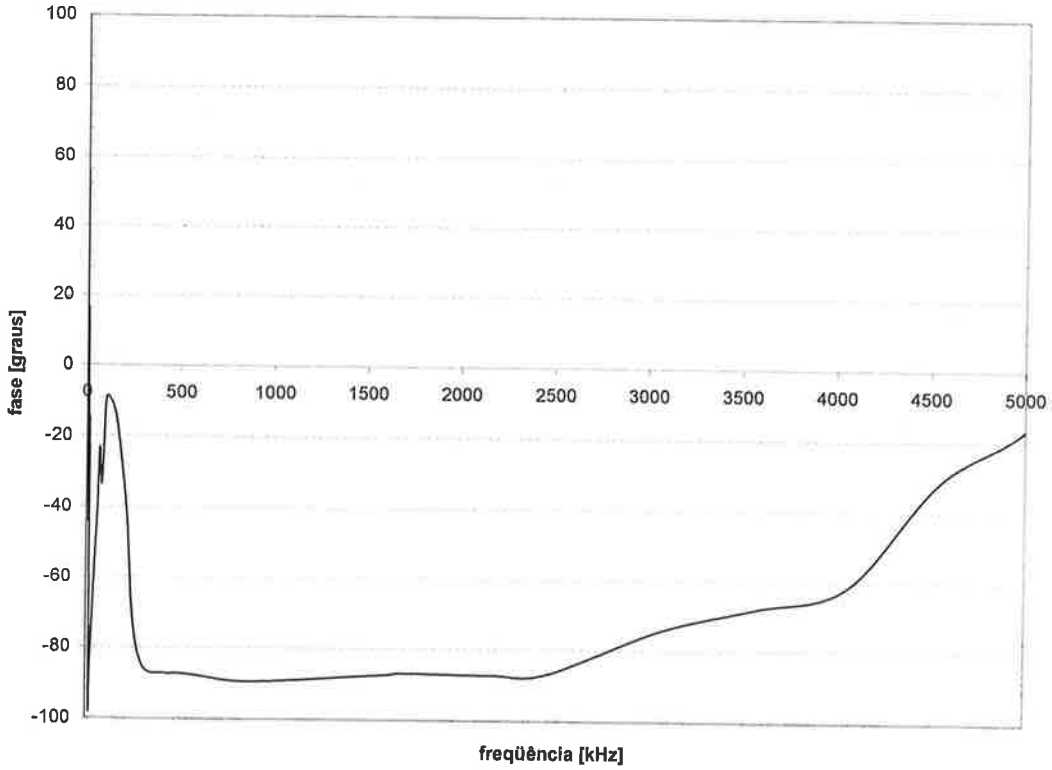


(b)

Fig. 3.9: Impedância de entrada de forno de microondas (MO3). (a) Módulo (b) Fase

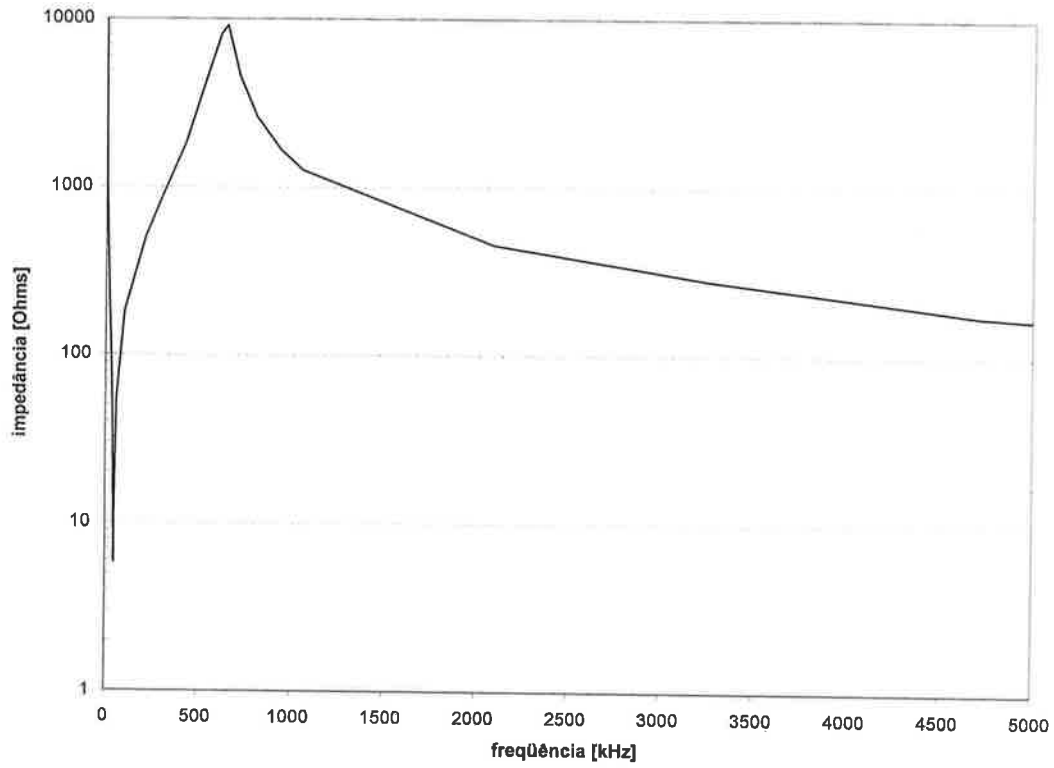


(a)

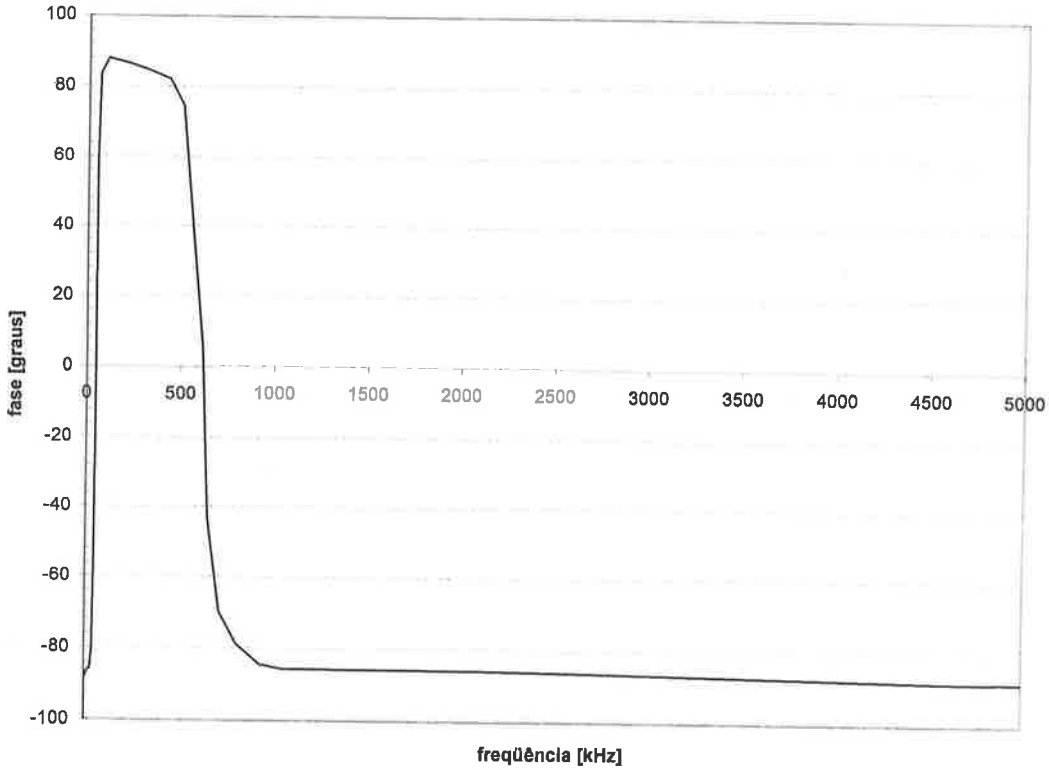


(b)

Fig. 3.10: Impedância de entrada de vídeo-cassete (VID1). (a) Módulo (b) Fase

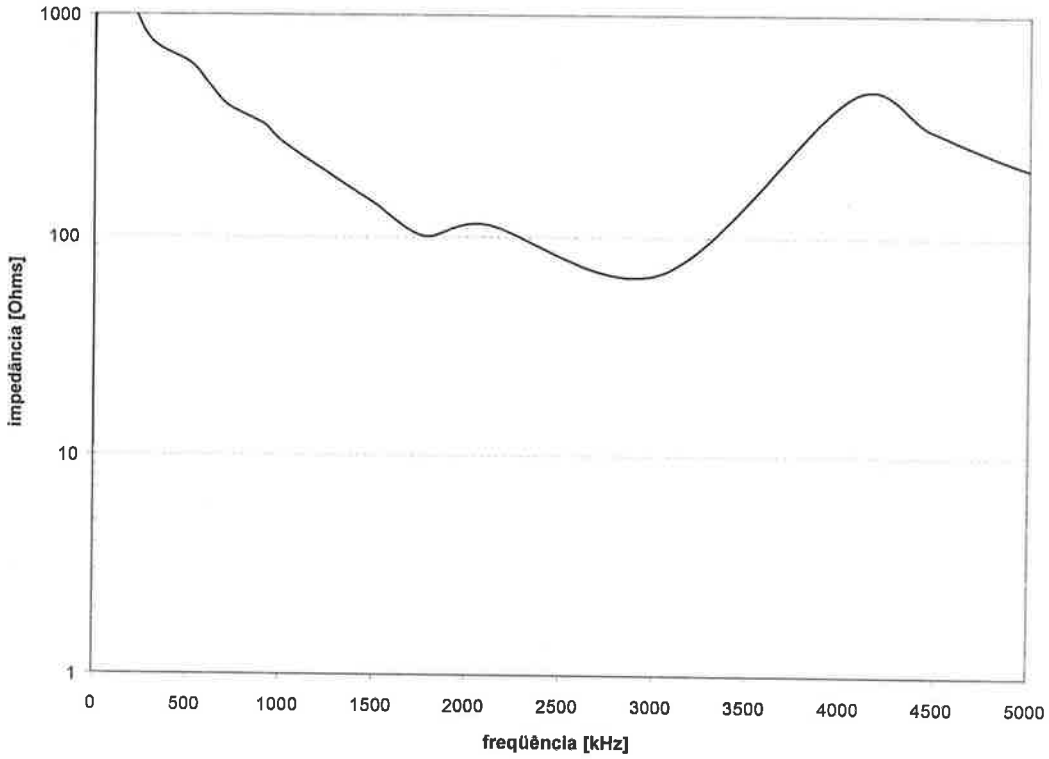


(a)

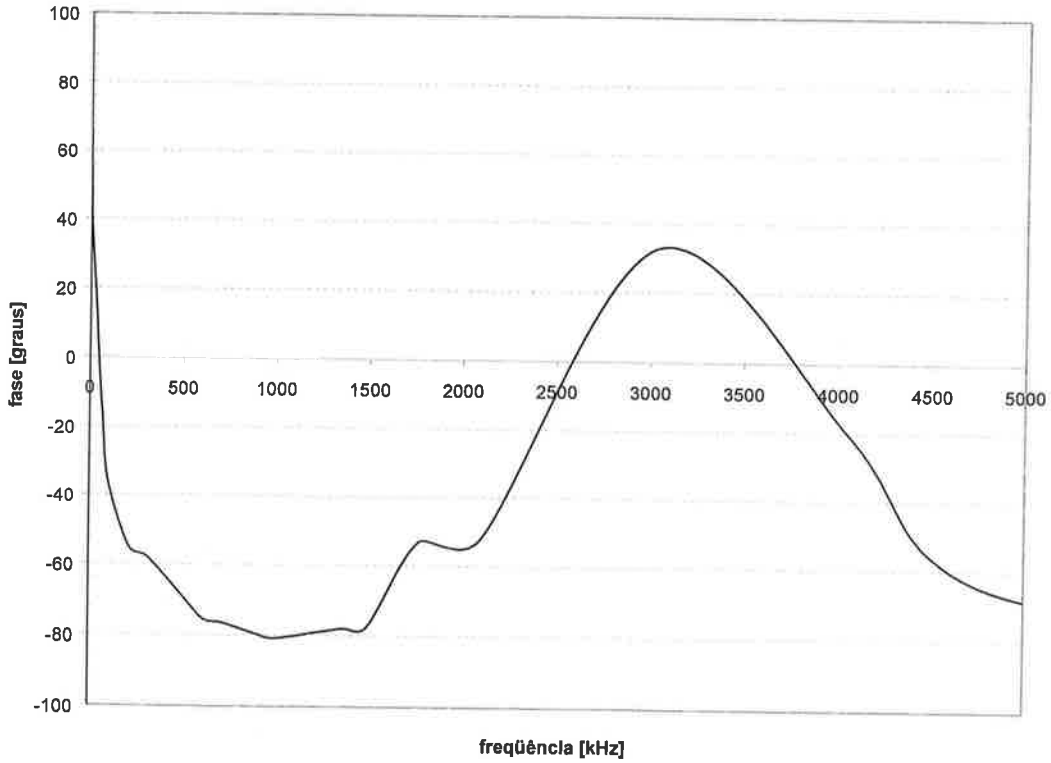


(b)

Fig. 3.11: Impedância de entrada de vídeo-cassete (VID2). (a) Módulo (b) Fase

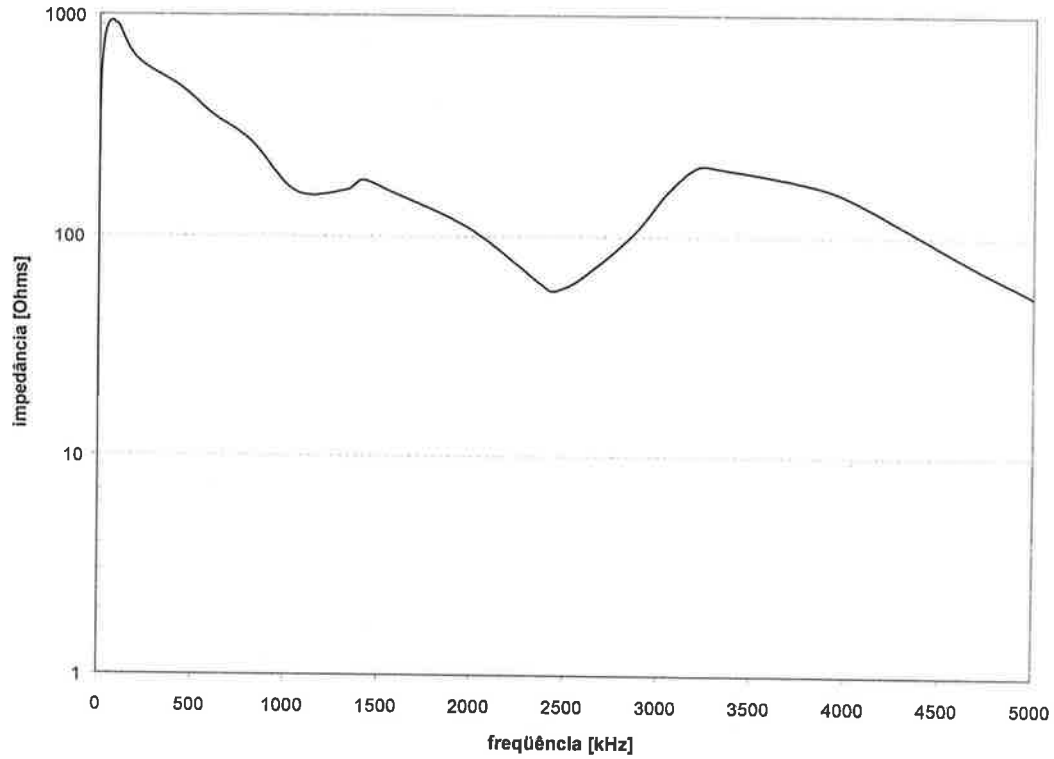


(a)



(b)

Fig. 3.12: Impedância de entrada de refrigerador (REF1). (a) Módulo (b) Fase



(a)

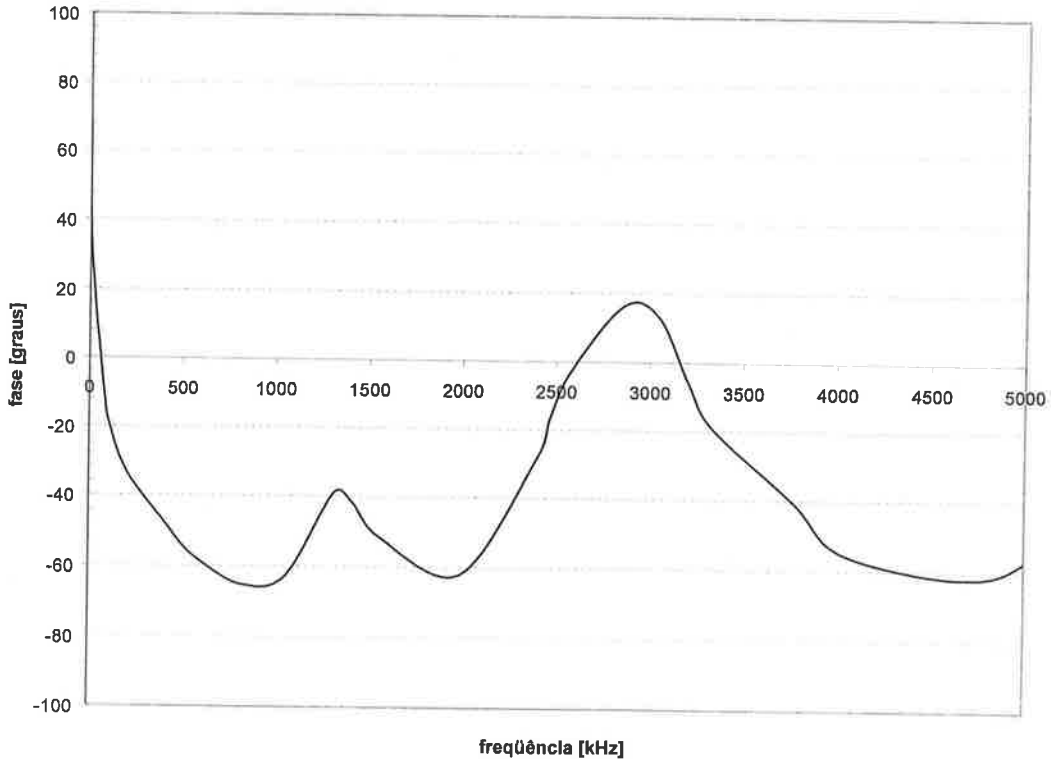
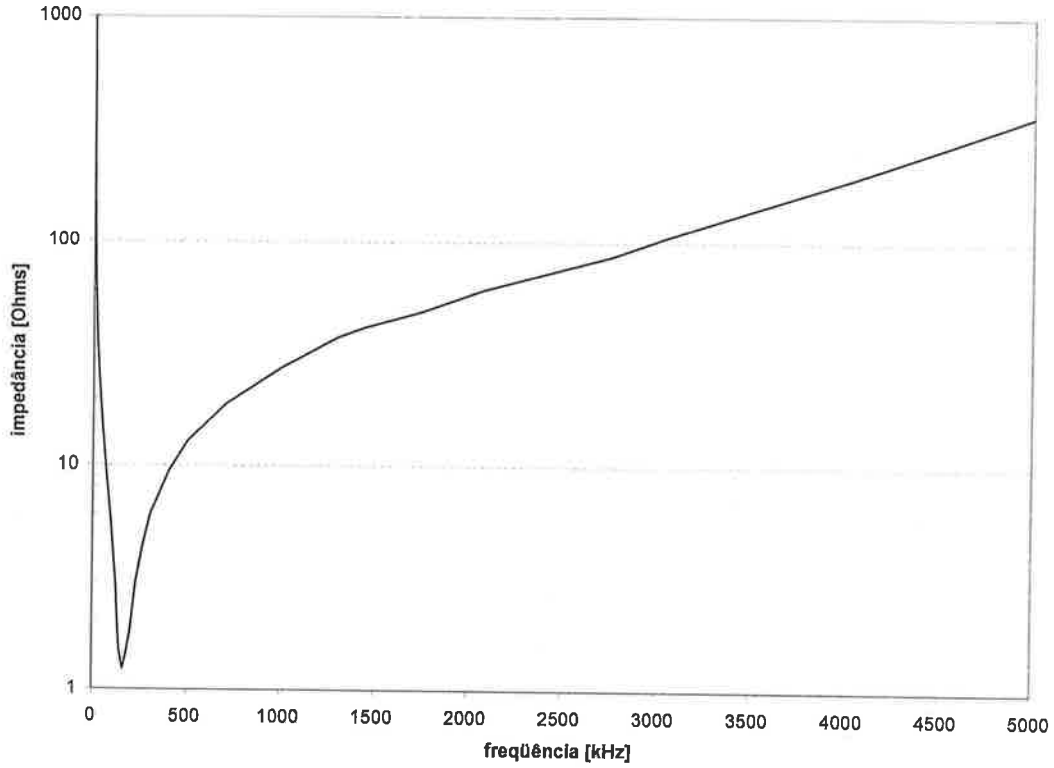
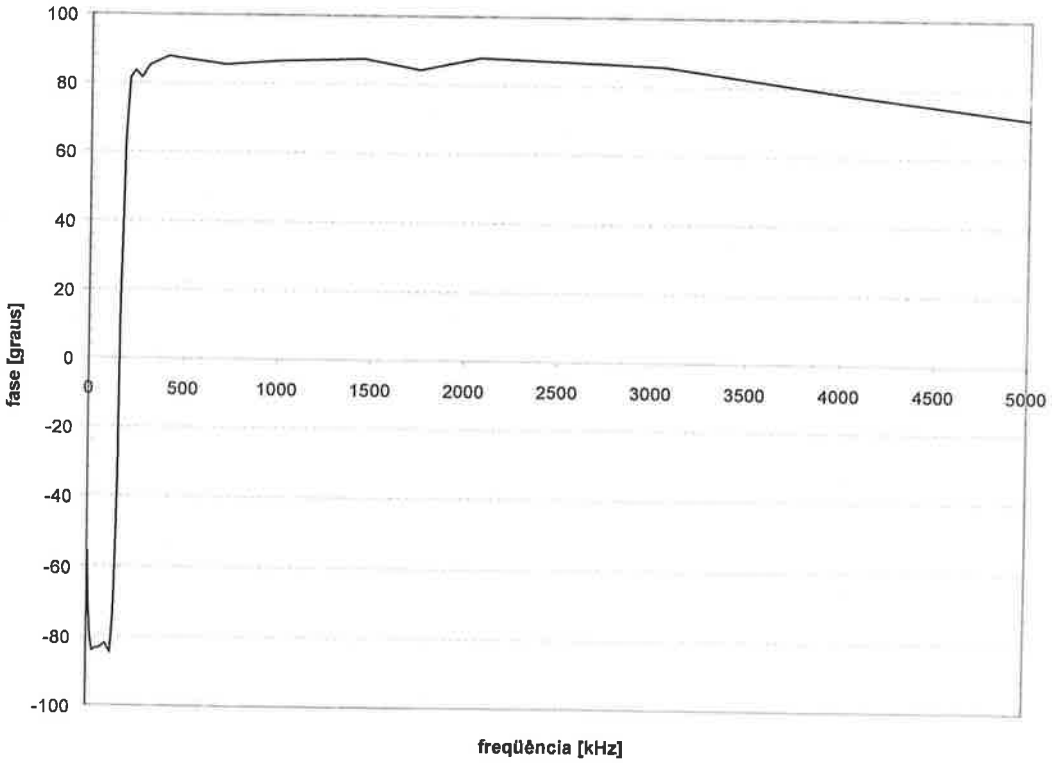


Fig. 3.13: Impedância de entrada de refrigerador (REF2). (a) Módulo (b) Fase

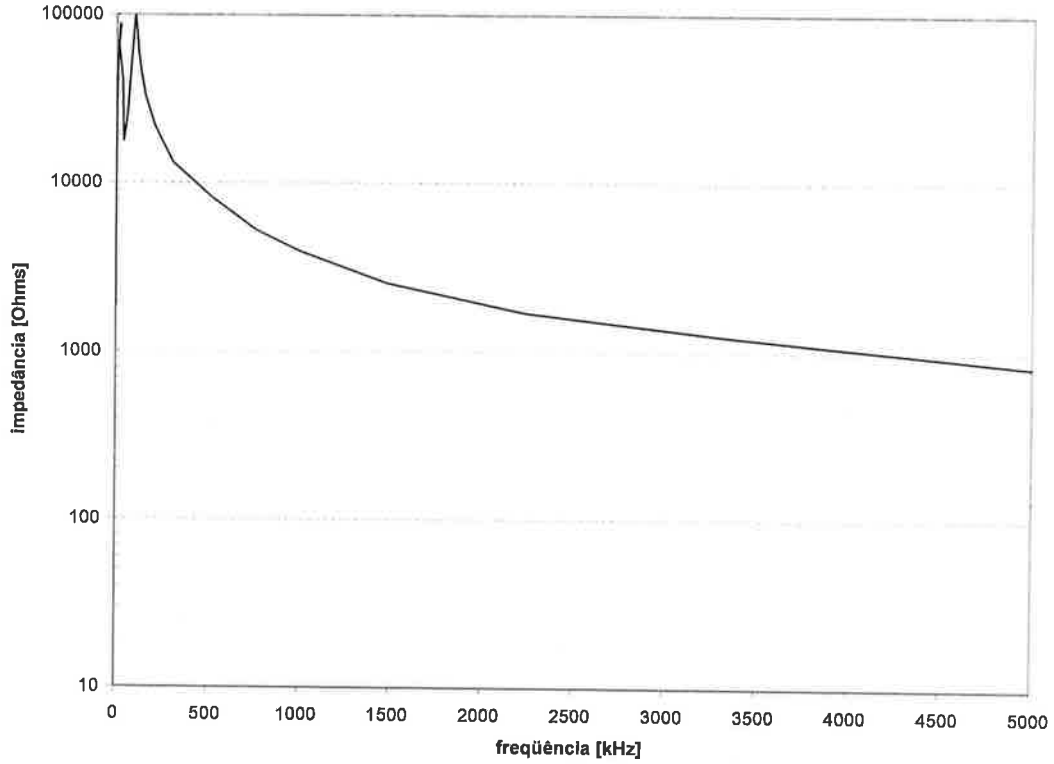


(a)

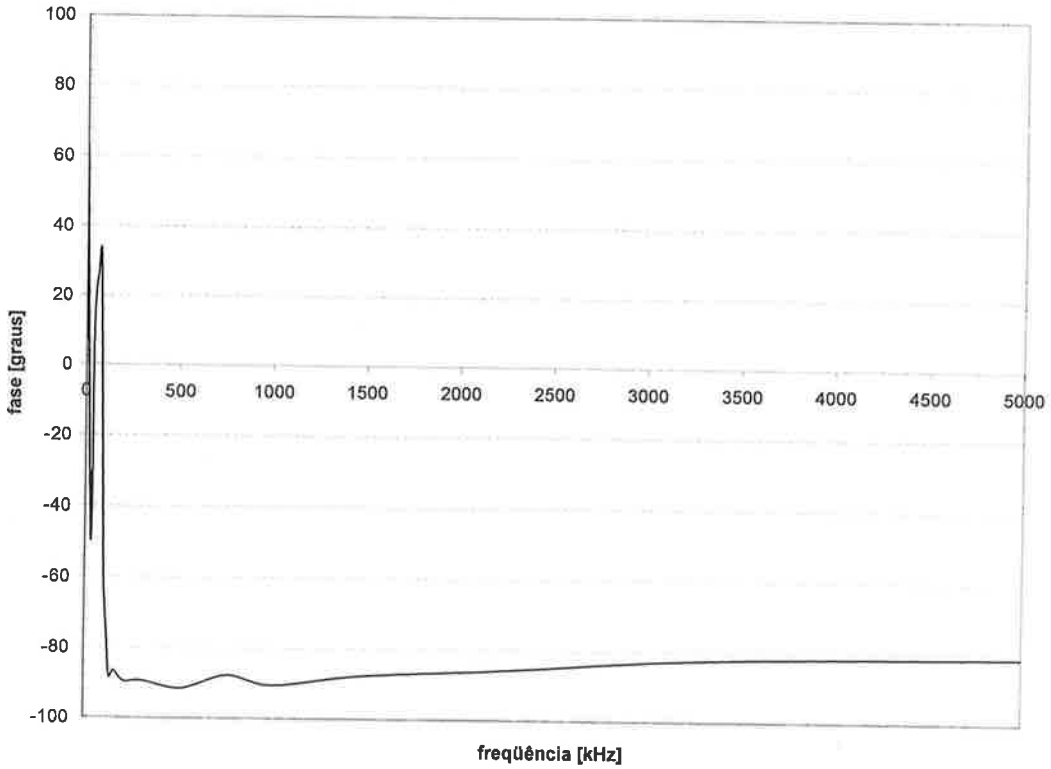


(b)

Fig. 3.14: Impedância de entrada de lava-roupas (ROU1). (a) Módulo (b) Fase

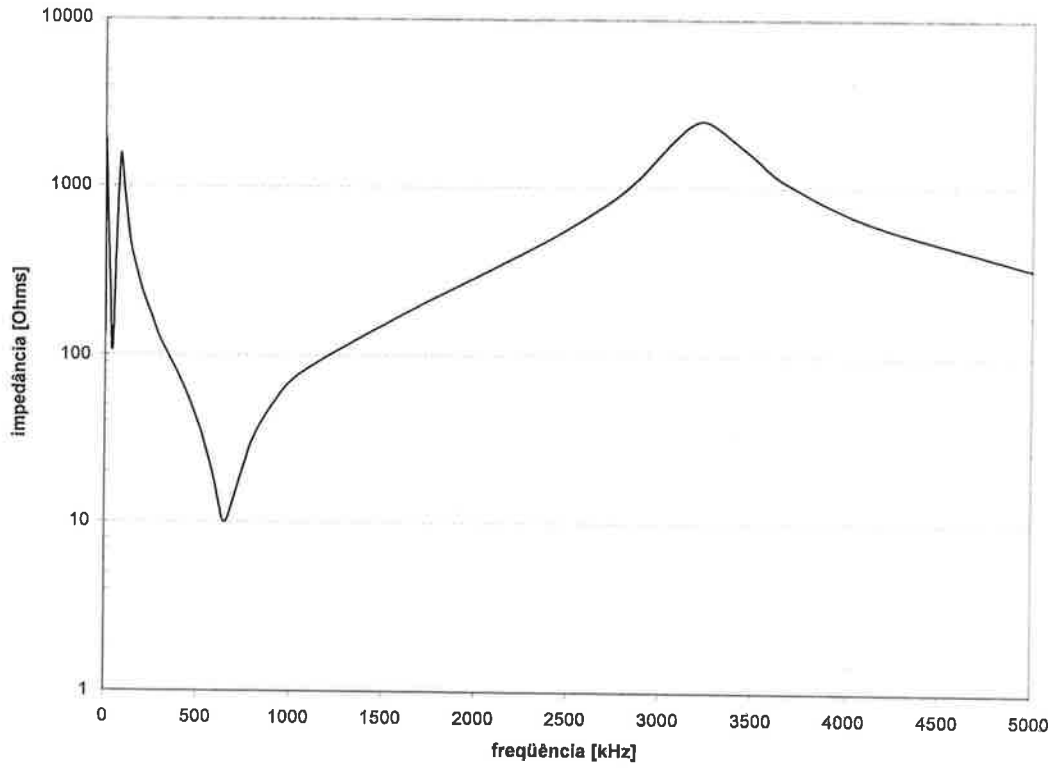


(a)

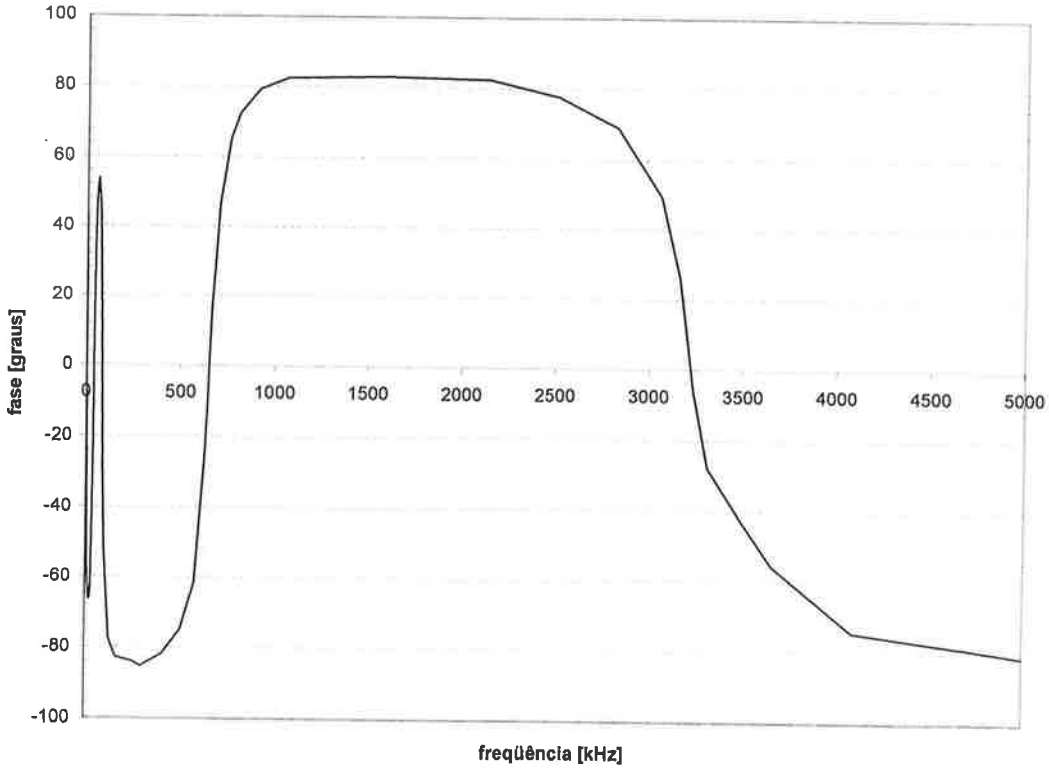


(b)

Fig. 3.15: Impedância de entrada de telefone sem fio (TEL1). (a) Módulo (b) Fase

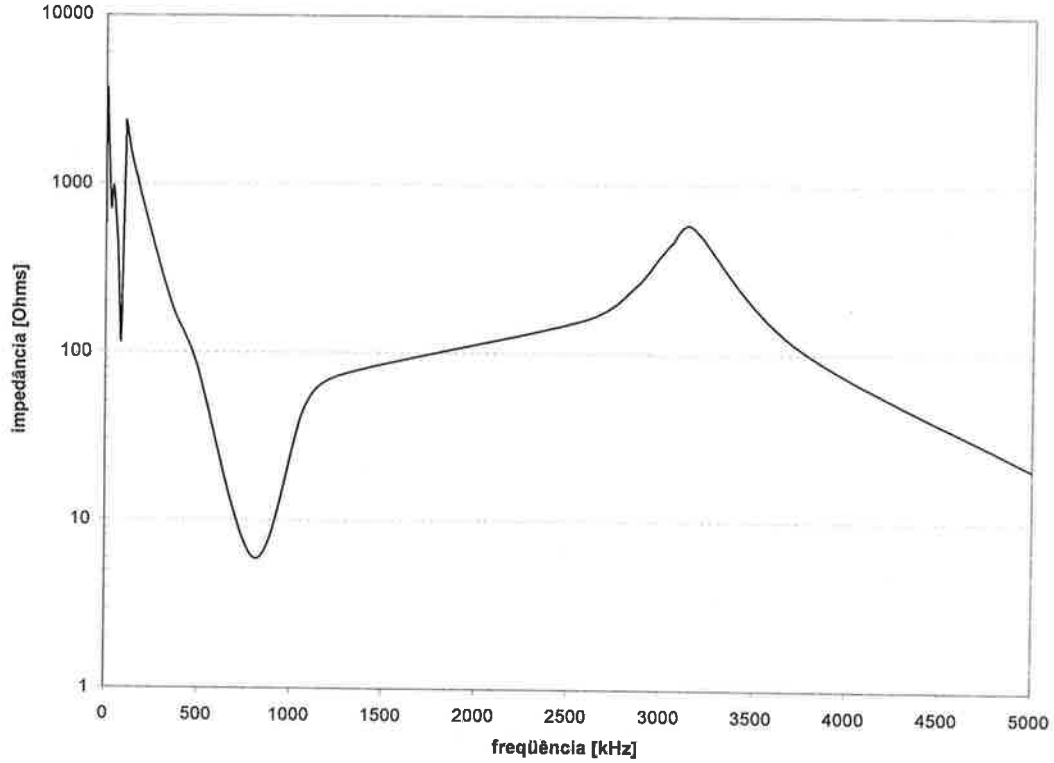


(a)

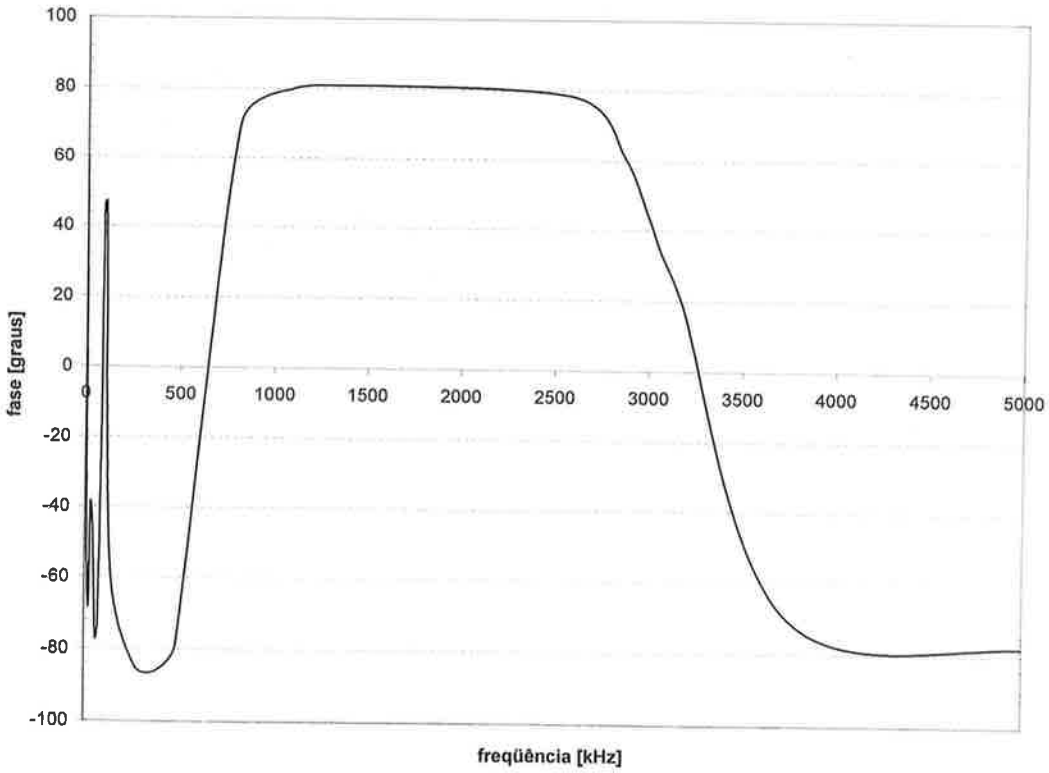


(b)

Fig. 3.16: Impedância de entrada de conjunto de som (SOM1). (a) Módulo (b) Fase

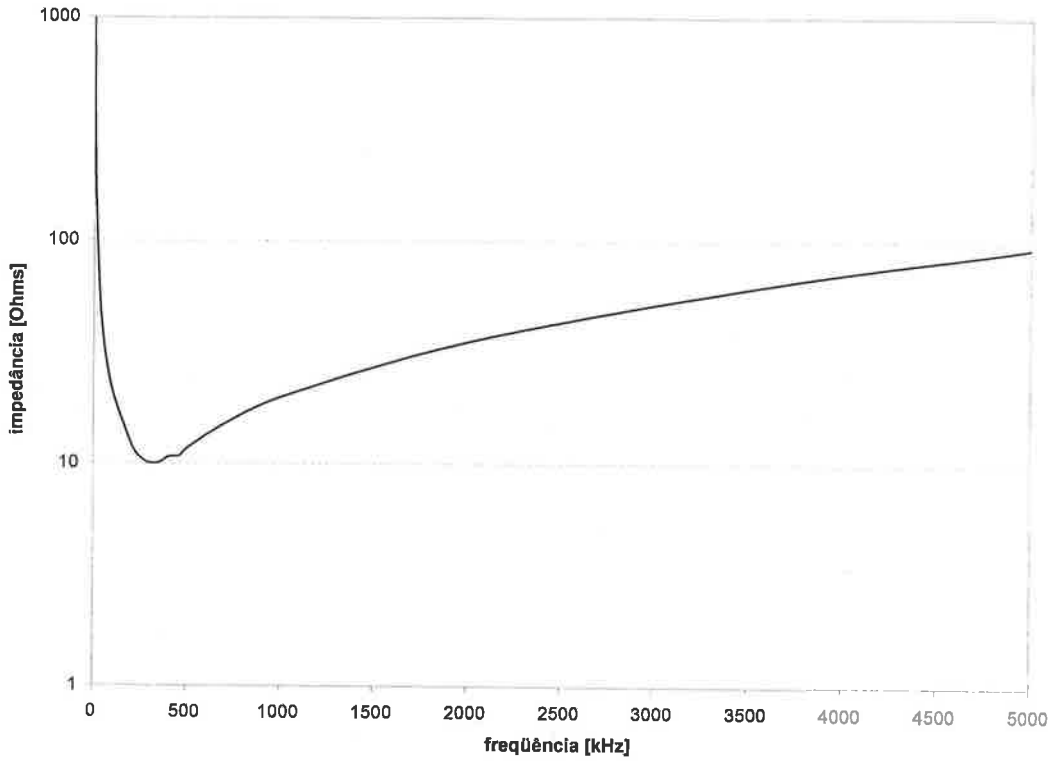


(a)

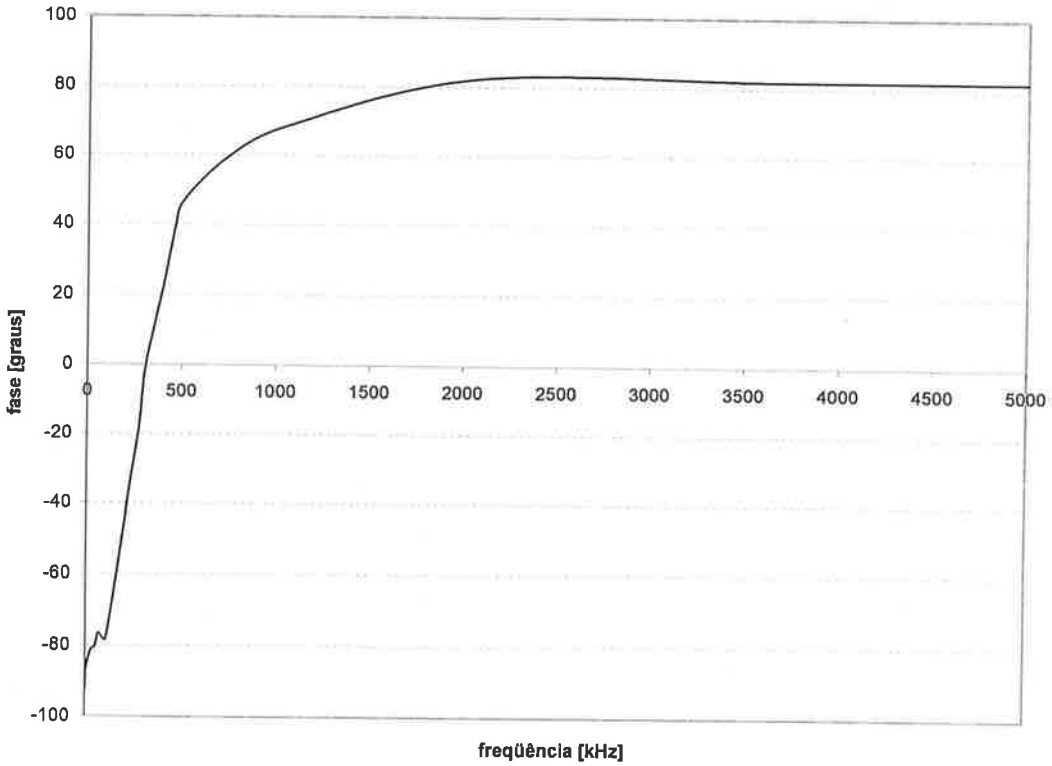


(b)

Fig. 3.17: Impedância de entrada de conjunto de som (SOM2). (a) Módulo (b) Fase

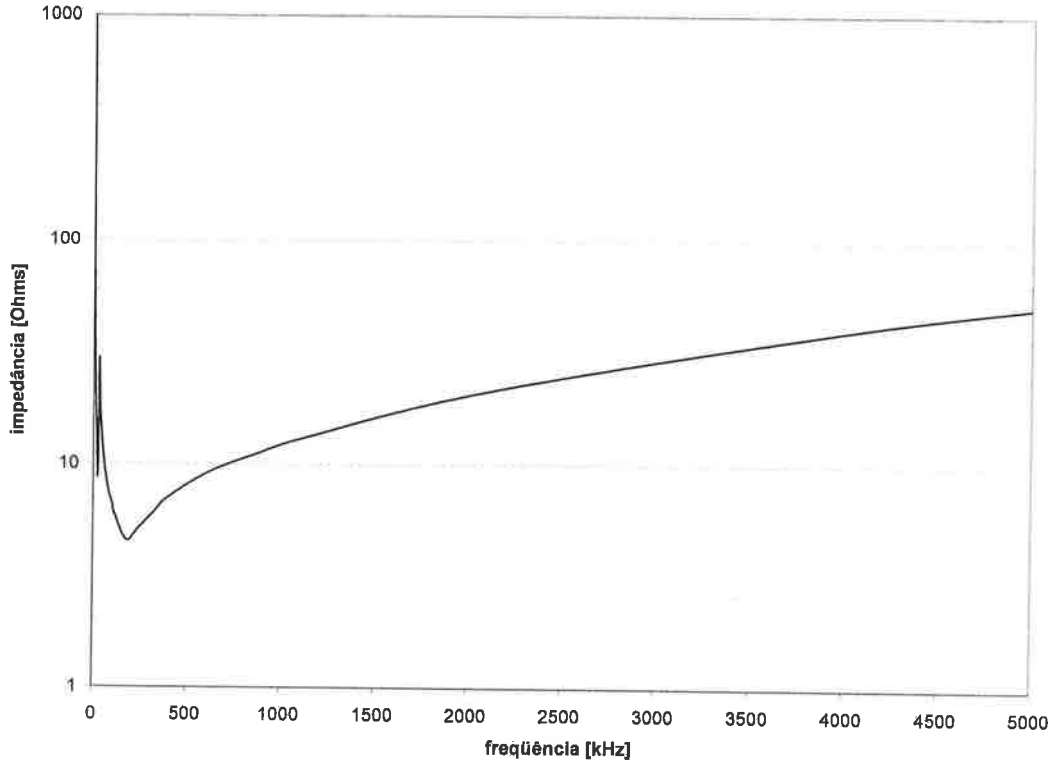


(a)

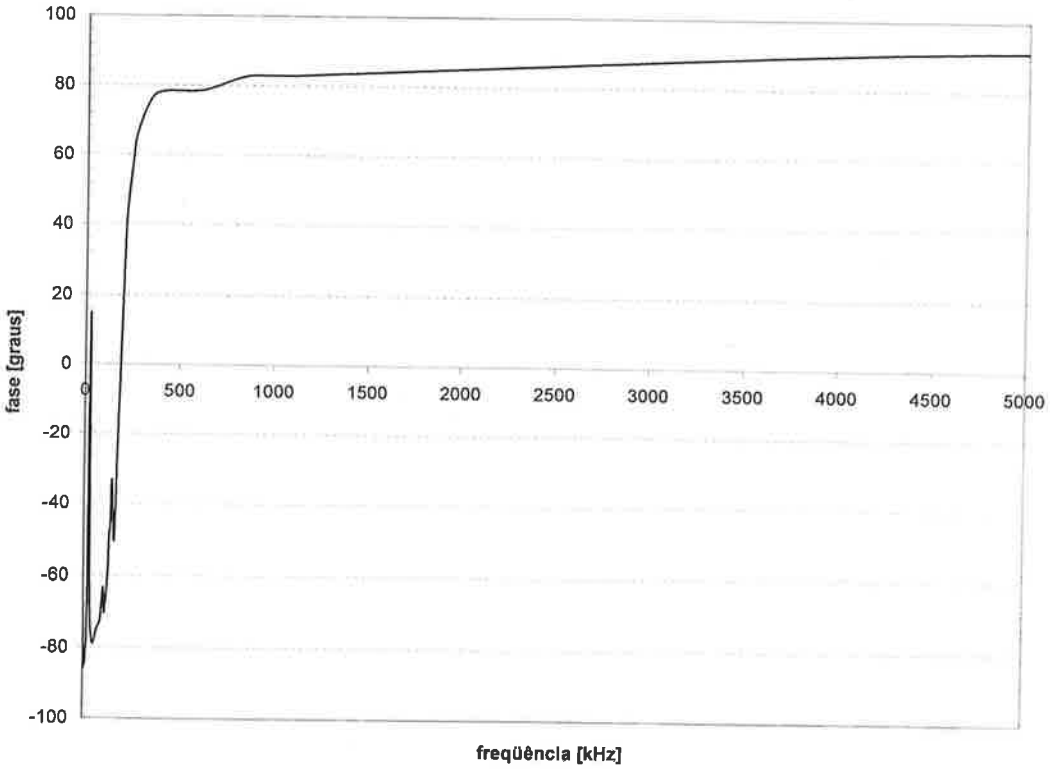


(b)

Fig. 3.18: Impedância de entrada de microcomputador (PC1). (a) Módulo (b) Fase

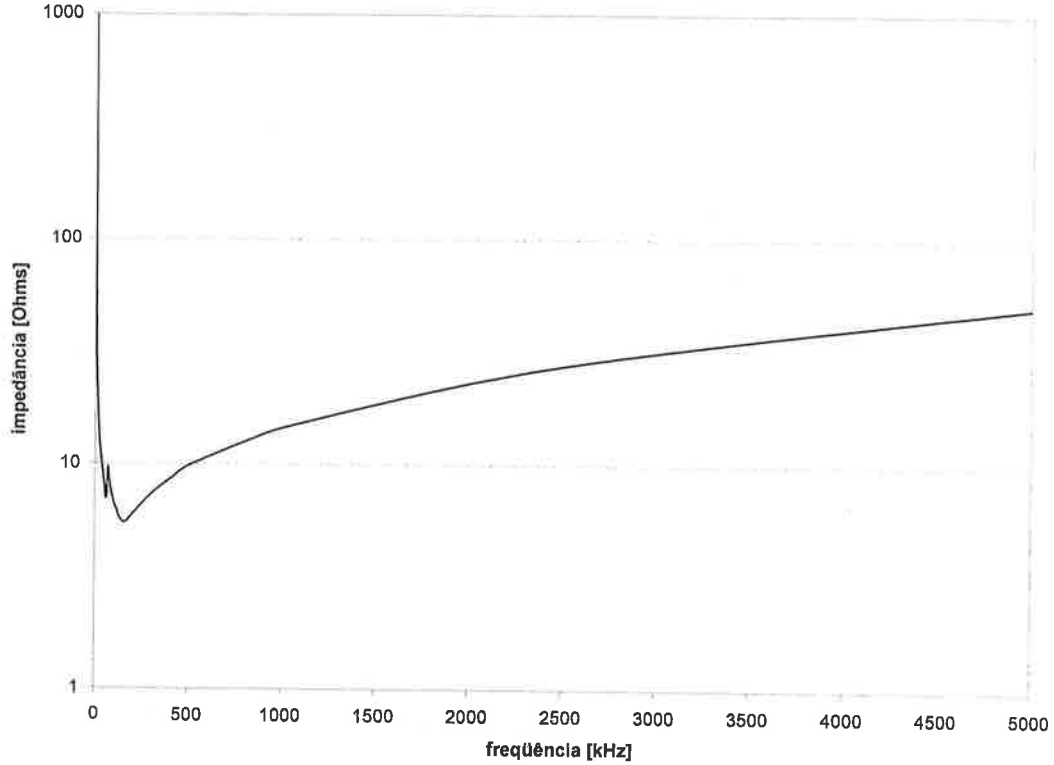


(a)

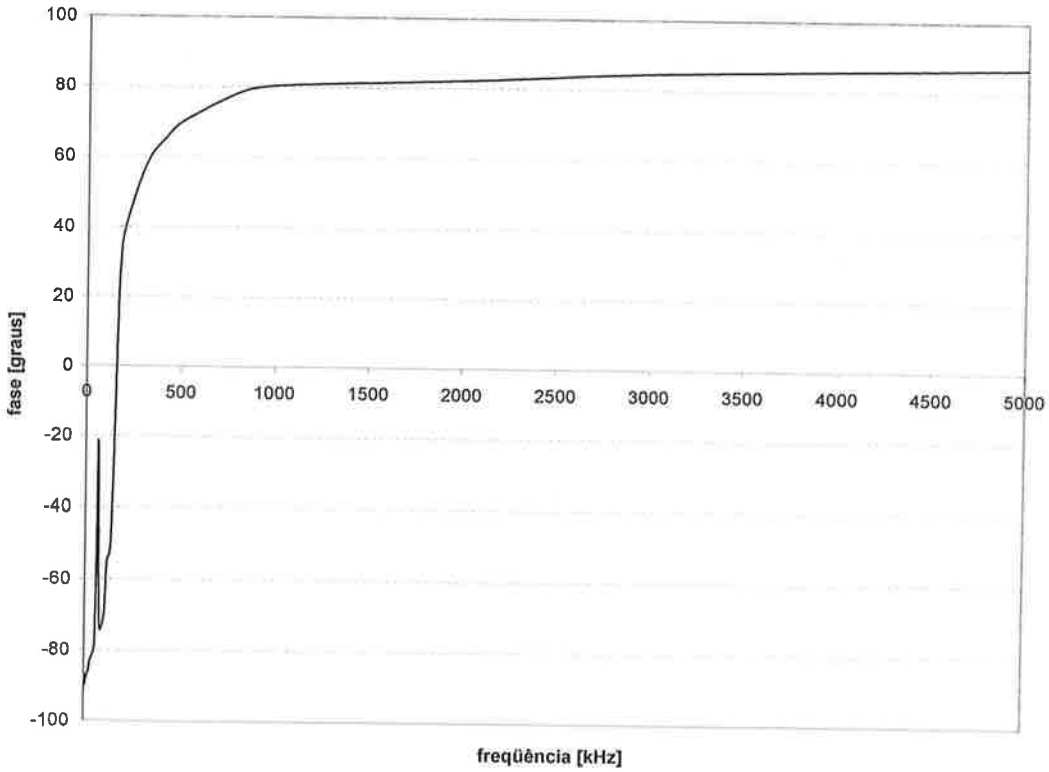


(b)

Fig. 3.19: Impedância de entrada de microcomputador (PC2). (a) Módulo (b) Fase

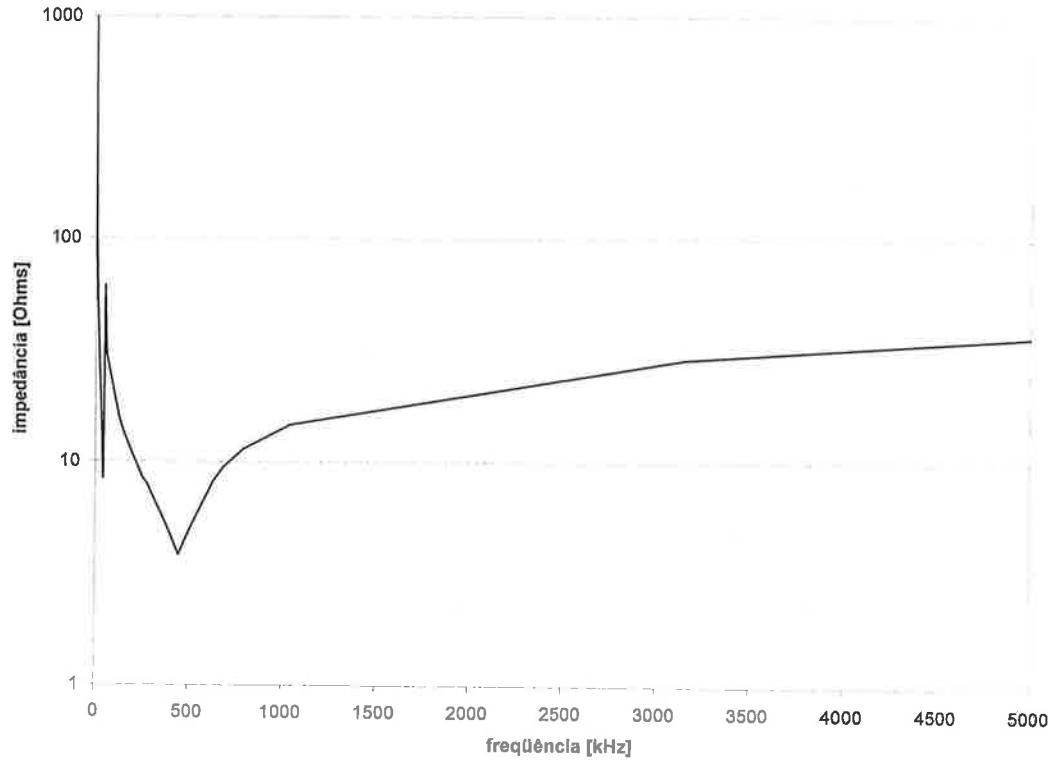


(a)

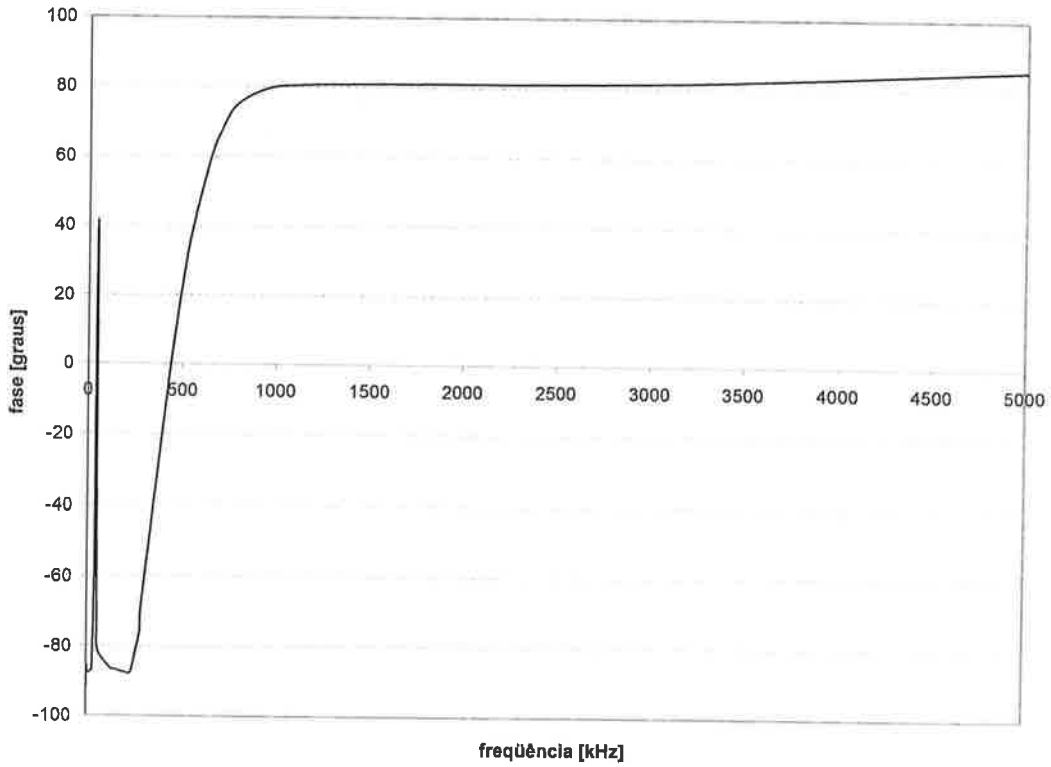


(b)

Fig. 3.20: Impedância de entrada de microcomputador (PC3). (a) Módulo (b) Fase

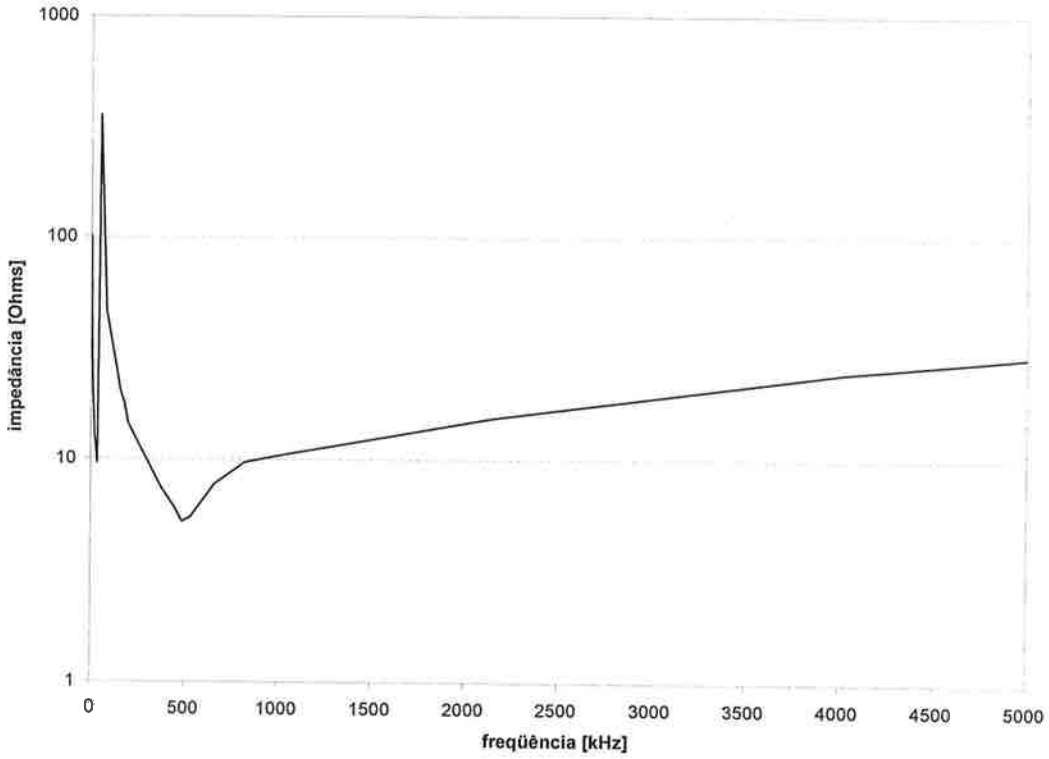


(a)

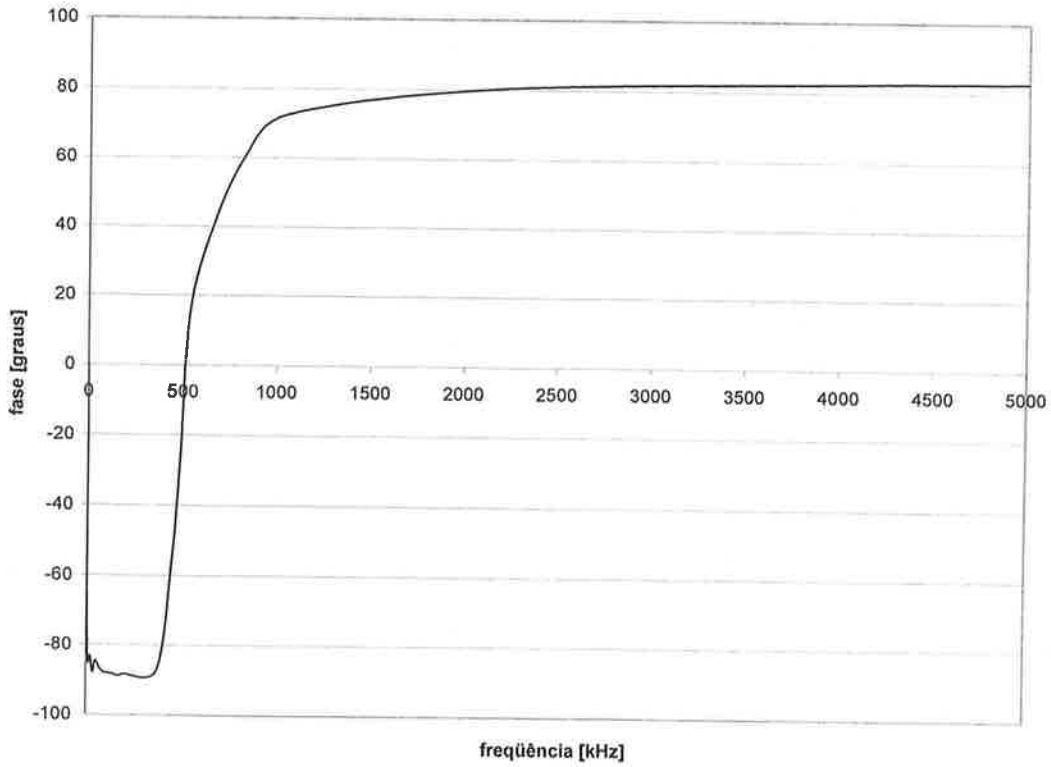


(b)

Fig. 3.21: Impedância de entrada de monitor de vídeo (MON1). (a) Módulo (b) Fase

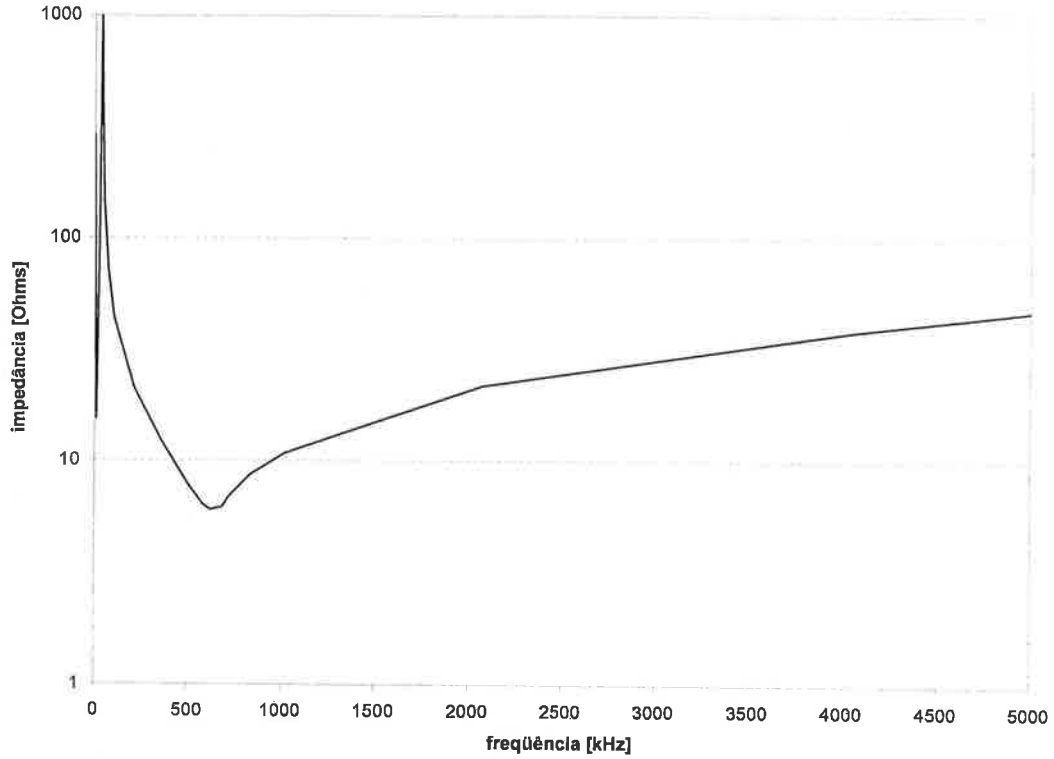


(a)

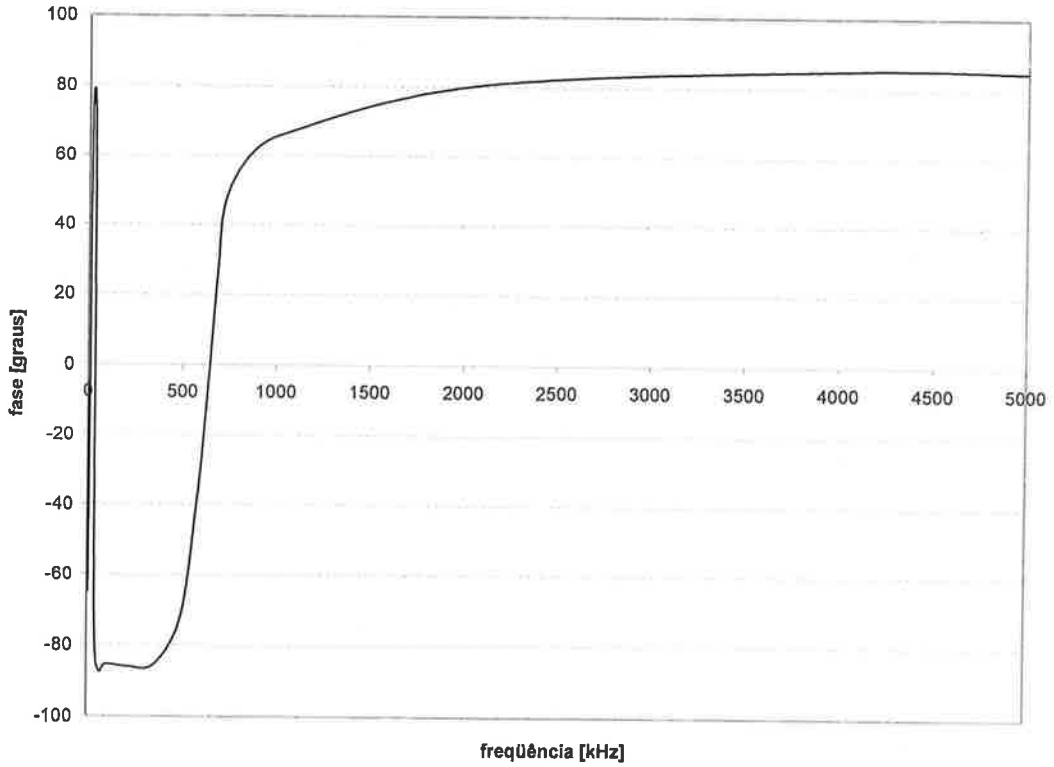


(b)

Fig. 3.22: Impedância de entrada de monitor de vídeo (MON2). (a) Módulo (b) Fase



(a)



(b)

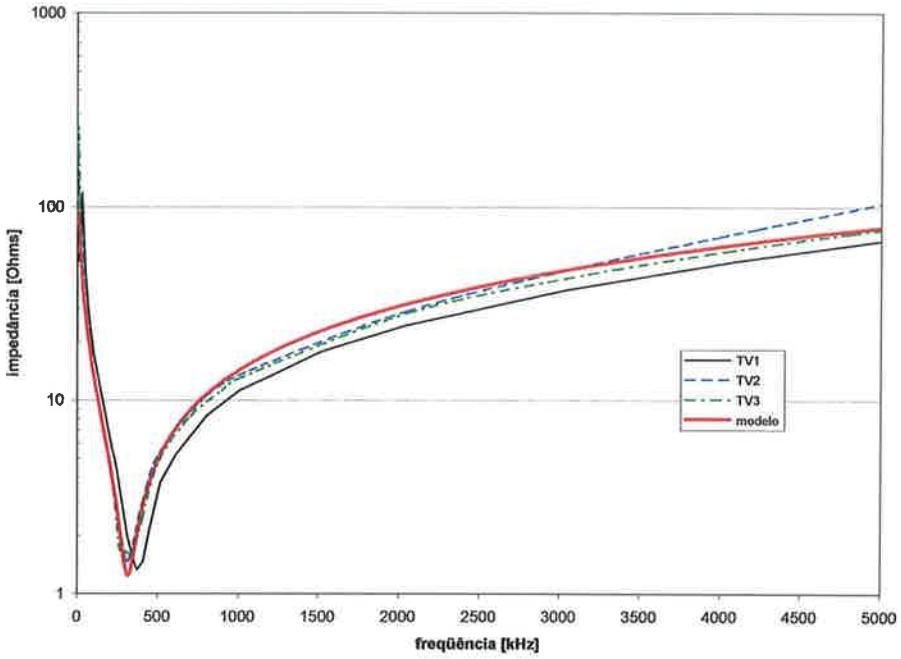
Fig. 3.23: Impedância de entrada de monitor de vídeo (MON3). (a) Módulo (b) Fase

3.1.3 Modelos de impedância de entrada dos equipamentos

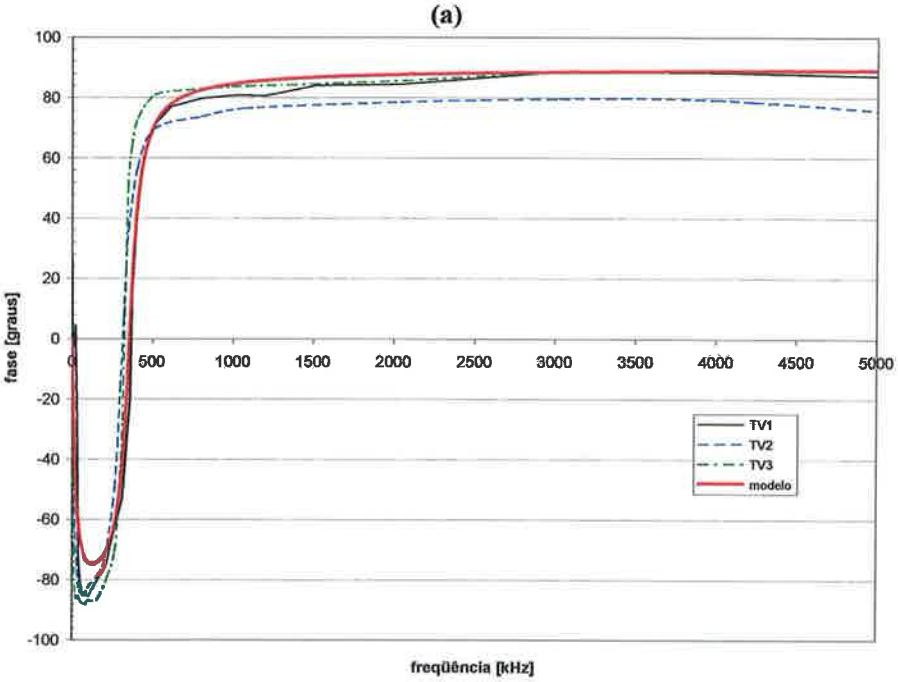
Com base nas medições apresentadas no item 3.1.2 foram sintetizados circuitos RLC que reproduzissem razoavelmente as curvas de impedância de entrada em função da freqüência para cada um dos equipamentos eletro-eletrônicos avaliados.

Os equipamentos foram agrupados, de modo que no caso de haver mais de um equipamento de mesma categoria procurou-se ajustar um circuito representativo do comportamento geral do grupo.

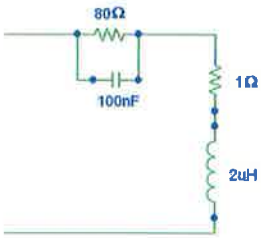
As Figuras 3.24 a 3.32 apresentam as curvas de módulo e fase da impedância de entrada dos grupos de equipamentos bem como os modelos sugeridos para sua representação.



(a)

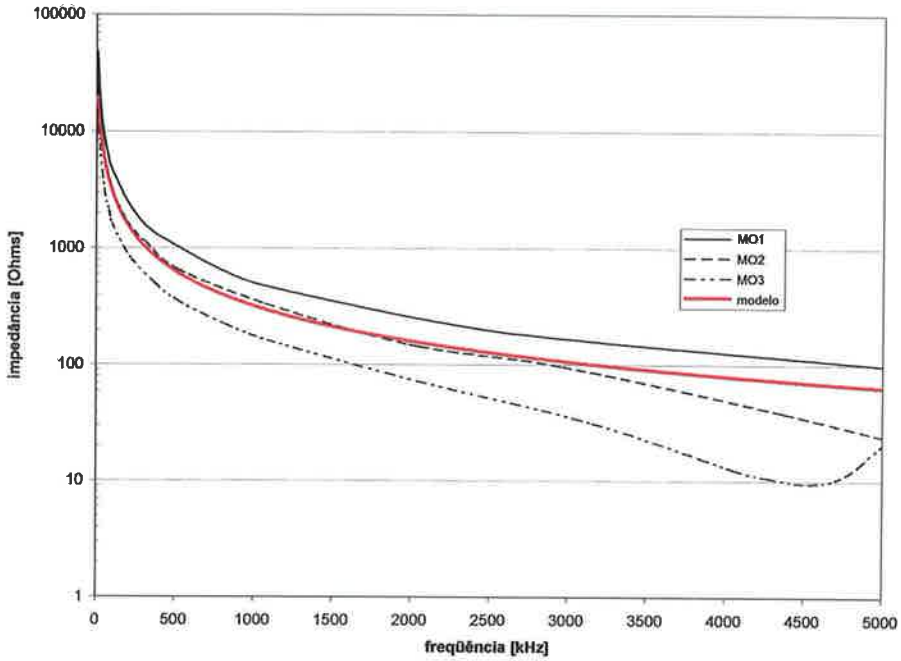


(b)

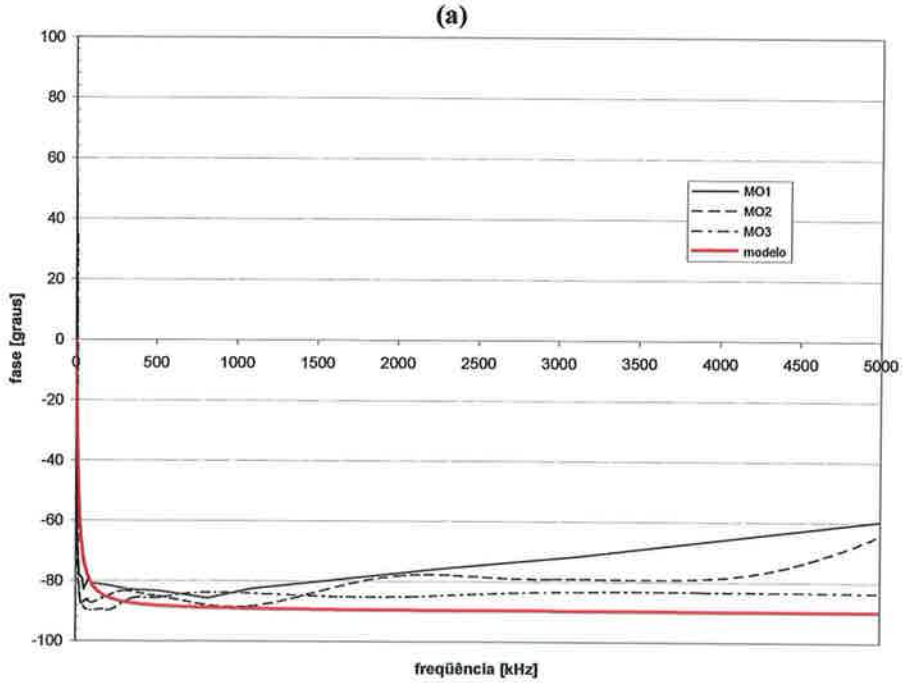


(c)

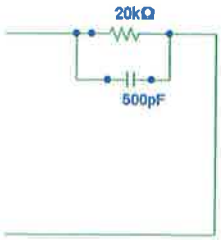
Fig. 3.24: Curvas de impedância de entrada do grupo televisor **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

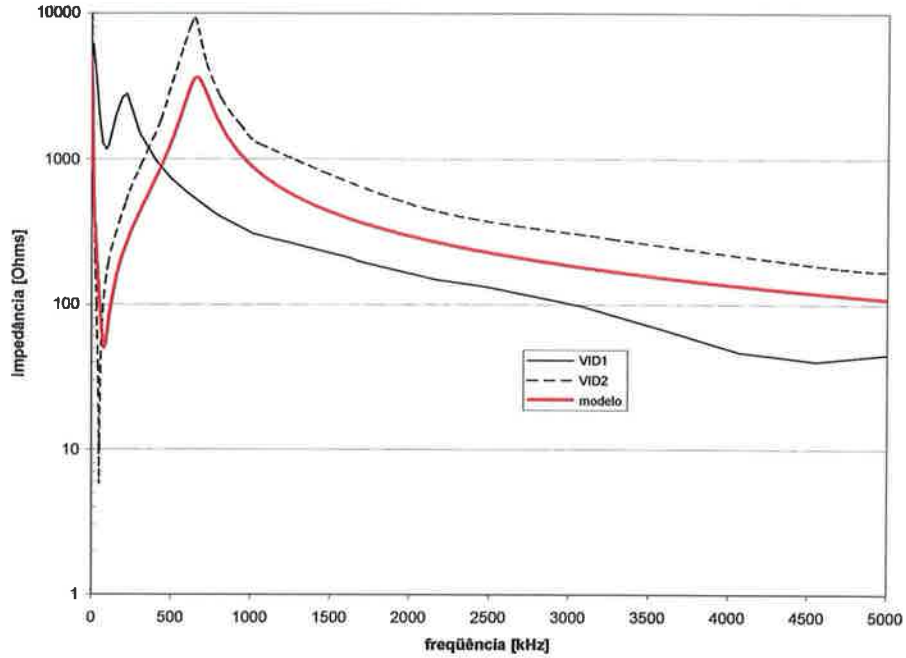


(b)

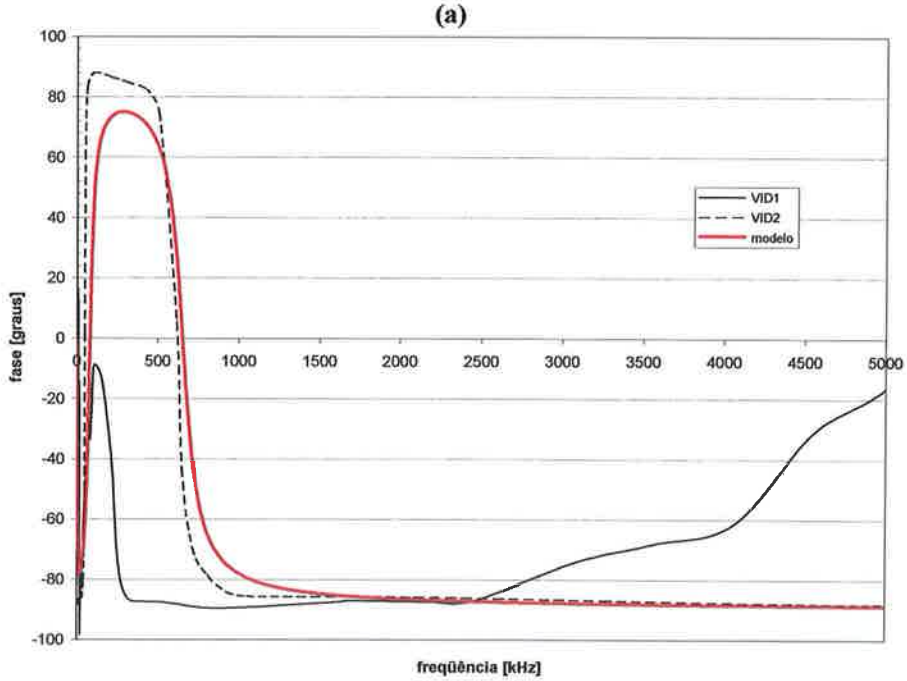


(c)

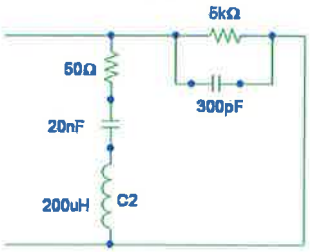
Fig. 3.25: Curvas de impedância de entrada do grupo forno de microondas **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

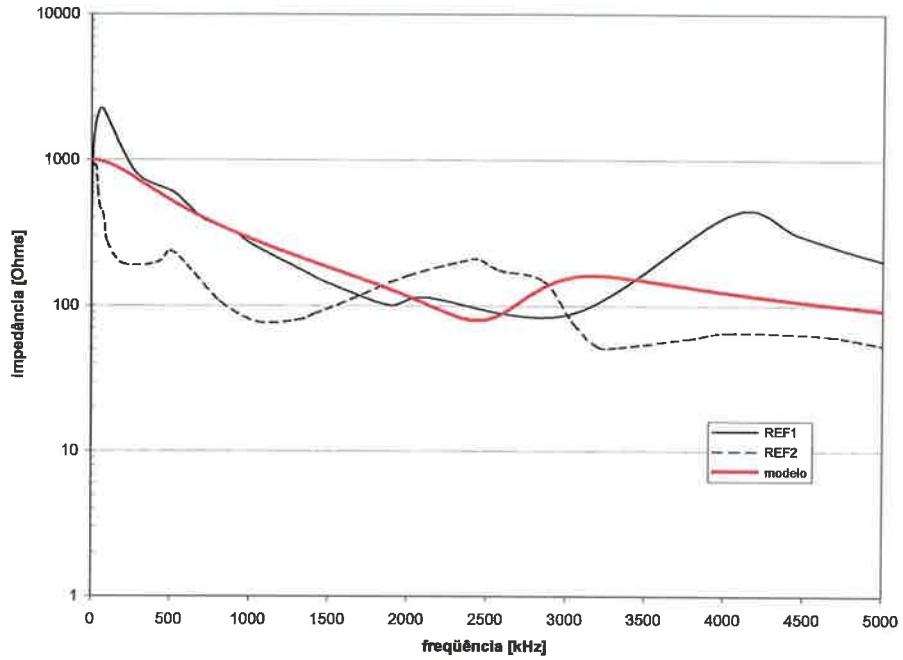


(b)

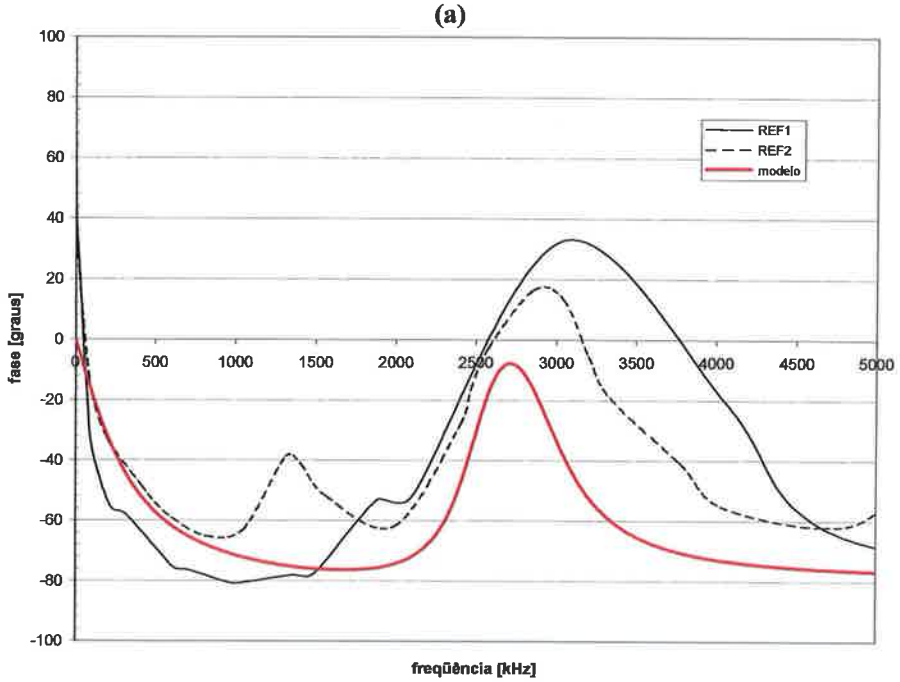


(c)

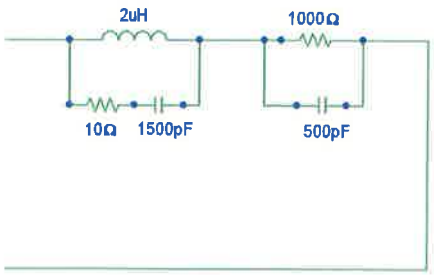
Fig. 3.26: Curvas de impedância de entrada do grupo videocassete **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

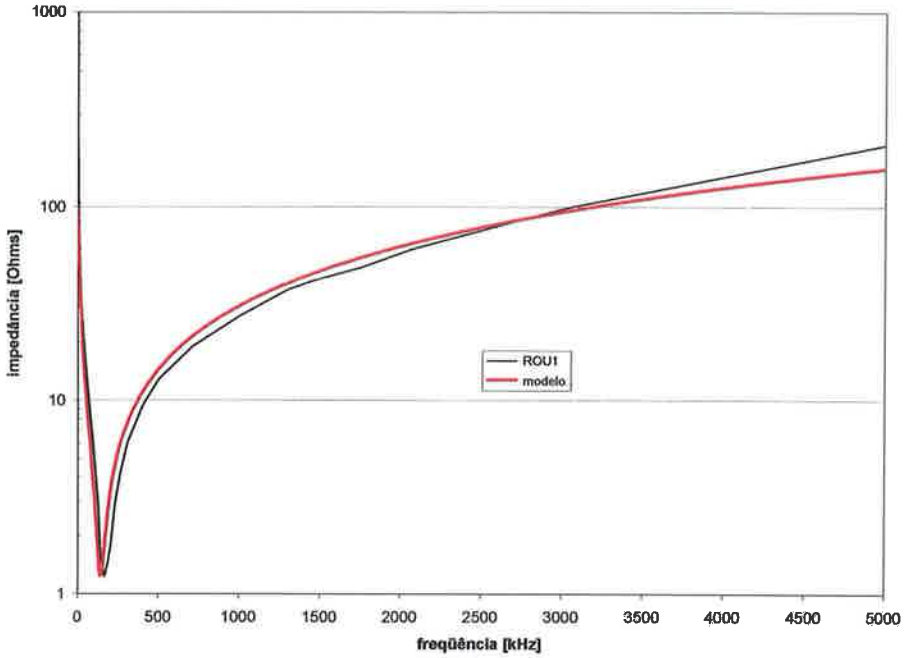


(b)

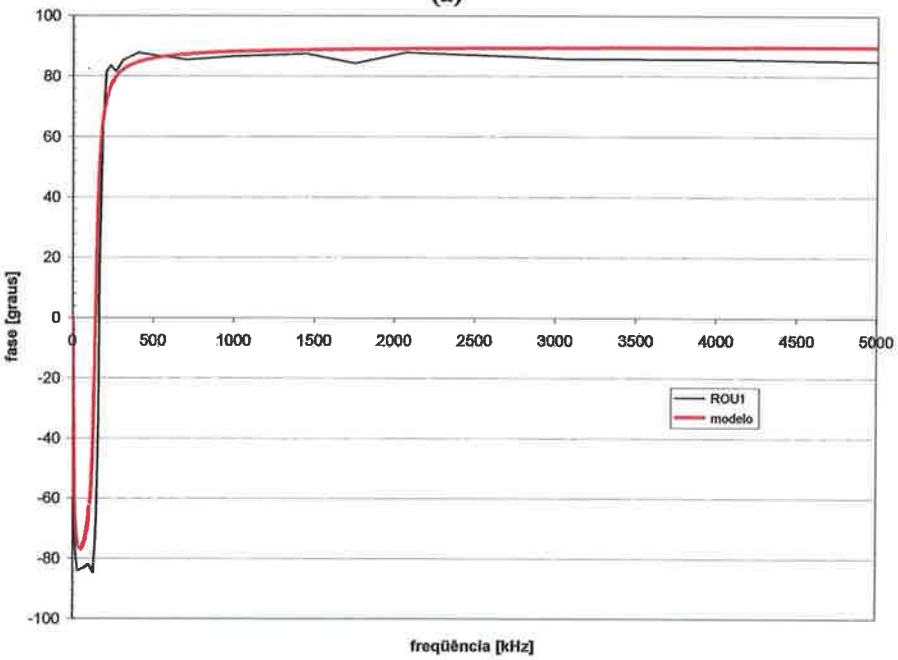


(c)

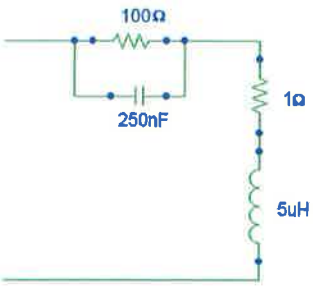
Fig. 3.27: Curvas de impedância de entrada do grupo refrigerador **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

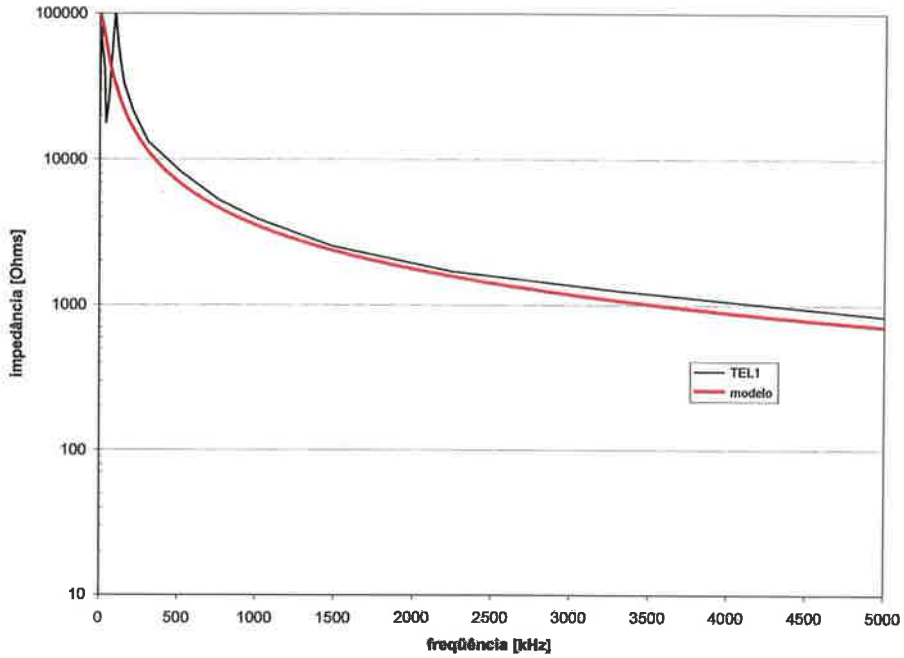


(b)

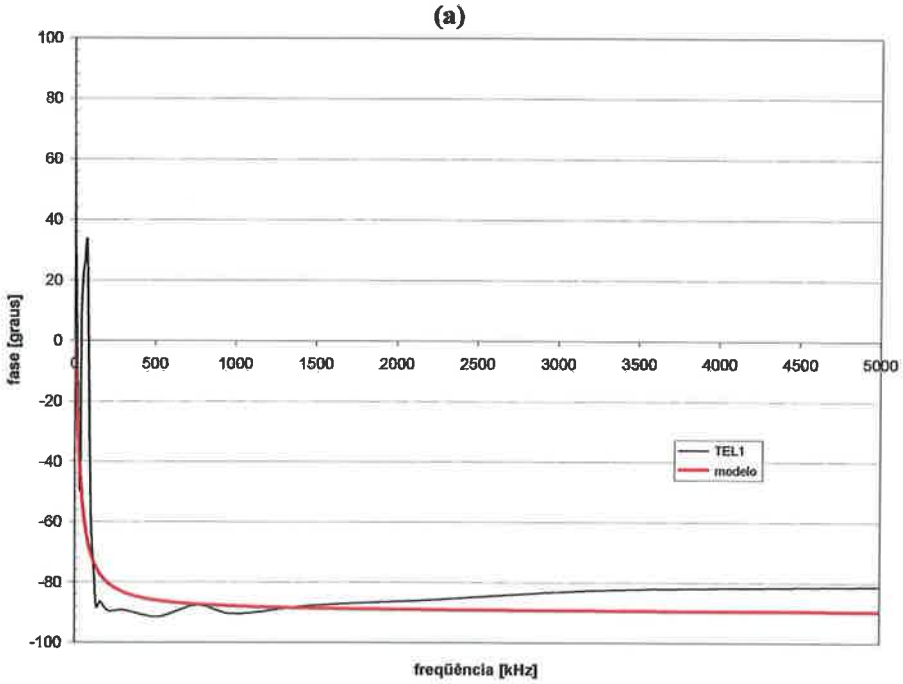


(c)

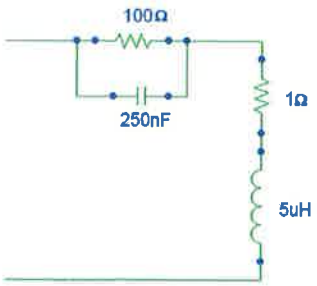
Fig. 3.28: Curvas de impedância de entrada de lava-roupas **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

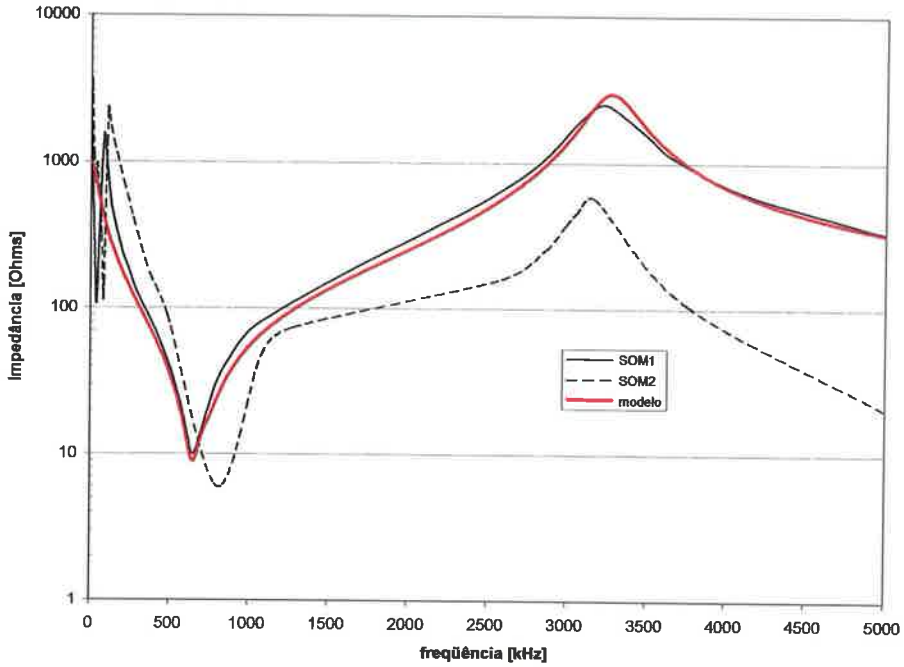


(b)

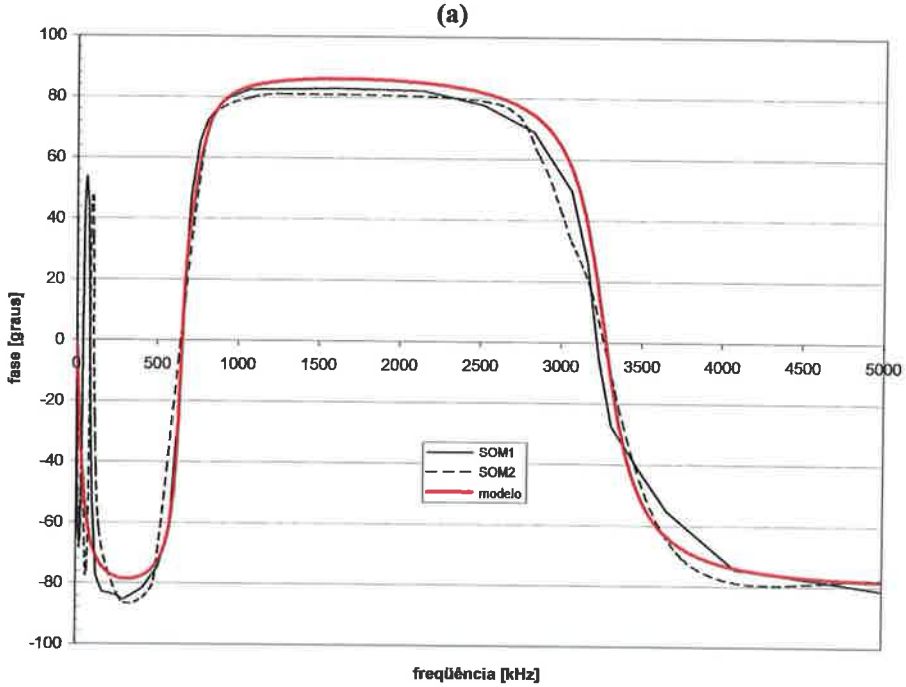


(c)

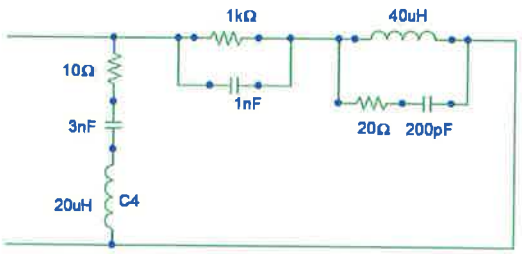
Fig. 3.29: Curvas de impedância de entrada de telefone sem fio **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

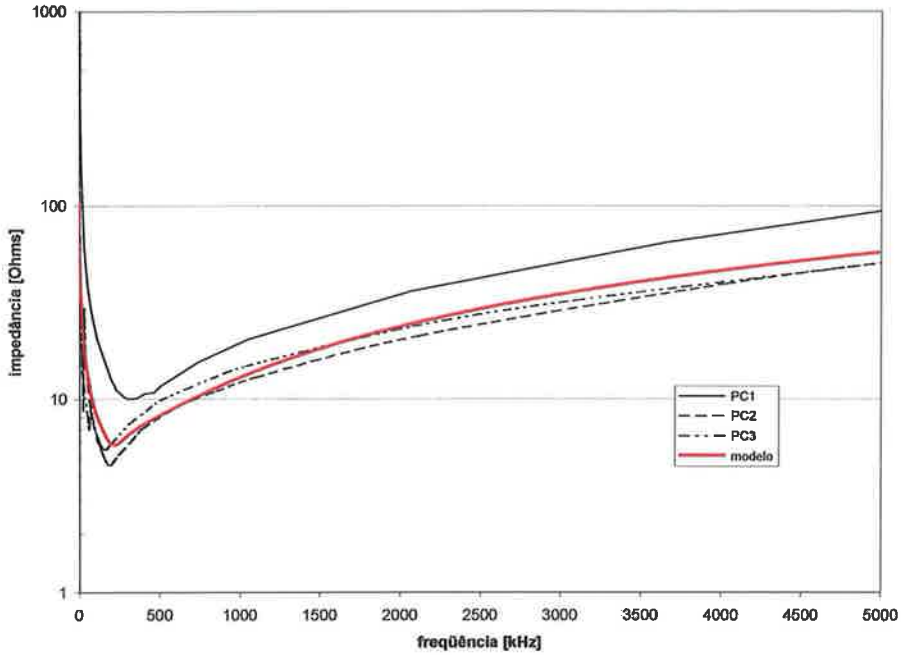


(b)

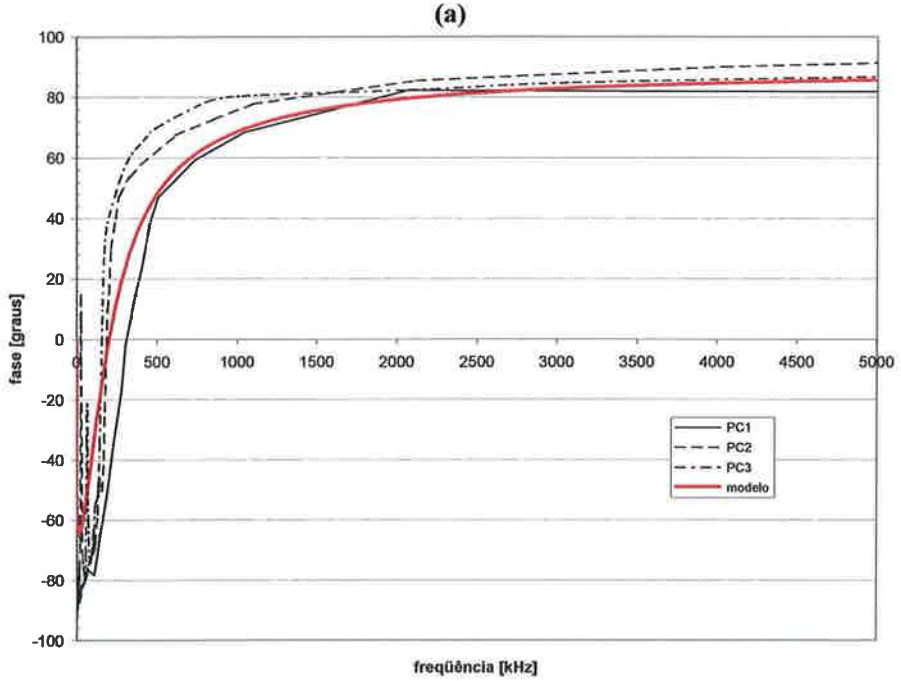


(c)

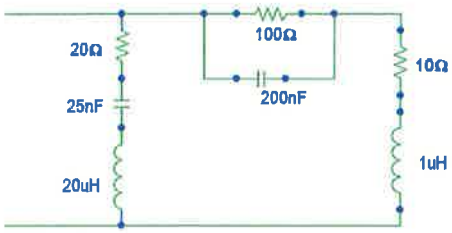
Fig. 3.30: Curvas de impedância de entrada do grupo conjunto de som **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

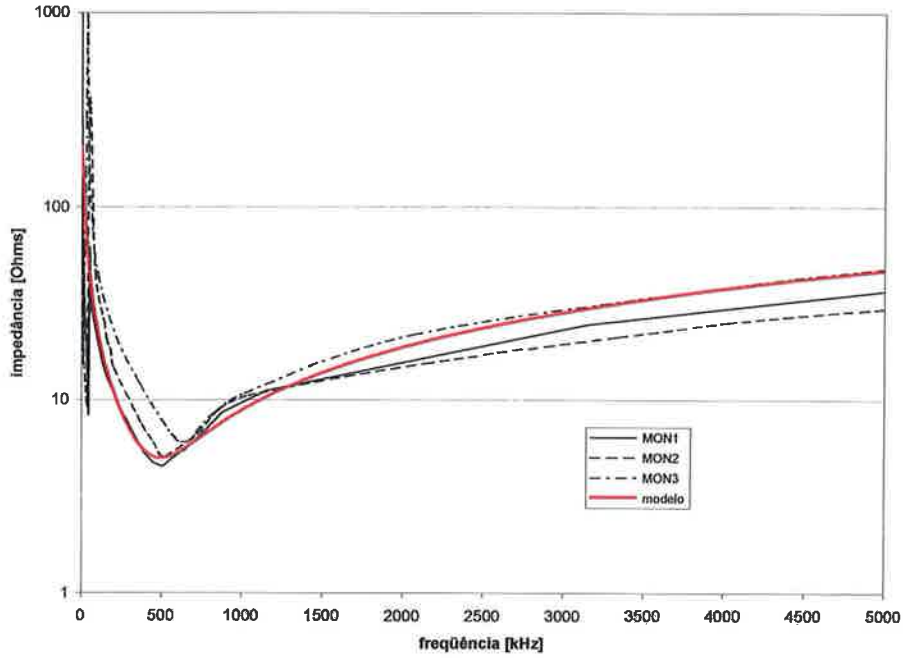


(b)

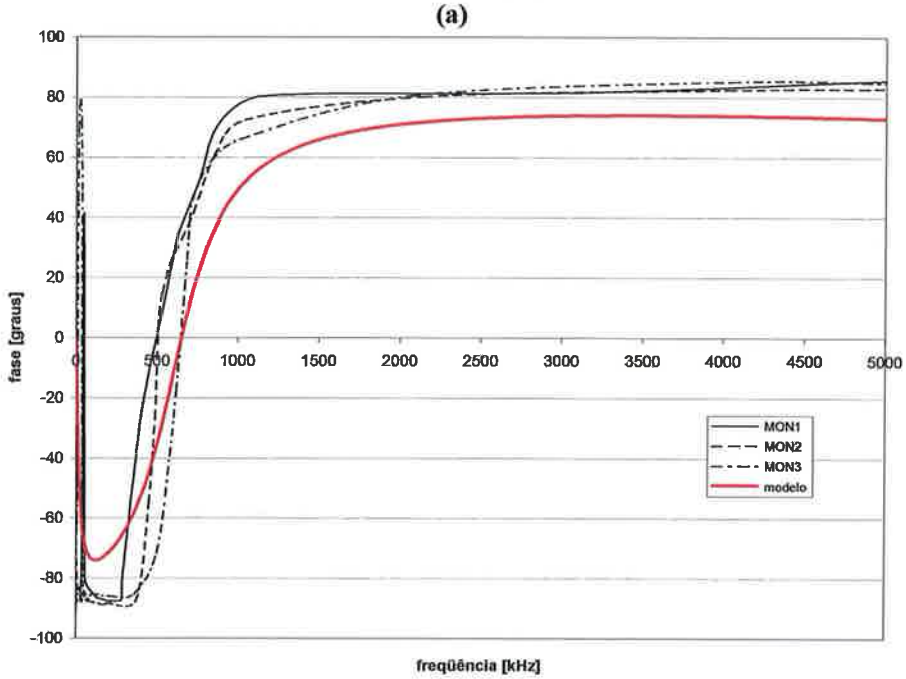


(c)

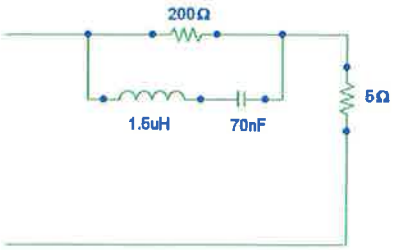
Fig. 3.31: Curvas de impedância de entrada do grupo microcomputador **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.32: Curvas de impedância de entrada do grupo monitor de vídeo **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.

3.1.4 Impedância de entrada de instalações residenciais

Foram realizadas medições da impedância de entrada em instalações residenciais utilizando-se o sistema de medição descrito em 3.1. Os resultados refletem as condições reais de cada instalação com os equipamentos eletro-eletrônicos conectados às tomadas. As cargas resistivas puras (chuveiros e lâmpadas incandescentes) permaneceram desconectadas. Isto porque, como no caso de lâmpadas incandescentes, a resistência cai para cerca de 1/10 do valor nominal quando elas são desligadas tornando os valores excessivamente baixos.

De maneira geral, os equipamentos ligados e em operação causam uma diminuição nos valores de impedância de entrada. Os cenários obtidos apresentam, portanto, em tese, valores absolutos de impedância mais elevados, o que levaria em última análise a valores conservativos de sobretensões calculadas nas próprias instalações e na rede secundária.

No Brasil o sistema TN de aterramento é o mais comumente utilizado nas instalações, segundo informações obtidas junto a concessionárias de energia. Nesse sistema o condutor neutro é aterrado junto à entrada da instalação como visto na Figura 3.33 (sistema TN-S). As medições foram realizadas com esta configuração, avaliando-se a impedância entre as fases de entrada e o condutor neutro aterrado.

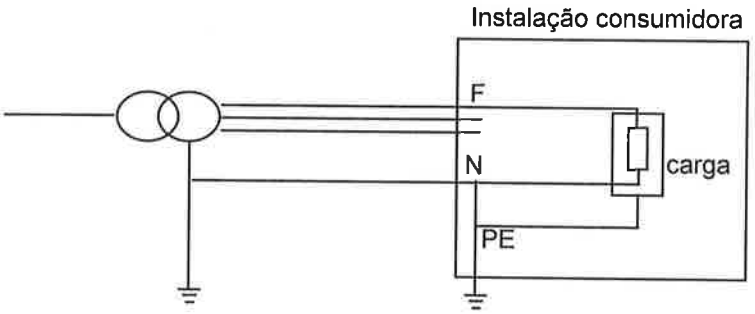


Fig. 3.33: Sistema de aterramento TN.

Foram ensaiadas cinco instalações de baixa tensão, tipicamente residenciais, sem nenhum equipamento especial ou de uso específico:

Instalação 1, (INST1), apartamento de aproximadamente 90 m^2, com os seguintes equipamentos conectados: refrigerador, microondas, máquina de lavar louças, máquina de lavar roupas, telefone sem fio, televisor 29", televisor 14", microcomputador, sistema de som compacto, aparelho de videocassete;

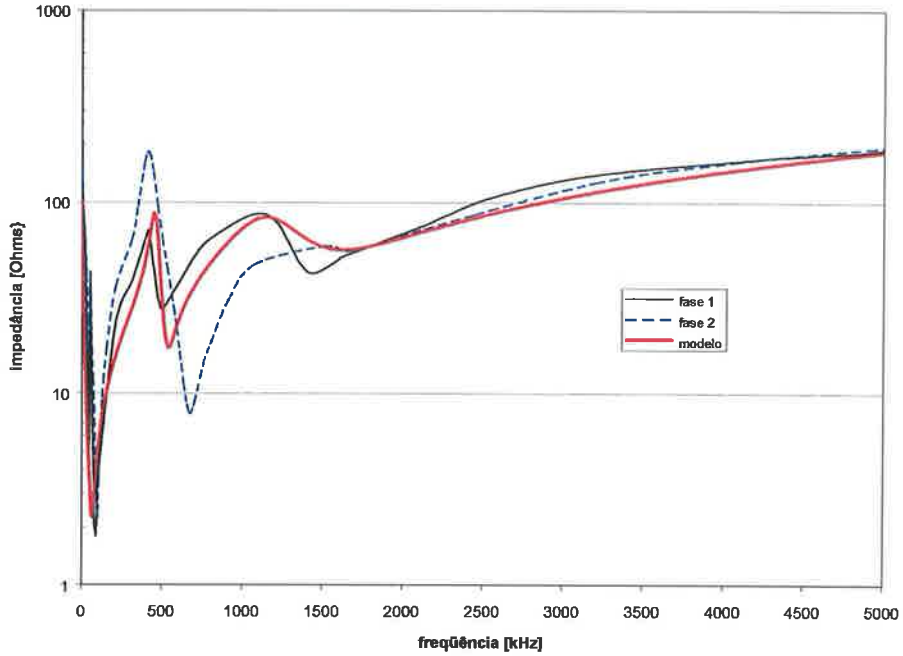
Instalação 2, (INST2), casa de aproximadamente 120 m^2, com os seguintes equipamentos conectados: refrigerador, microondas, máquina de lavar roupas, televisor 20", sistema de som compacto, aparelho de videocassete;

Instalação 3, (INST3), apartamento de aproximadamente 60 m^2, com os seguintes equipamentos conectados: refrigerador, microondas, televisor 20";

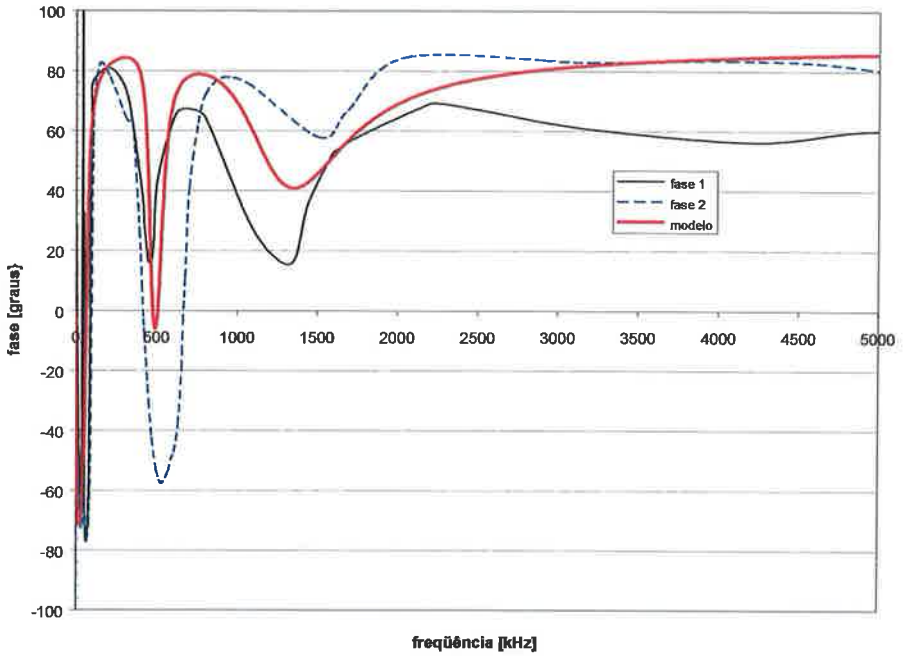
Instalação 4, (INST4), casa de aproximadamente 150 m^2, com os seguintes equipamentos conectados: refrigerador, freezer, microondas, máquina de lavar louças, máquina de lavar roupas, telefone sem fio, televisor 29", televisor 20", microcomputador, sistema de som compacto, aparelho de videocassete e DVD;

Instalação 5, (INST5), apartamento de aproximadamente 75 m^2, com os seguintes equipamentos conectados: refrigerador, microondas, televisor 20", máquina de lavar roupas.

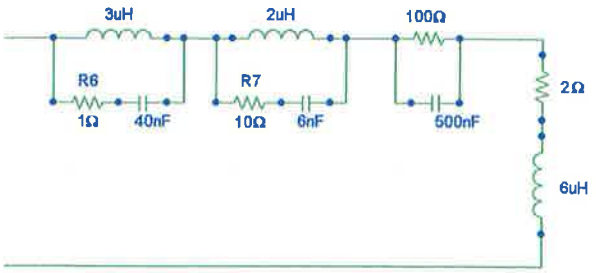
As Figuras 3.34 a 3.38 apresentam as curvas medidas de impedância de entrada das instalações bem como as sugestões de modelos simples para representá-las. As curvas dos modelos foram obtidas por simulação utilizando-se o programa computacional *Microsim PSpice*.



(a)

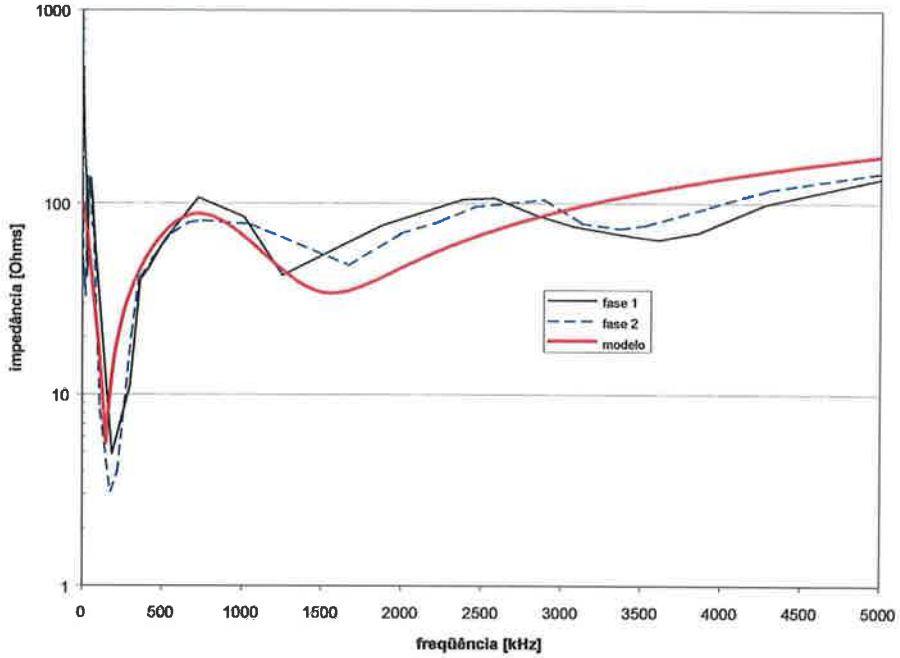


(b)

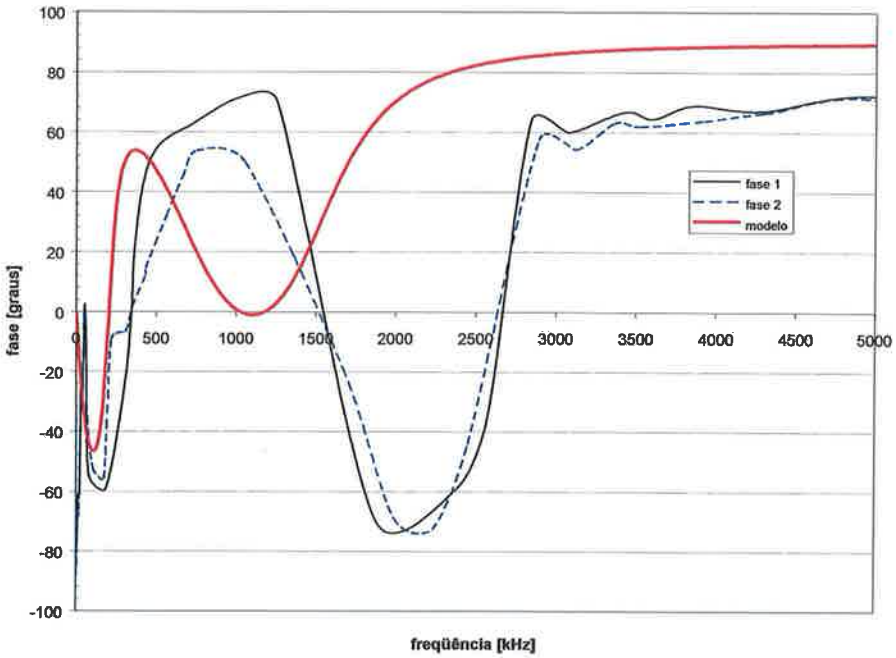


(c)

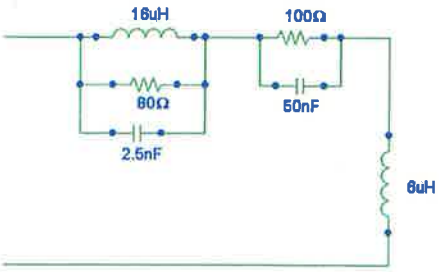
Fig. 3.34: Curvas de impedância de entrada da instalação 1 (INST1) **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

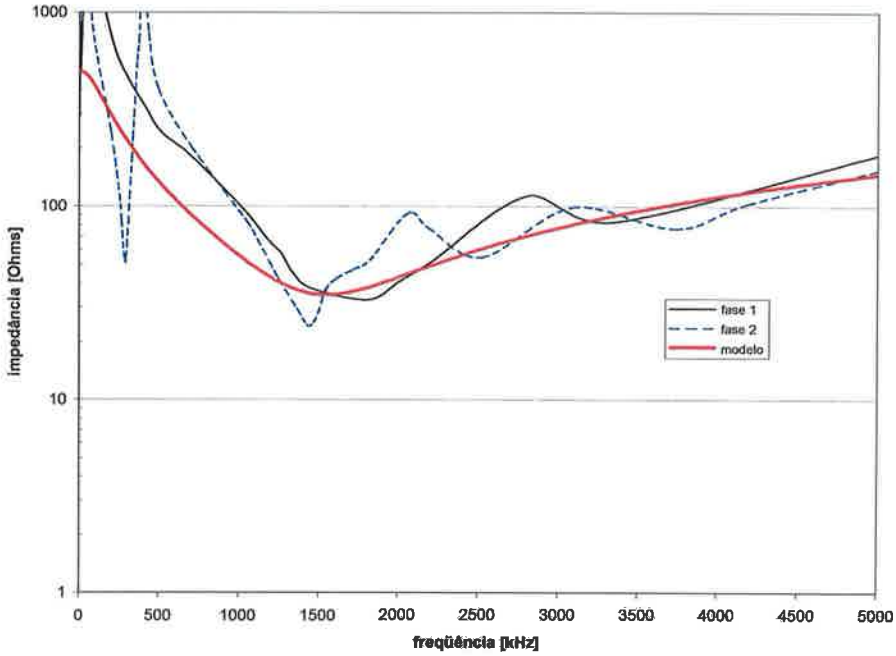


(b)

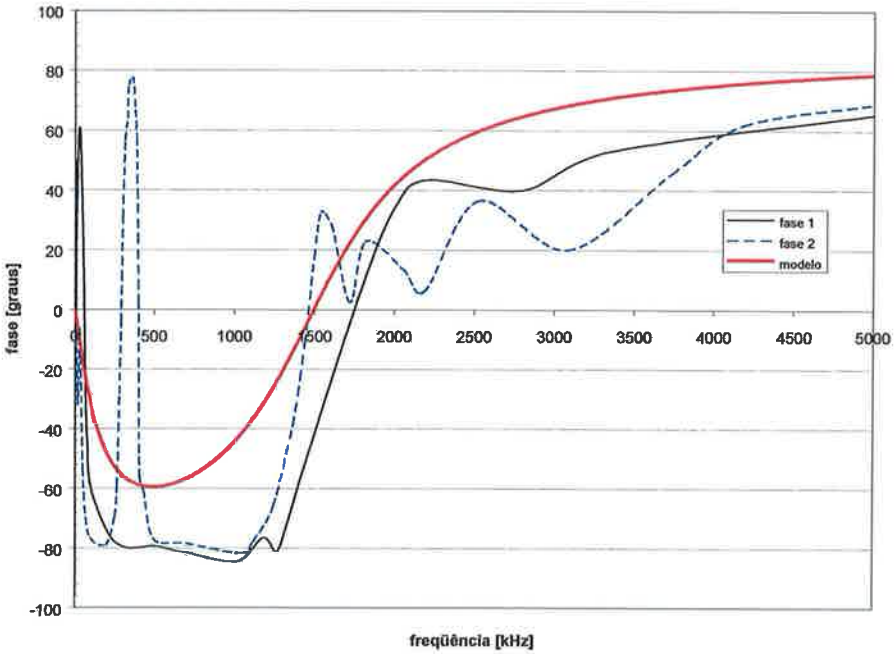


(c)

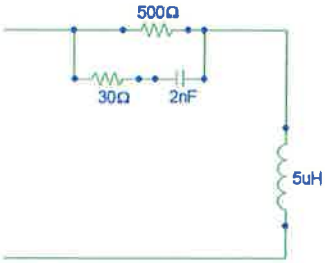
Fig. 3.35: Curvas de impedância de entrada da instalação 2 (INST2) **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

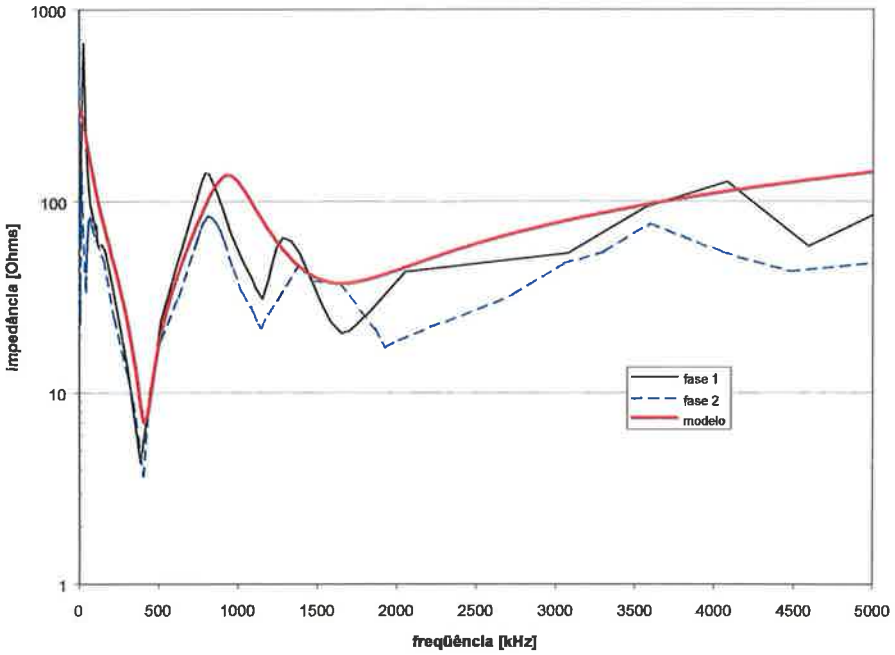


(b)

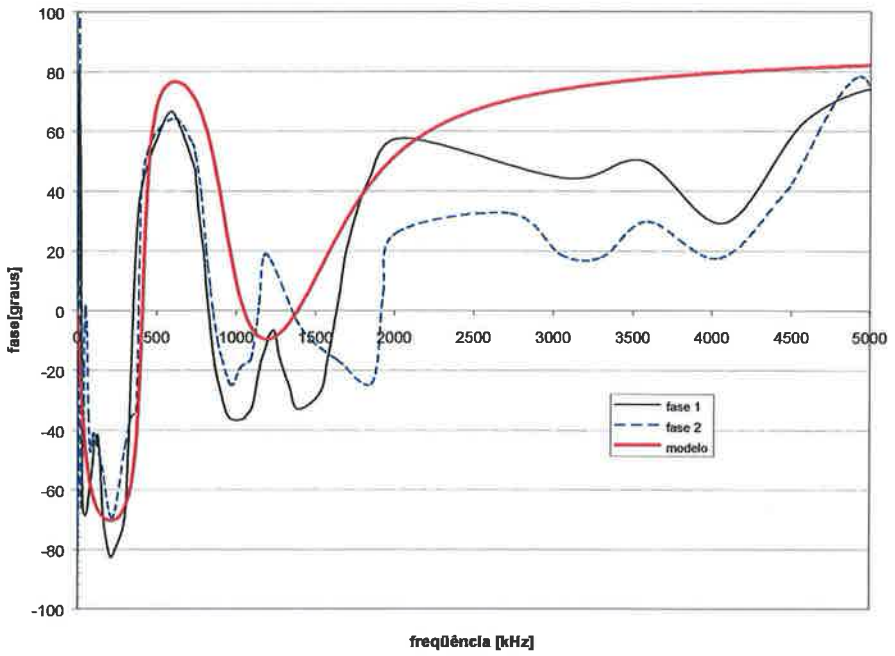


(c)

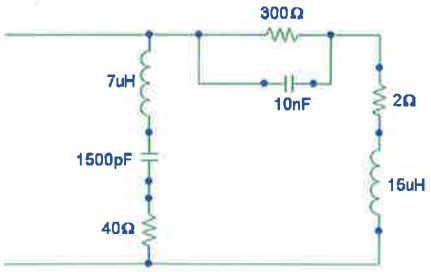
Fig. 3.36: Curvas de impedância de entrada da instalação 3 (INST3) **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)

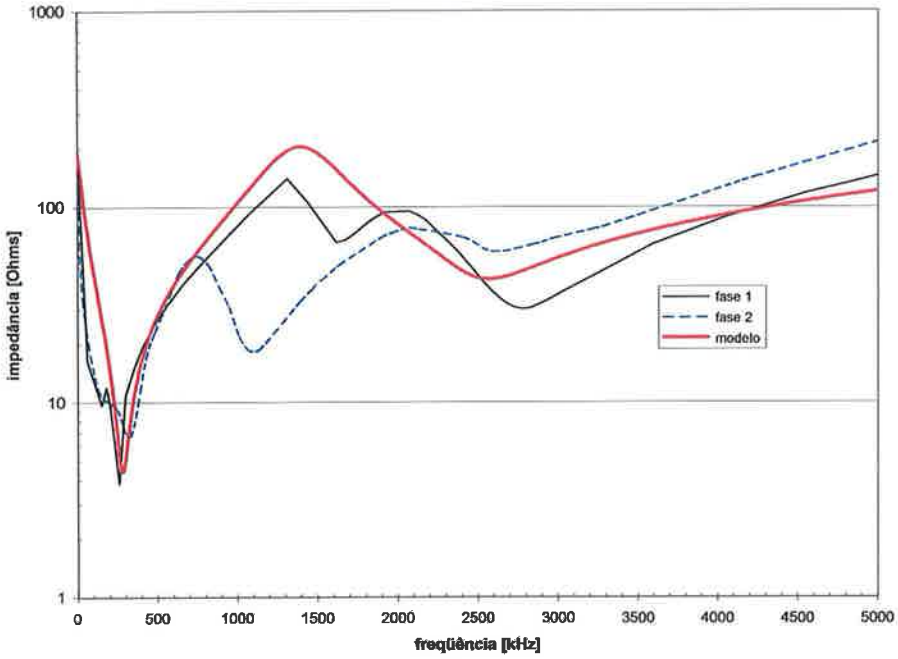


(b)

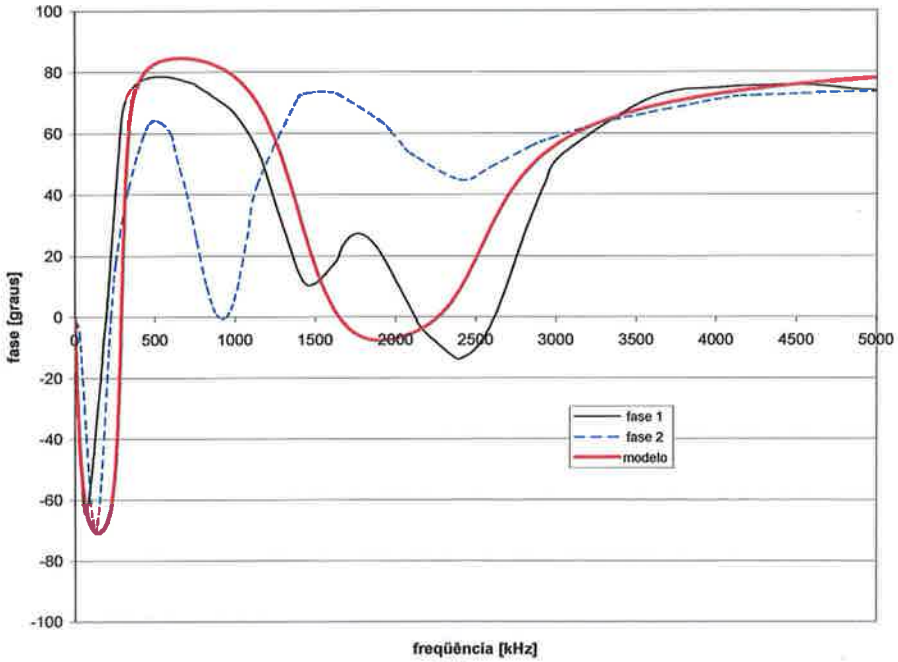


(c)

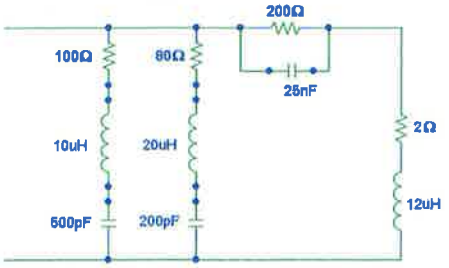
Fig. 3.37: Curvas de impedância de entrada da instalação 4 (INST4) **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.38: Curvas de impedância de entrada da instalação 5 (INST5) **(a)** Módulo **(b)** Fase. Medidas e calculadas utilizando-se o modelo **(c)**.

Observa-se das curvas obtidas que, apesar das divergências e dispersão de valores encontrados, um comportamento similar entre elas pode ser notado. Para freqüências com valores até cerca de 400 - 500 kHz o comportamento é predominantemente capacitivo, sendo indutivo para freqüências com valores superiores, até o limite das medições efetuadas. Esse comportamento geral norteou a elaboração dos modelos propostos para cada instalação estudada.

Buscando-se um modelo geral simples, foi então elaborado um circuito, Figura 3.39, que pudesse agrupar de certo modo o comportamento das instalações avaliadas. A Figura 3.40 apresenta em um mesmo gráfico todas as curvas de impedância de entrada medidas e a curva calculada utilizando-se o circuito da Figura 3.39. Isso permite visualizar a grande dispersão de valores em determinadas faixas de freqüências e o comportamento da curva de impedância do modelo. A avaliação do desempenho desse modelo será discutida quando da aplicação do mesmo em simulações.

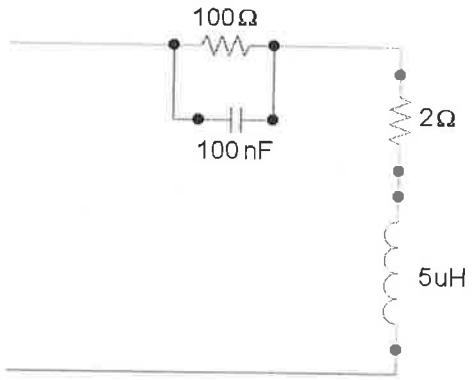
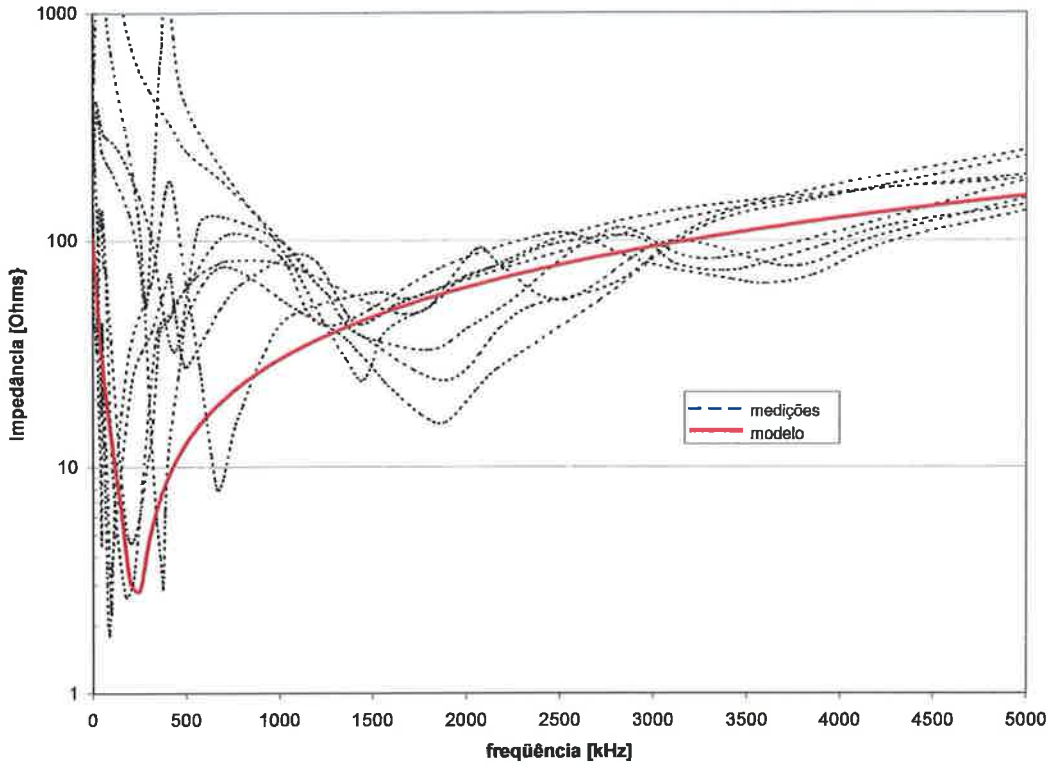
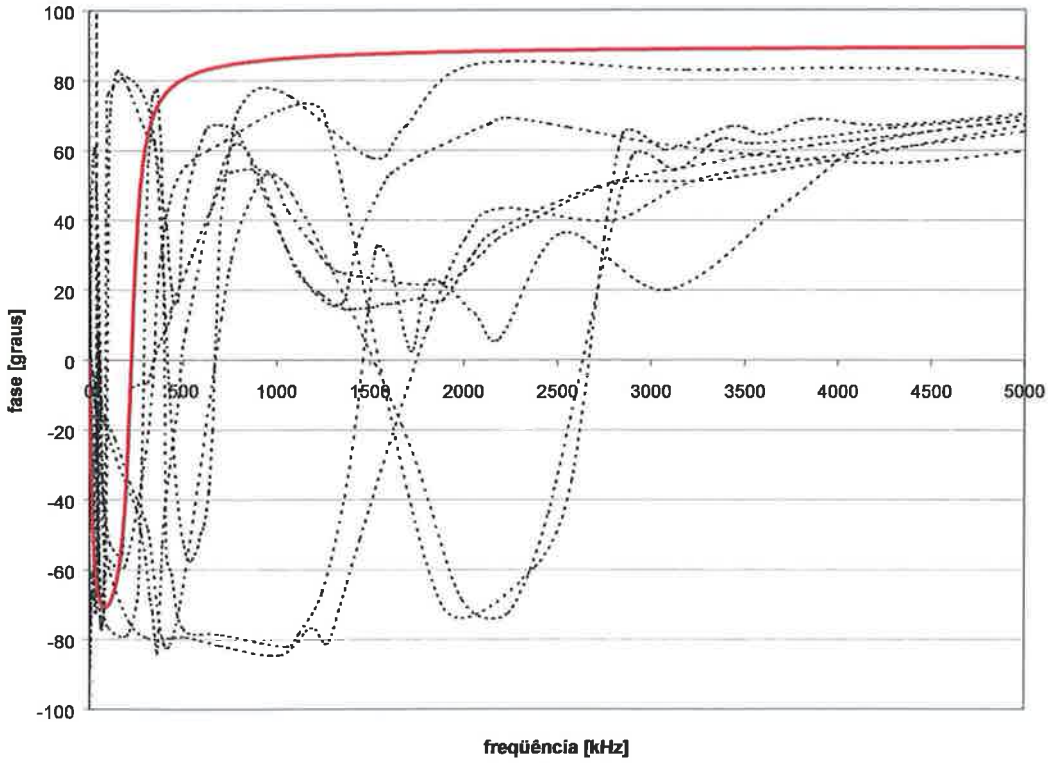


Fig. 3.39: Modelo simplificado adotado para representação das instalações residenciais.



(a)



(b)

Fig. 3.40: Curvas de impedância de entrada das instalações medidas e calculada utilizando-se o modelo da Figura 3.39 **(a)** Módulo **(b)** Fase.

3.2 Suportabilidade dos equipamentos

Neste item são apresentados alguns conceitos e requisitos acerca da suportabilidade de equipamentos eletro-eletrônicos e instalações de baixa tensão, definidos por normas ou documentos técnicos, bem como resultados de ensaio de suportabilidade a impulsos atmosféricos realizados em laboratório em alguns aparelhos.

3.2.1 Introdução

Os surtos que ocorrem em instalações de baixa tensão em corrente alternada e que podem causar falhas nos equipamentos eletrônicos são originados por chaveamento de cargas presentes na rede (interna e/ou externa à instalação) e por descargas atmosféricas.

Os surtos de manobra ou de chaveamento apresentam, em geral, menos energia que os surtos atmosféricos, porém, com freqüência de ocorrência muitas vezes superior, promovem, ao longo do tempo, maior deterioração, por exemplo, da isolação de um equipamento ou sistema.

Os surtos atmosféricos em uma instalação são provocados principalmente por:

- Descargas diretas em um circuito externo à instalação, injetando altas correntes e produzindo altas tensões seja por correntes fluindo pelo aterramento ou pelo próprio circuito externo;

- Descargas diretas na edificação;
- Descargas indiretas entre nuvens ou em objetos próximos, produzindo campos eletromagnéticos que provocam sobretensões nos condutores externos e internos da instalação;
- Circulação de correntes no aterramento da instalação, resultantes de descargas diretas próximas.

Os surtos resultantes das descargas podem atingir elevados valores em relação às condições operativas normais dos equipamentos. Como ilustração, a Figura 3.41 apresenta um impulso associado a descarga atmosférica, superposto à tensão em 60 Hz, com valor eficaz de 110 Volts.

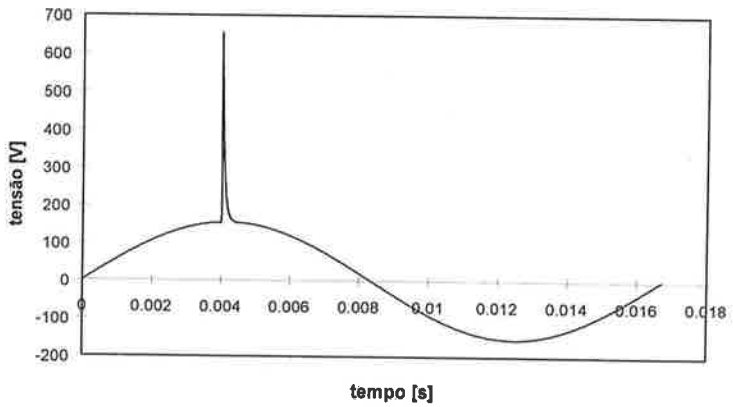


Fig. 3.41: Impulso atmosférico superposto à tensão em 60 Hz.

3.2.2 Requisitos de suportabilidade e/ou imunidade

Um ponto fundamental para estabelecimento da proteção adequada dos equipamentos presentes em uma instalação de baixa tensão contra surtos de origem atmosférica é o conhecimento ou avaliação dos níveis de imunidade ou suportabilidade dos mesmos. Simplificadamente entende-se por imunidade a determinado nível de solicitação elétrica a capacidade do equipamento apresentar comportamento absolutamente normal de funcionamento quando submetido àquela solicitação. Assim, por exemplo, um micromputador deve ser capaz de operar normalmente até determinado valor de sobretensão sem que haja falha de processamento, parada ou perda de informações. O termo suportabilidade, tradicionalmente utilizado, refere-se à capacidade do equipamento efetivamente suportar os níveis de sobretensão sem que haja dano físico permanente que impeça definitivamente seu funcionamento. Por analogia livre relaciona-se a imunidade ao "software" e a suportabilidade ao "hardware".

Alguns documentos técnicos tratam de requisitos mínimos a serem atendidos por equipamentos e instalações quando se trata de solicitações atmosféricas.

A norma IEC 60364 [25] apresenta níveis de suportabilidade a impulsos atmosféricos (padronizados) em sistemas de baixa tensão, como mostrado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Tensões suportáveis de impulso atmosférico em instalações de baixa tensão [25]

Tensão nominal da instalação [V]		Tensão suportável [kV]			
Trifásico	Monofásico	Equipamentos na origem da instalação Categoria IV	Equipamentos nos quadros de distribuição Categoria III	Aparelhos Categoria II	Equipamentos especialmente protegidos Categoria I
-	120-240	4	2,5	1,5	0,8
230/400 277/480	-	6	4	2,5	1,5
400/690	-	8	6	4	2,5
1000	-	Valores sujeitos a especificações particulares			

Como visto da Tabela 3.1 espera-se que, no mínimo, os dispositivos conectados nas instalações de baixa tensão suportem cerca de aproximadamente 5 p.u. de sua tensão nominal em se tratando de impulsos atmosféricos. Em destaque na tabela, encontram-se os valores típicos para instalações residenciais.

No começo dos anos 80, os fabricantes de equipamentos de computação, reunidos em associação conhecida como CBEMA (Computer Business Manufacturers Association), estabeleceram uma curva de imunidade a distúrbios de tensão dos produtos que se tornou um padrão para a indústria. Atualmente a associação se expandiu e foi criado o ITI (Information Technology Industry Council) [26] que representa empresas americanas líderes em produtos e serviços de tecnologia da informação. A curva encontra-se reproduzida na Figura 3.42. Ressalte-se que esta curva define os limites que devem ser tolerados pelos equipamentos para que haja funcionamento normal, sem

prejuízos ao processamento das informações e não se referem a níveis que causem danos permanentes aos mesmos.

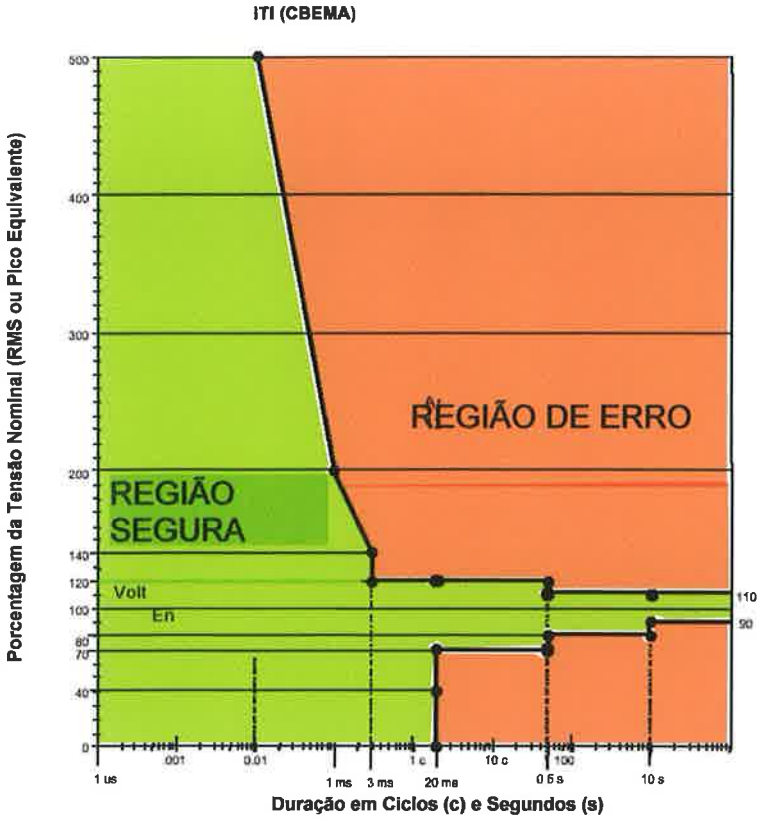


Fig. 3.42: Curva de imunidade de equipamentos de computação (ITI) (adaptada de [26]).

Nota-se, por inspeção, que em se tratando de surtos com duração de até 100 μs, como os associados às descargas atmosféricas, o nível de sobretensão admitido é 5 p.u. da tensão de alimentação. Considerando-se tensões de alimentação na faixa de 110 a 127 Volts, sobretensões de 550 a pouco mais de 600 Volts seriam toleradas. Não há uma forma de onda específica, apenas uma referência à duração do surto.

A curva anterior apesar de ser um padrão para a indústria não tem caráter normativo. Atualmente, normas da área de compatibilidade eletromagnética oferecem subsídios e ensaios a serem realizados em equipamentos com o objetivo de nortear o projeto da proteção.

A IEC, em sua série 1000, define métodos de ensaios e níveis de severidade para avaliação do comportamento operacional dos equipamentos submetidos a diversos tipos de distúrbios. A IEC 61000-4-5 [27] trata da imunidade a surtos causados por chaveamento e descargas atmosféricas. Não se refere a ensaios de suportabilidade da isolação dos equipamentos a impulsos de alta tensão e sim ao comportamento operacional dos mesmos quando submetidos aos impulsos.

A norma apresenta os métodos de ensaio e os níveis de severidade, sendo de responsabilidade dos usuários e/ou fabricantes dos equipamentos a escolha dos valores adequados.

A simulação dos surtos é realizada através de gerador com características definidas. Para a simulação da fonte de interferência presente no mesmo circuito do equipamento (acoplamento direto) o gerador deve apresentar baixa impedância de saída e valores maiores para o caso de interferências em outros circuitos (acoplamento indireto).

Dois geradores estão normalizados: um, denominado gerador de onda combinada ou híbrido (associado a ensaios nas redes de alimentação c.a.) e outro, denominado gerador de onda CCITT (associado a ensaios nas redes de sinal/telecomunicações).

O gerador combinado apresenta como característica uma tensão de saída, em vazio, com forma de onda com tempo de frente de 1,2 μs e tempo até o meio valor de 50 μs como mostrado na Figura 3.43, sendo essa normalmente utilizada em ensaios de impulso atmosférico. Esse mesmo gerador, quando em curto-circuito, fornece uma corrente com forma de onda como mostrado na Figura 3.44, com tempo de frente de 8 μs e tempo até o meio valor de 20 μs, tradicionalmente utilizada em ensaios em dispositivos de proteção e/ou pára-raios.

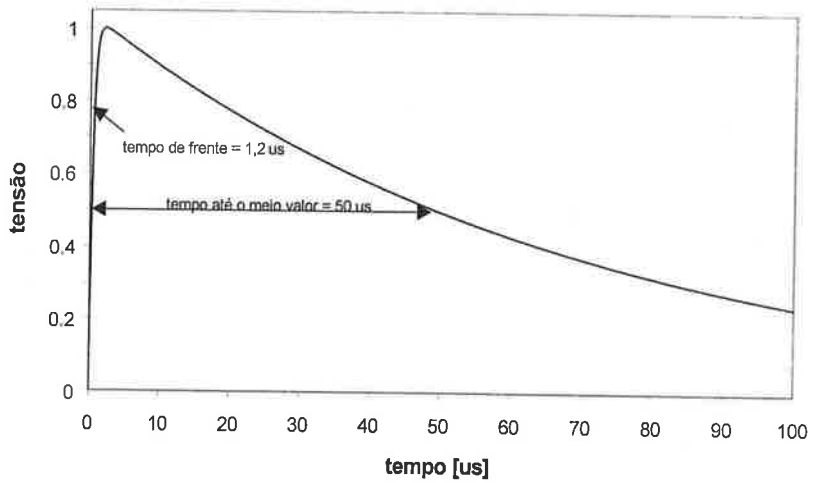


Fig. 3.43: Tensão normalizada de circuito aberto do gerador de onda combinada, (1,2/50) [27].

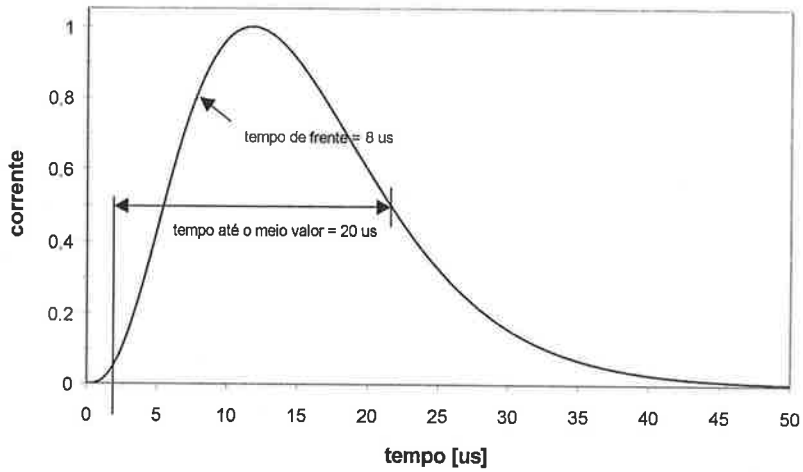


Fig. 3.44: Corrente normalizada de curto-circuito do gerador de onda combinada, (8/20) [27].

A relação entre os valores de pico de tensão em vazio e da corrente de curto-circuito define uma grandeza chamada impedância efetiva e deve apresentar valor de, no mínimo, 2 Ω.

A norma exige que os equipamentos devam estar energizados e operando normalmente quando da aplicação dos impulsos. Isso exige o emprego de meios de acoplamento entre o gerador e a rede que alimenta o equipamento sob teste. São utilizados capacitores, indutores ou ainda dispositivos de chaveamento como centelhadores, por exemplo.

Definidas as formas de onda de ensaio, resta a definição dos valores de tensão. Os mesmos estão relacionados por níveis, que devem ser selecionados de acordo com as diferentes condições de instalação. Como requisito adicional é exigido nível mínimo de imunidade de 0,5 kV (tensão fase-fase) e 1 kV (tensão fase-terra) para equipamentos conectados às redes públicas de distribuição de energia. A Tabela 3.2 apresenta os níveis preferenciais de tensões de ensaio.

Tabela 3.2 – Níveis de ensaio [27].

Nível	Tensão de ensaio em circuito aberto kV ± 10 %
1	0,5
2	1,0
3	2,0
4	4,0
X	especial

Os níveis de ensaio podem ser selecionados conforme diretivas indicadas na própria norma que divide as instalações em classes:

- **Classe 0** (ambiente elétrico bem protegido, normalmente sala especial): todos os cabos apresentam proteção contra sobretensões (primária e secundária); os equipamentos eletrônicos estão interconectados por um sistema de aterramento muito bem projetado que não é influenciado significativamente pelo sistema de energia ou descarga atmosférica; os equipamentos possuem fonte de alimentação dedicada. Surtos de tensão não podem exceder 25 Volts.
- **Classe 1** (ambiente elétrico parcialmente protegido): os cabos de entrada são providos de proteção contra sobretensões (primária); os equipamentos eletrônicos são bem conectados por um sistema de aterramento que não é influenciado significativamente pela instalação de energia ou descargas atmosféricas. Equipamentos eletrônicos têm suas fontes de alimentação completamente separadas de outros equipamentos. Surtos não podem exceder 500 Volts. Aplica-se o gerador combinado.

- **Classe 2** (ambiente elétrico onde os cabos estão bem separados mesmo em pequenos trechos):a instalação é aterrada via linha de terra separada do sistema de aterramento da instalação de energia que pode estar sujeita a interferências geradas pela instalação propriamente dita ou raios. A fonte de alimentação para os equipamentos eletrônicos é separada de outros circuitos basicamente utilizando um transformador especial. Circuitos não protegidos estão na instalação, mas bem separados e em número limitado. Surtos não podem exceder 1 kV. Aplica-se o gerador combinado.
- **Classe 3** (ambiente elétrico onde cabos de energia e sinal correm em paralelo): a instalação é conectada ao sistema de aterramento da instalação de energia e pode estar sujeita a interferências geradas pela instalação ou por raios; correntes devido a faltas, chaveamentos e raios na instalação de energia podem gerar sobretensões relativamente altas. Equipamentos eletrônicos protegidos e equipamentos elétricos menos sensíveis a interferências estão conectados à mesma rede de energia. Os cabos de interconexão podem estar parcialmente externos à instalação, mas próximos ao sistema de aterramento. Cargas indutivas estão presentes na instalação. Surtos não podem exceder 2 kV. Aplica-se o gerador combinado.
- **Classe 4** (ambiente elétrico onde os cabos de energia são externos e são utilizados pelos circuitos elétricos e eletrônicos): a instalação é conectada ao sistema de aterramento da instalação de energia e pode estar sujeita a interferências geradas pela instalação ou por raios; correntes devido a faltas à terra (na faixa de alguns kA), chaveamentos e raios na instalação de energia podem gerar sobretensões relativamente altas. A rede de energia pode ser a mesma para os equipamentos

elétricos e eletrônicos. Um exemplo deste ambiente corresponde a um equipamento eletrônico conectado à rede de telecomunicações dentro de uma área densamente povoada. Não há uma rede de aterramento sistematicamente construída. Surtos não podem exceder 4 kV. Aplica-se o gerador combinado.

- **Classe 5** (ambiente elétrico para equipamentos eletrônicos conectados aos cabos de telecomunicações e linhas aéreas de energia em uma área não densamente povoada): todos esses cabos estão providos de proteção primária contra sobretensões. Não há sistema de aterramento externamente ao equipamento eletrônico. Os requisitos desta classe são cobertos pela classe 4. Aplica-se o gerador combinado para circuitos de energia e os circuitos de sinal com pequena extensão e, o gerador CCITT, para os circuitos de sinal de grande extensão.

3.2.3 Ensaios de suportabilidade

Analisando-se os valores apresentados pela norma de instalações na Tabela 3.1 infere-se que os equipamentos eletro-eletrônicos devem suportar sem danos permanentes sobretensões na faixa de 0,8 a 1,5 kV. A norma IEC [27] define valor mínimo de 1 kV (fase-terra) de imunidade a surtos em equipamentos conectados a redes de distribuição pública sendo em princípio, portanto, o valor requerido a ser aplicado aos equipamentos e dispositivos eletro-eletrônicos.

No Brasil, entretanto, não se encontram declaradas nos manuais dos produtos eletro-eletrônicos de uso geral especificações sobre o assunto. Pouco se sabe a respeito do comportamento dos equipamentos quando submetidos a sobretensões de diversas formas. O sentimento comum é que quando os equipamentos "queimam" devido a raios ou outras interferências, deve-se acionar a concessionária de energia que não ofereceu condições técnicas suficientes para limitar as sobretensões.

Em [28] encontram-se resultados de ensaios de aplicação de impulsos atmosféricos realizados na Alemanha, em 20 videocassetes, com valores de tensão crescentes variando de 1,5 kV a 3 kV, este último valor por sinal não apresentado em nenhum documento normativo. Como resultado os autores apontam a grande variação de comportamento dos corpos de prova: enquanto 7 equipamentos suportaram plenamente níveis de sobretensão de 3 kV, outros 4 não resistiram ao primeiro nível de 1,5 kV. Isso demonstra claramente a dificuldade de estabelecimento do nível efetivo de suportabilidade e/ou imunidade.

Ressalta-se a importância da necessidade dos fabricantes declararem em seus manuais de produtos as características de imunidade e suportabilidade a surtos, assim como o fazem para outras características elétricas (freqüência e tensão nominal, consumo, potência etc). Tais informações apoiariam as tomadas de decisão e norteariam os projetos de proteção contra surtos tanto por parte das concessionárias de energia quanto dos consumidores sejam eles residenciais, comerciais ou mesmo industriais.

Com o intuito de avaliar a suportabilidade de alguns equipamentos eletro-eletrônicos foram realizados ensaios no Laboratório de Alta Tensão do Instituto de Eletrotécnica e Energia da USP. Foi construído um gerador que atendesse os requisitos de tensão e corrente conforme a norma IEC 1000-4-5 [27]. Foram aplicados impulsos de tensão com valores de pico crescentes até que se observasse falha dos corpos de prova.

3.2.3.1 Microcomputador

Provavelmente os microcomputadores pessoais sejam dos equipamentos mais sensíveis em uma instalação residencial e, atualmente, com grande expansão de vendas no mercado consumidor nacional.

Visando-se uma avaliação bastante simples, sem disponibilidade de outros corpos de prova, um microcomputador comum foi submetido a impulsos de tensão.

O valor de cerca de 1kV de impulso causou dano. A Figura 3.45 mostra o impulso aplicado ressaltando-se que a tensão medida inclui a tensão em 60 Hz aplicada ao corpo de prova em funcionamento.

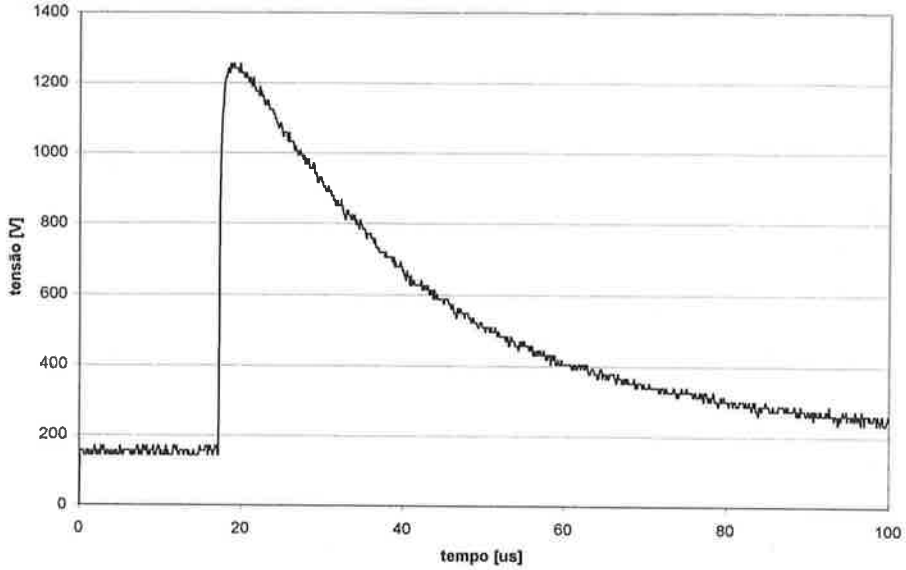


Fig. 3.45: Impulso de tensão aplicado ao microcomputador.

3.2.3.2 Televisor 14 polegadas

A Figura 3.46 mostra o impulso com valor de pico de cerca de 2,5 kV superposto à tensão em 60 Hz, que causou dano a um televisor.

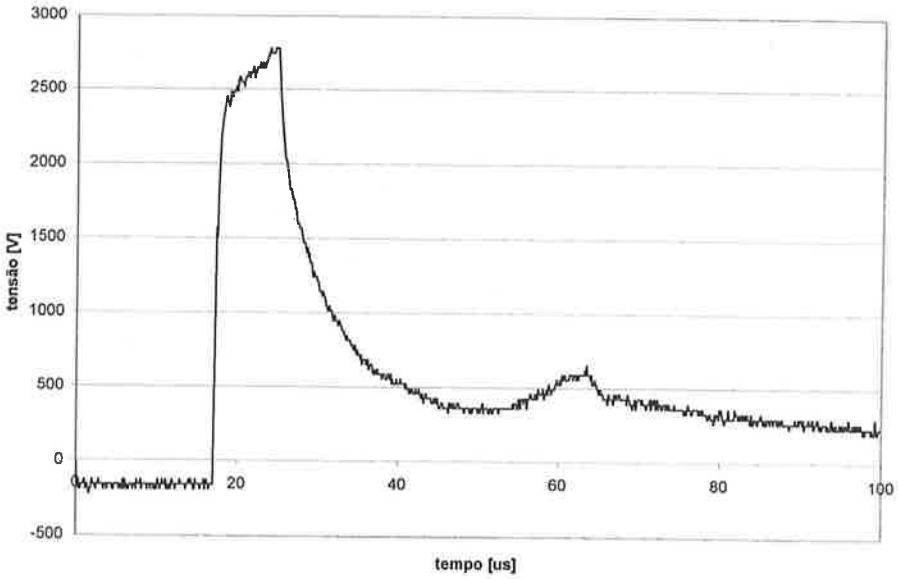


Fig. 3.46: Impulso de tensão aplicado ao televisor.

3.2 Comentários

Este Capítulo apresentou diversas informações sobre a caracterização e modelagem de equipamentos eletro-eletrônicos e instalações residenciais de baixa tensão a serem utilizados em estudos de transitórios.

Analisando-se o comportamento em freqüência da impedância de entrada dos equipamentos, infere-se que seria improvável a representação dos mesmos de maneira ainda mais simplificada em relação aos modelos propostos, como por exemplo, um único componente concentrado seja ele resistor, indutor ou capacitor, sem que houvesse um desajuste significativo em relação às curvas de módulo e fase medidas.

De maneira geral, os equipamentos, dentro de cada grupo, apresentaram boa concordância entre suas curvas de impedância de entrada, tanto em módulo quanto em fase. Os modelos sintetizados ajustaram-se bem às curvas medidas apesar de sua relativa simplicidade.

Por outro lado, e como poderia ser suposto, as instalações residenciais medidas, apresentaram maior dispersão de comportamento nas curvas de impedância de entrada, embora a tendência geral seja o de comportamento capacitivo para freqüências mais baixas e comportamento indutivo nas freqüências mais elevadas.

Da mesma maneira que os equipamentos eletro-eletrônicos, é praticamente impossível reproduzir adequadamente o comportamento da impedância de entrada ao longo da faixa

de freqüências analisada utilizando-se apenas um componente concentrado de qualquer valor, o que mostra a inadequação dos modelos várias vezes propostos.

Foram também apresentadas informações sobre suportabilidade e imunidade, importantes para análise da proteção dos equipamentos e instalações. Apesar de indicações e existência de documentos normativos, nenhuma informação é divulgada pelos fabricantes dos equipamentos. Como valor típico notável, sugere-se como 1 kV o valor suportável mínimo de impulso atmosférico a equipamentos residenciais de uso geral, conectados a redes convencionais de distribuição. No entanto, esse mesmo valor de 1 kV foi suficiente para danificar permanentemente um microcomputador ensaiado em laboratório.

Em seguida, serão apresentados resultados de simulações utilizando o conteúdo desenvolvido e apresentado neste Capítulo.

CAPÍTULO 4
APLICAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas simulações utilizando os modelos desenvolvidos e apresentados no Capítulo 3. São aqui descritas as simulações realizadas através do programa computacional ATP (*Alternative Transients Program*) considerando uma configuração típica de rede desenvolvida e analisada em [17] com o objetivo de analisar o comportamento dos transitórios de corrente e tensão nas instalações de baixa tensão quando da ocorrência de descargas diretas na rede de média tensão. Em outro item, são mostrados resultados de simulações, utilizado o programa *Pspice*, de uma instalação residencial típica incluindo os circuitos e equipamentos eletro-eletrônicos sendo submetida a surtos.

4.1 Simulação de surtos em rede de distribuição

A topologia típica utilizada neste estudo está mostrada na Figura 4.1 com um circuito primário com transformador, um trecho de circuito secundário acoplado ao primário e dois ramais, existindo simetria em relação ao ponto onde está localizado o transformador. São considerados 23 pontos referentes aos consumidores.

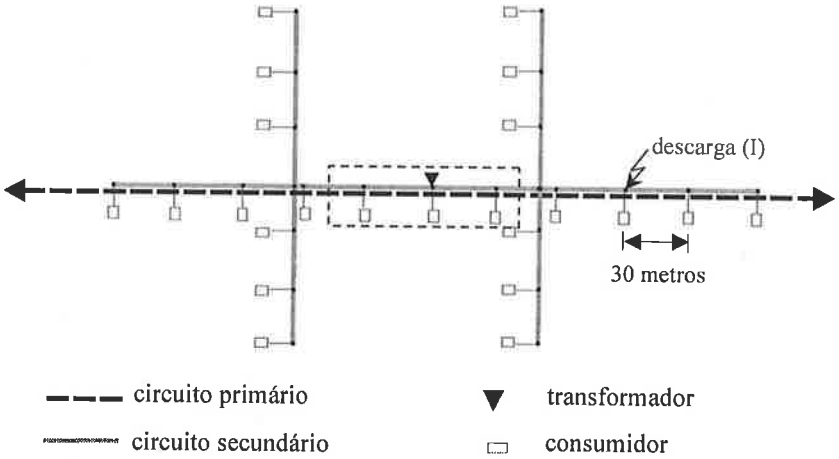


Fig. 4.1: Topologia utilizada nas simulações de surtos na rede de distribuição [17].

Estão representados, na rede primária, 25 trechos de 30 metros (espaçamento entre postes) para cada lado em relação ao transformador e, a partir daí, trechos com espaçamentos crescentes, perfazendo um comprimento total do circuito primário de 7,5 km.

A área indicada no retângulo tracejado na Figura 4.1 está apresentada em detalhe na Figura 4.2. Nela pode ser visualizado como foram representados (unifilarmente) os componentes da rede primária e secundária.

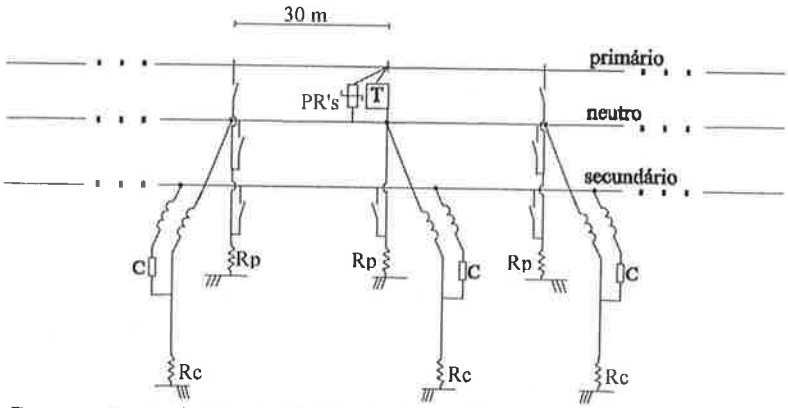


Fig. 4.2: Representação detalhada de um trecho das linhas primária e secundária [17].
Rp: resistência de aterramento do poste; Rc: resistência de aterramento do consumidor;
C: carga; PR's: pára-raios do primário do transformador; T: transformador.

Em todas as simulações realizadas foi considerada a presença de pára-raios junto ao transformador e nas extremidades da linha primária (3,75 km de cada lado). As chaves mostradas na Figura 4.2 representam os isoladores (em que pode haver ocorrência de disrupções) e são conectadas sempre entre os condutores (primário, secundário e neutro) e a terra, através da resistência de aterramento. Estão representados os condutores típicos utilizados nas redes primária, secundária e neutro.

Podem ser geradas inúmeras possibilidades de casos combinando-se os parâmetros de interesse tais como: valor de pico, forma de onda e ponto de descarga da corrente de descarga (I), resistências de aterramento dos postes e consumidores (Rp e Rc) e valores e tipos de carga.

Nas simulações deste trabalho a corrente de descarga (I) foi representada por uma onda triangular com tempo de frente de 2 μs, tempo até o meio valor de 80 μs e valor de pico 45 kA [17] injetada no ponto da rede primária a 90 metros à direita do transformador (ver Figura 4.1). Foi adotado 100 Ω como valor das resistências de aterramento Rp e Rc.

Foram representadas as seguintes condições de aterramento: resistências de aterramento dos postes aterrados francamente (a cada 300 m da rede primária); resistência de aterramento de postes não aterrados francamente (concreto e ferragens) e resistência de aterramento de consumidores conectados à rede. As resistências são concentradas e representam o valor equivalente do trecho em que estão ligadas. A impedância de postes

de concreto não aterrados francamente foi adotado 2 vezes maior que a dos postes com hastes de terra.

As cargas das instalações residenciais (C) ligadas entre fase e neutro foram representadas pelos modelos apresentados no Capítulo 3 e ainda simuladas por resistências, capacitâncias e indutâncias de diferentes valores.

O principal objetivo destas simulações é fornecer uma avaliação comparativa dos resultados obtidos para as sobretensões na rede de baixa tensão em função dos diferentes modelos para representação das instalações residenciais. Assim, elaborou-se uma lista de casos simulados na Tabela 4.1. O casos A1 a A6 contemplam as simulações utilizando os modelos desenvolvidos no Capítulo 3; os casos A7 e A8 utilizam diferentes valores de resistências como representação do consumidor [17]; o caso A9 utiliza o modelo sugerido em [24] e finalmente o caso A10, como em [7], representa os consumidores por uma capacitância.

Nos pontos de entrada dos consumidores não foram simuladas as ocorrências de disrupções, dada a diversidade de possibilidades de se construir os ramais de ligação dos postes às residências e outros fatores determinantes no nível de isolamento desses pontos. Os valores calculados devem ser encarados, portanto como prospectivos.

Tabela 4.1 - Lista dos casos simulados.

Caso	Representação Consumidor
A1	INST1
A2	INST2
A3	INST3
A4	INST4
A5	INST5
A6	Figura 3.39
A7	30 Ω
A8	100 Ω
A9	Figura 2.8
A10	4 nF

As figuras a seguir mostram resultados das simulações realizadas com o intuito de se obter informações a respeito da sensibilidade dos resultados em função dos modelos para representação das instalações residenciais.

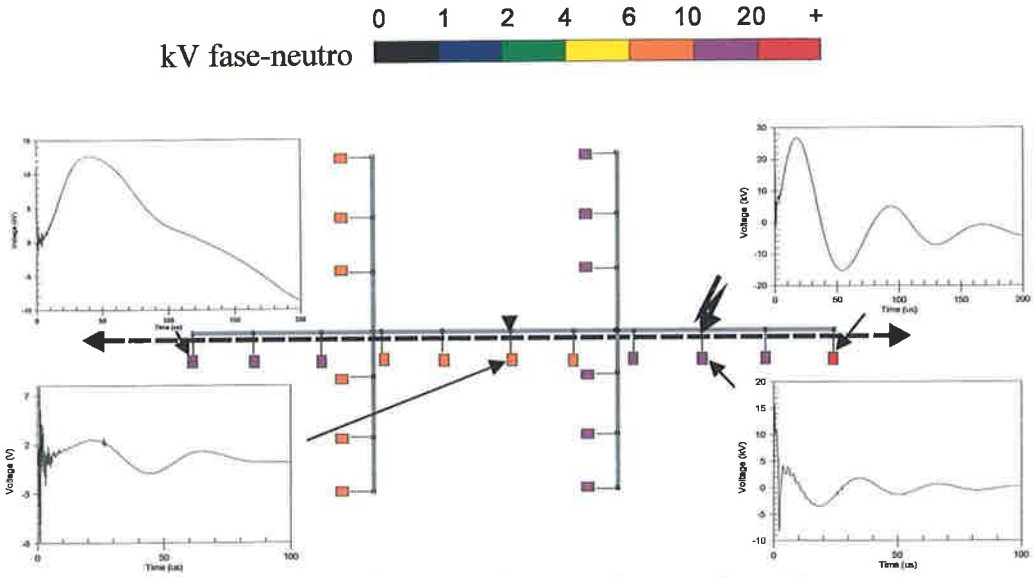


Fig. 4.3: Resultados de simulação para o Caso A1.

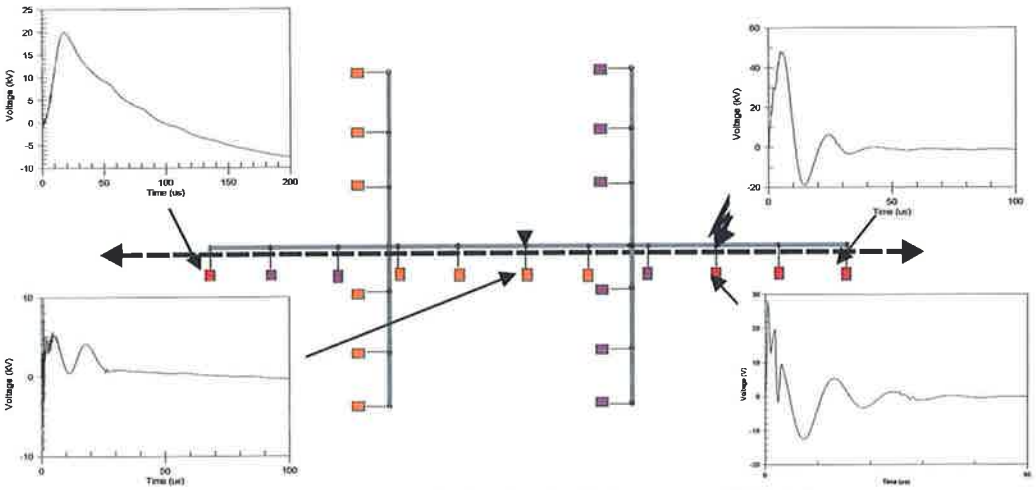


Fig. 4.4: Resultados de simulação para o Caso A2.

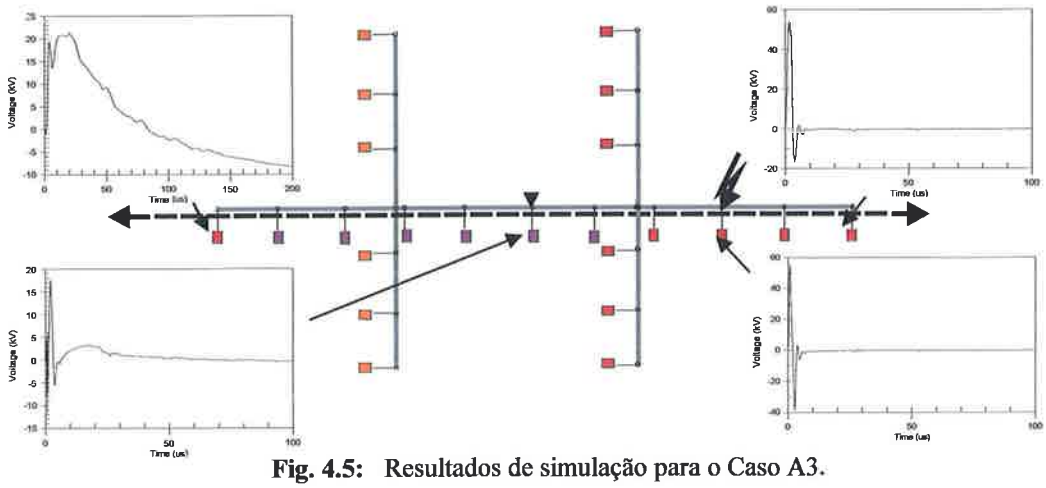


Fig. 4.5: Resultados de simulação para o Caso A3.

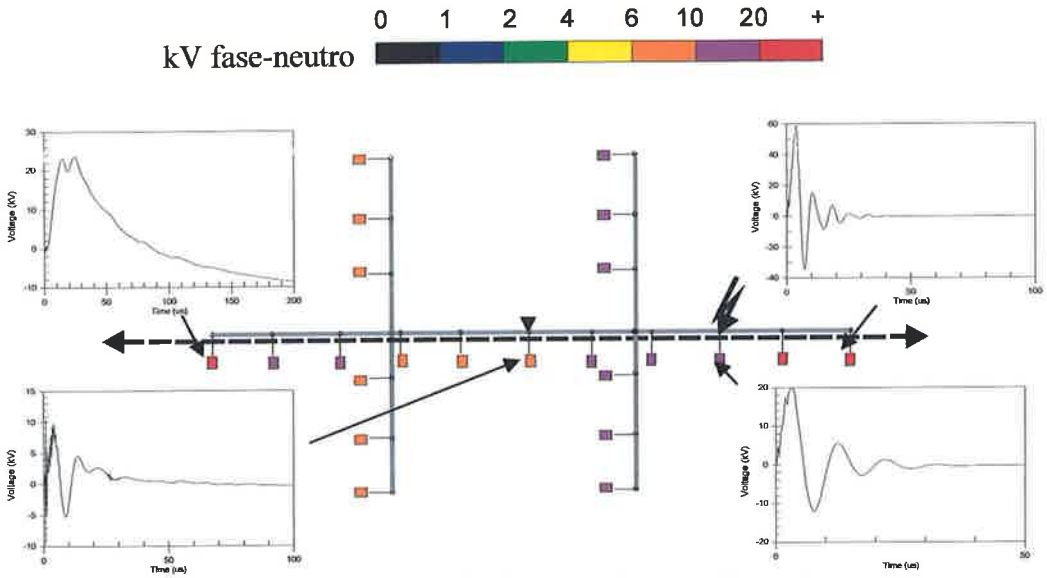


Fig. 4.6: Resultados de simulação para o Caso A4.

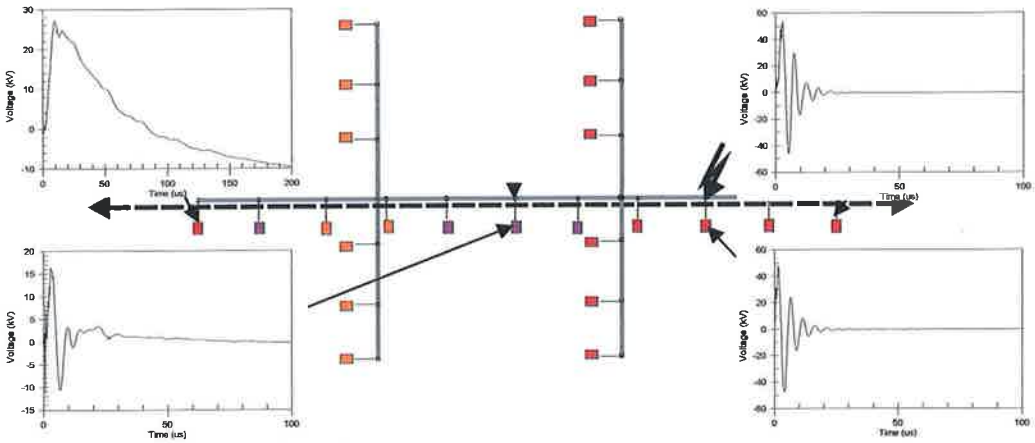


Fig. 4.7: Resultados de simulação para o Caso A5.

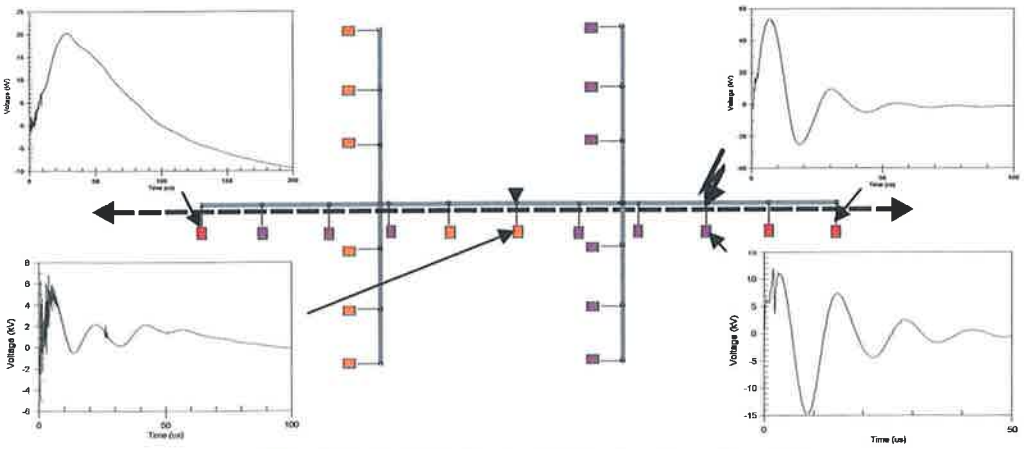


Fig. 4.8: Resultados de simulação para o Caso A6.

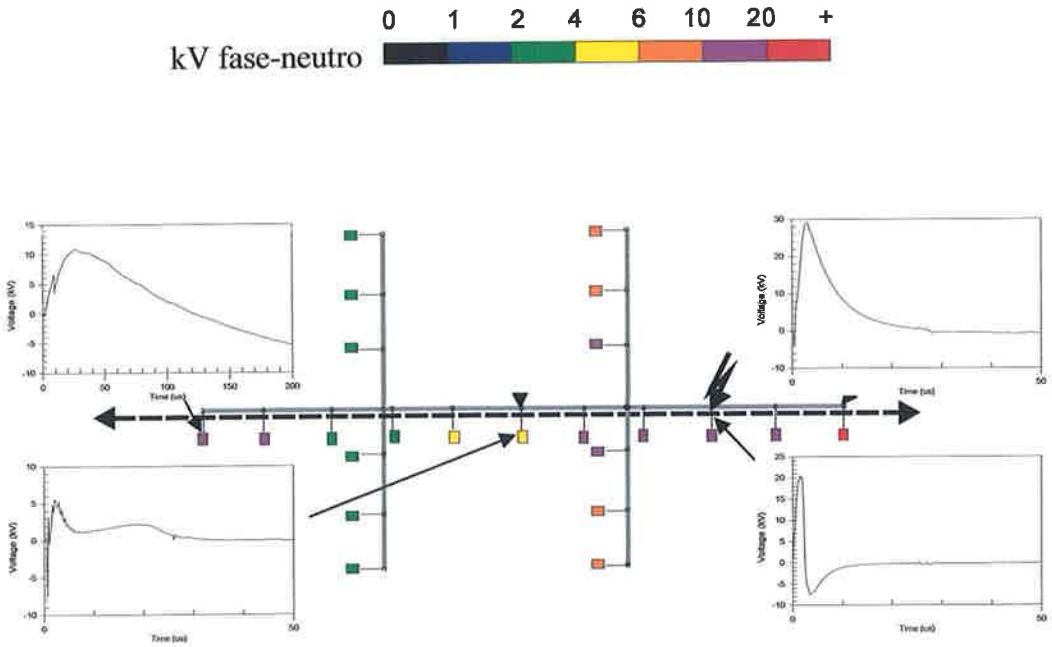


Fig. 4.9: Resultados de simulação para o Caso A7.

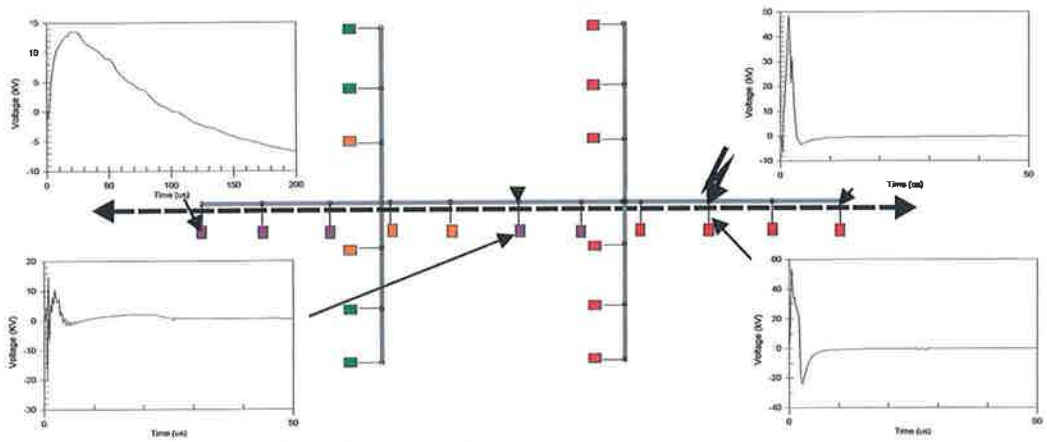


Fig. 4.10: Resultados de simulação para o Caso A8.

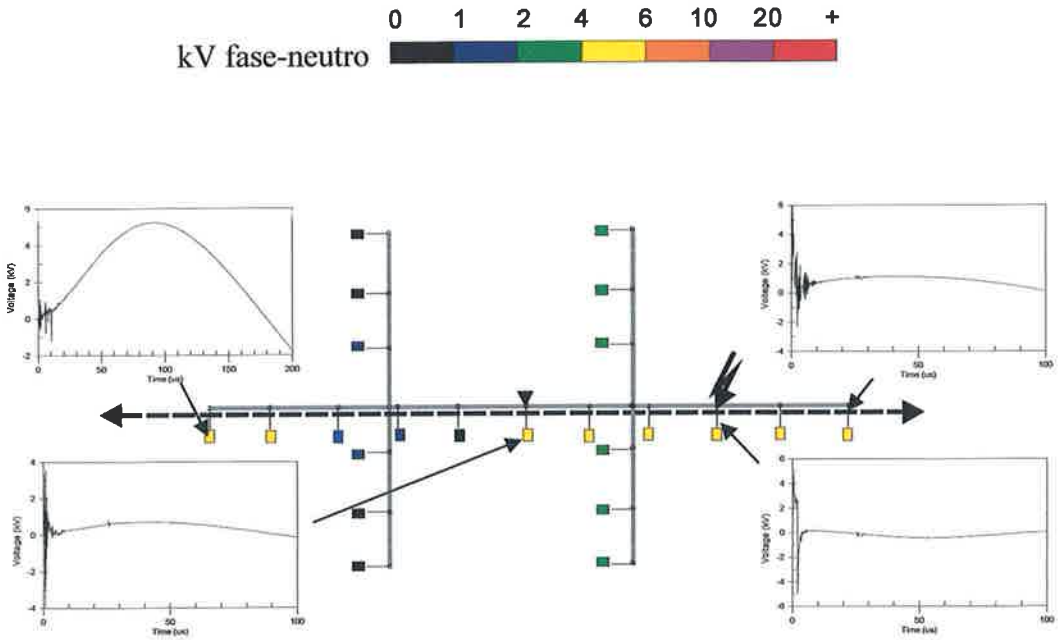


Fig. 4.11: Resultados de simulação para o Caso A9.

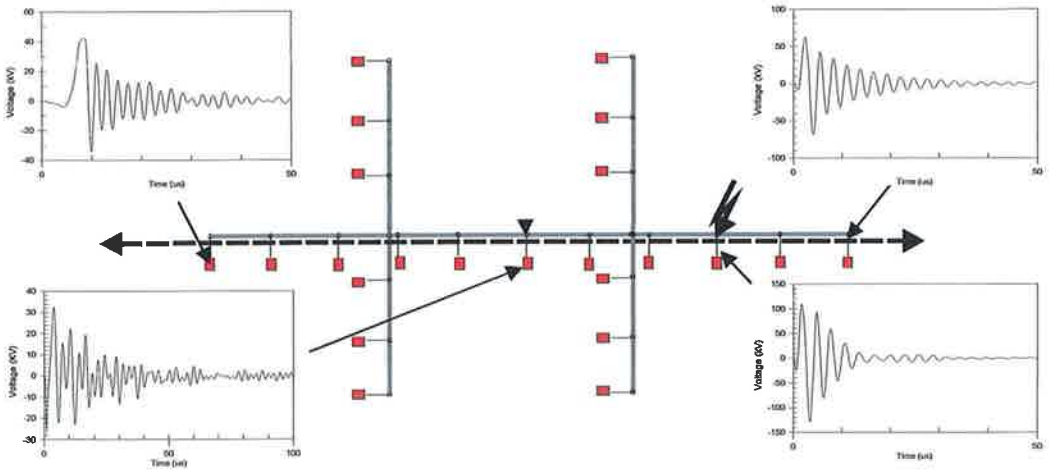


Fig. 4.12: Resultados de simulação para o Caso A10.

4.2 Simulação de surtos em instalação

Como aplicação dos modelos dos equipamentos eletro-eletrônicos apresentados no Capítulo 3, destaca-se a possibilidade de sua utilização na simulação de surtos e avaliação de sobretensões nos pontos desses equipamentos na instalação e se os valores superam sua suportabilidade. Além disso, permite que a efetividade de topologias, combinações e características de dispositivos de proteção contra surtos, presentes ou a serem instalados, seja mais bem avaliada.

Quando do estudo de surtos e sobretensões internas em uma instalação, os condutores utilizados devem ser convenientemente representados, sendo que as possibilidades de representação são (do modelo mais simples ao mais elaborado):

a) resistência;

b) indutância;

c) cascata (*ladder*) de seções com elementos RLC concentrados;

d) linha de transmissão ideal, sem perdas;

e) linha de transmissão com perdas ôhmicas;

f) linha de transmissão com perdas ôhmicas e efeito pelicular.

Cada uma das formas de representação tem limitações que podem se justificar dependendo da simplicidade, aplicação, comprimento dos circuitos e freqüências dos sinais a serem estudados.

Em [13], por exemplo, os autores utilizaram indutância concentrada para representação dos condutores com valor típico de 1 μH/m.

Já em [38] é empregada cascata de seções RLC para representação das linhas de energia. Utilizando ponte de impedâncias, os autores fizeram medições dos valores de resistência, capacitância e indutância em um trecho de 3 metros de condutores fase, terra e neutro como visto na Figura 4.13.

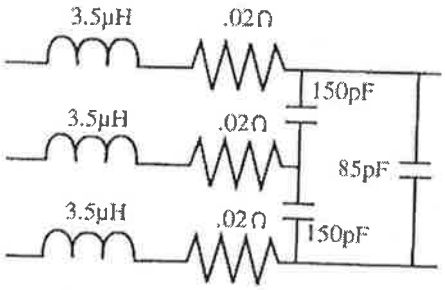


Fig. 4.13: Modelo empregado para os condutores de uma instalação em [38].

Em [12] o autor utilizou modelo de linha de transmissão ideal para representação dos ramais internos de uma instalação terminados com valores concentrados de capacitância, indutância ou resistência representando os equipamentos conectados, como mostrado na Figura 4.14.

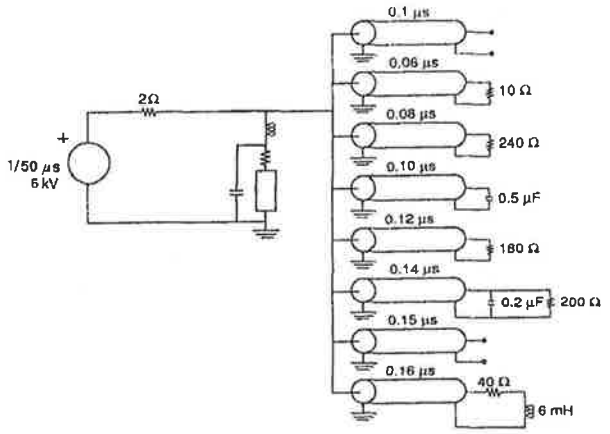


Fig. 4.14: Modelo empregado para os condutores de uma instalação em [12].

Em estudo similar [39] o autor utilizou resistências concentradas para modelar os condutores à razão de 1Ω para cada microssegundo de tempo de trânsito do sinal no circuito.

Em [40] o autor apresenta um trabalho comparando diversos modelos de representação dos condutores em um estudo de coordenação de dispositivos de proteção dentro de uma instalação, como visto na Figura 4.15. O autor recomenda o uso do modelo de linha de transmissão (completo), com perdas, incluindo efeito pelicular para cálculos mais precisos. Entretanto, aponta nos resultados obtidos que a diferença entre o modelo de linha "completo" e uma linha apenas com perdas ôhmicas não é significativa no estudo em questão.

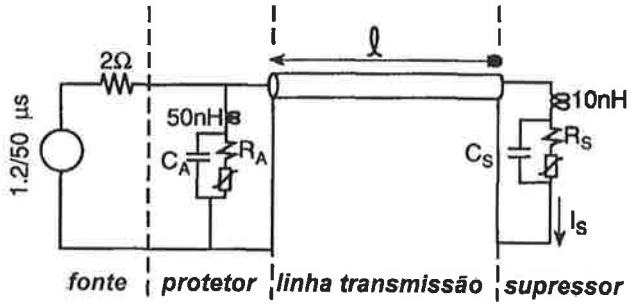


Fig. 4.15: Modelo estudado para avaliação de modelos de linha de transmissão (condutores) (adaptada de [40]).

Neste trabalho foi empregado o modelo de linha de transmissão com perdas ôhmicas mostrado na Figura 4.16 e disponibilizado com facilidade de implantação no programa *Pspice*. Para sua utilização são necessários os parâmetros por unidade: R (resistência), L (indutância), G (admitância) e C (capacitância), como mostrado na Figura 4.4.

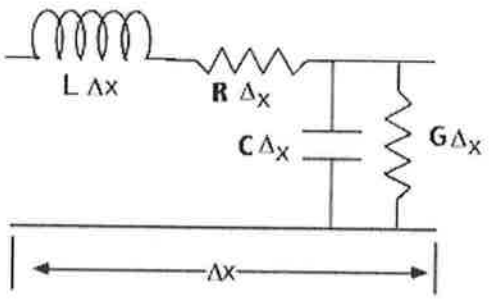


Fig. 4.16: Parâmetros do modelo de linha de transmissão (condutores).

As perdas no meio isolante são devidas à condutividade e à polarização. No caso de condutores de PVC as perdas dielétricas são pouco importantes quando as freqüências envolvidas são menores que 100 MHz [41]. Assim o valor de admitância G torna-se desprezível.

Medições com ponte de impedâncias no laboratório de Alta Tensão do IEE-USP em condutores de seção 2,5 mm^2 comumente utilizados em instalações residenciais apresentaram os seguintes valores: C = 49,8 pF/m; L=1,1 μH/m e R=8,9 mΩ/m. Como os parâmetros acima sofrem variações em função da seção nominal dos condutores, valores típicos foram adotados nas simulações.

R = 0,01 Ω/m; L = 1 μH/m e C = 50 pF/m.

Foram realizadas simulações representando-se uma instalação típica com circuitos e diversos equipamentos conectados como mostrado na Figura 4.17. A fonte de surto será representada por uma fonte de tensão em série com impedância (Rs).

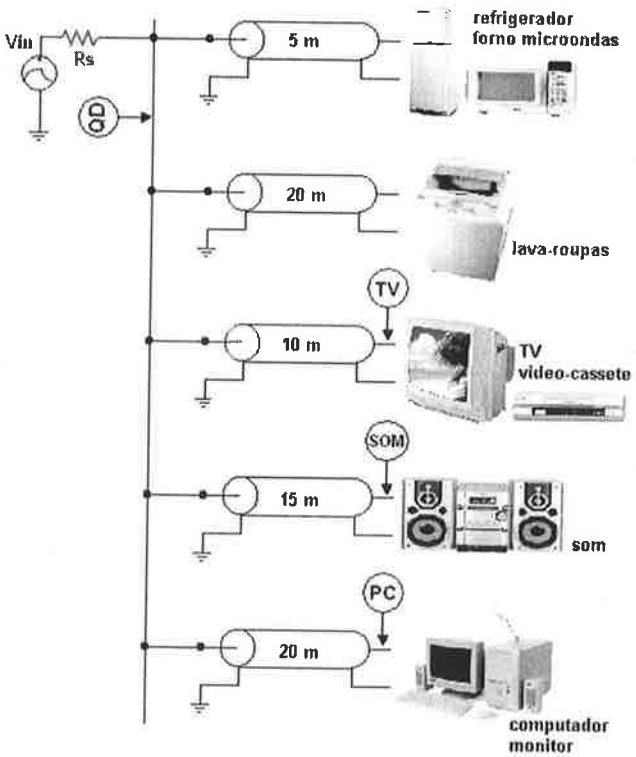


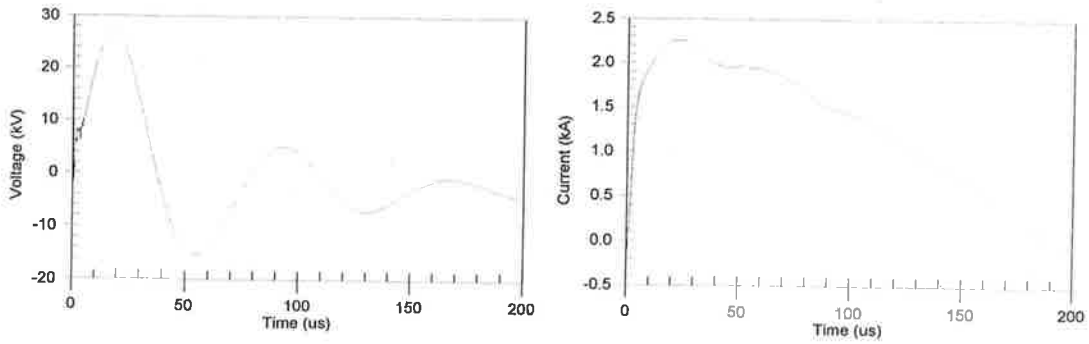
Fig. 4.17: Representação da instalação simulada.

4.2.1 Simulação de surtos na instalação - Caso B1

Para avaliação de propagação dos surtos na instalação foi realizado estudo de injeção de uma sobretensão obtida nas simulações do item 4.1.

A Figura 4.18(a) mostra a forma de onda de tensão calculada no Caso A1, na extremidade à direita.

A impedância *Rs* da fonte (Figura 4.17) deve apresentar um valor adequado tendo em vista que representa o ponto entre a rede secundária e a instalação consumidora. O mesmo Caso A1 foi então simulado substituindo-se o valor da impedância do consumidor por um curto-circuito, obtendo-se a corrente de curto-circuito no ponto de interesse, mostrada na Figura 4.18(b).



(a) (b)

Fig. 4.18: Formas de onda de tensão (a) e corrente de curto-circuito (b) do Caso A1

Da relação entre o valor máximo de tensão no ponto (26,86 kV) e do máximo valor de corrente de curto-circuito (2,26 kA) temos um valor de impedância "equivalente" de 11,9 Ω. Buscando-se um valor notável e conservativo, foi utilizado então valor de 10 Ω para a resistência *Rs*.

A Figura 4.19 mostra as tensões calculadas no ponto de entrada ou quadro distribuição (QD) e nos circuitos com equipamentos supostamente mais sensíveis: televisor e vídeo (TV), conjunto de som (SOM) e microcomputador juntamente com monitor de vídeo (PC). É possível visualizar que, nesse caso, a forma de onda de tensão da entrada é aplicada praticamente sem atenuação aos circuitos internos.

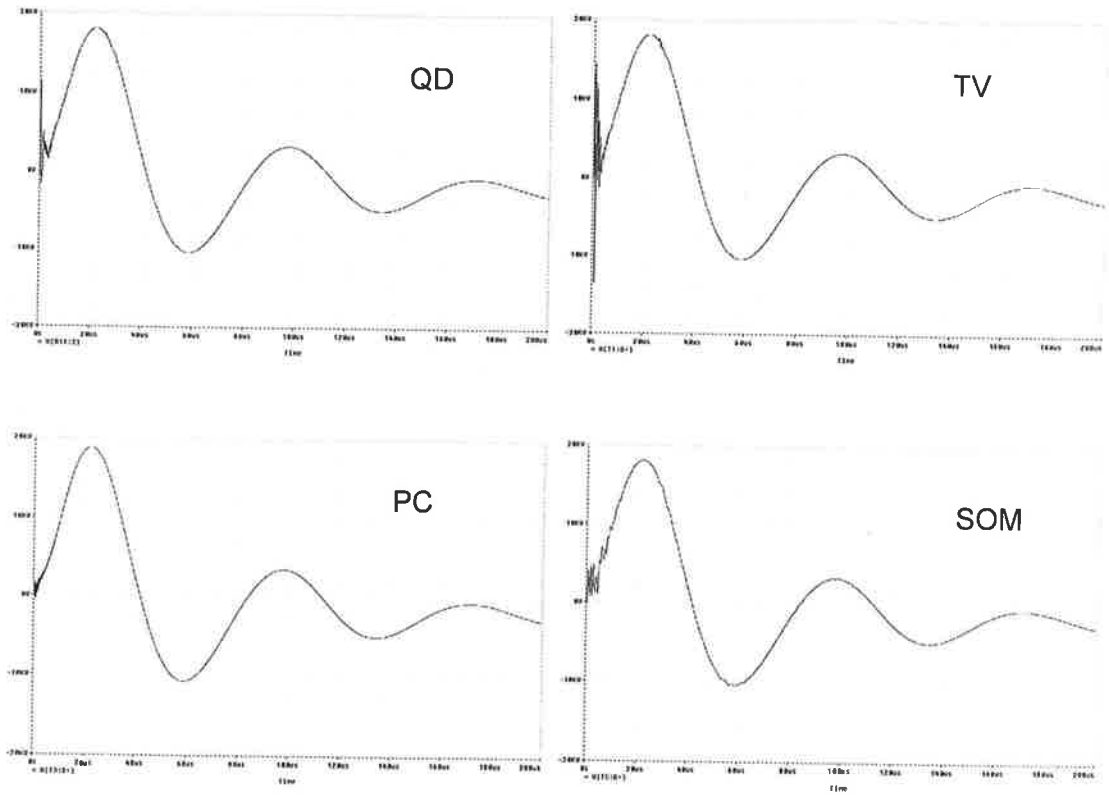


Fig. 4.19: Resultados da simulação Caso B1.

4.2.2 Simulação de surtos na instalação - Caso B2

O caso B1 anterior foi simulado acrescentando-se no ponto do quadro geral de distribuição (QD) um varistor, com tensão nominal 250 V. As tensões calculadas nos diversos pontos da instalação estão mostradas na Figura 4.20.

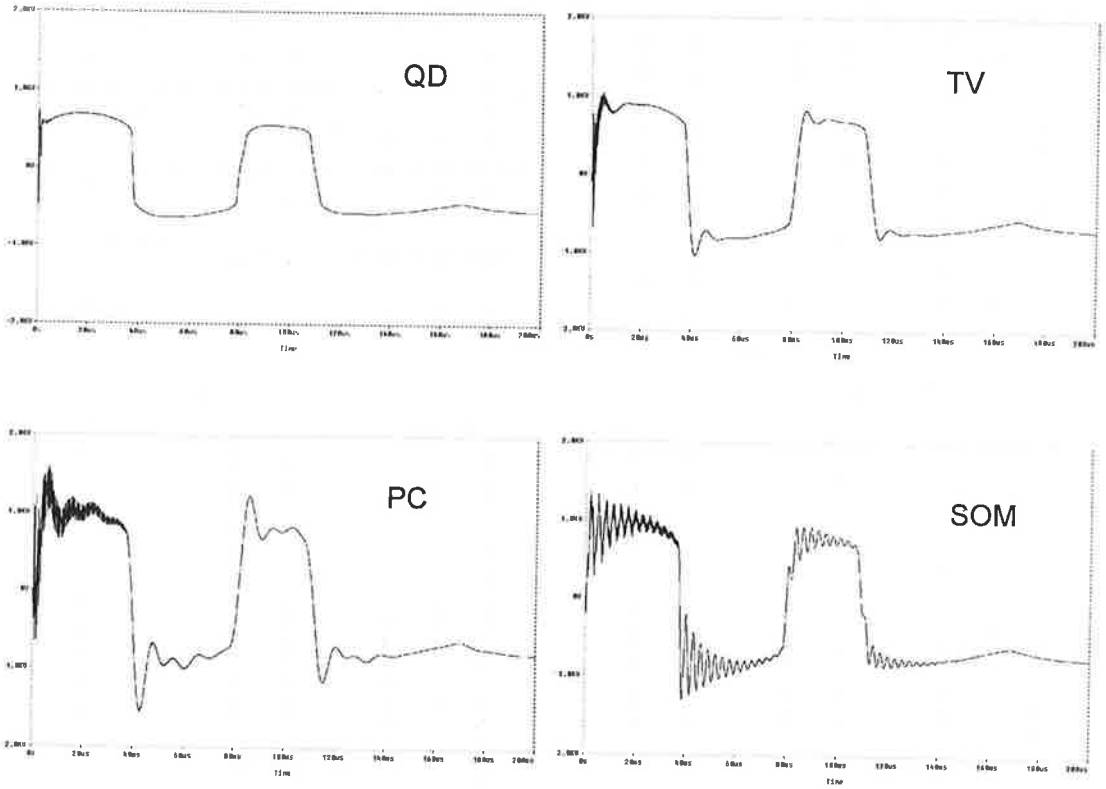


Fig. 4.20: Resultados da simulação Caso B2.

Pode-se notar claramente que o efeito de limitação da tensão na entrada da instalação, promovido pelo varistor, fica bastante comprometido nos finais dos circuitos onde encontram-se os equipamentos. O computador pessoal, por exemplo, ficaria submetido a tensões superiores a 1,2 kV, o que certamente provocaria danos.

4.2.3 Simulação de surtos na instalação - Caso B3

No caso anterior foi verificado que mesmo havendo um dispositivo de proteção instalado na entrada, sua tensão de limitação não será garantida em todos os pontos da instalação. O Caso B3 apresenta então a simulação da inclusão de outro varistor junto ao ponto do microcomputador, com mesma tensão nominal do varistor de entrada. As tensões calculadas nos diversos pontos da instalação estão mostradas na Figura 4.21.

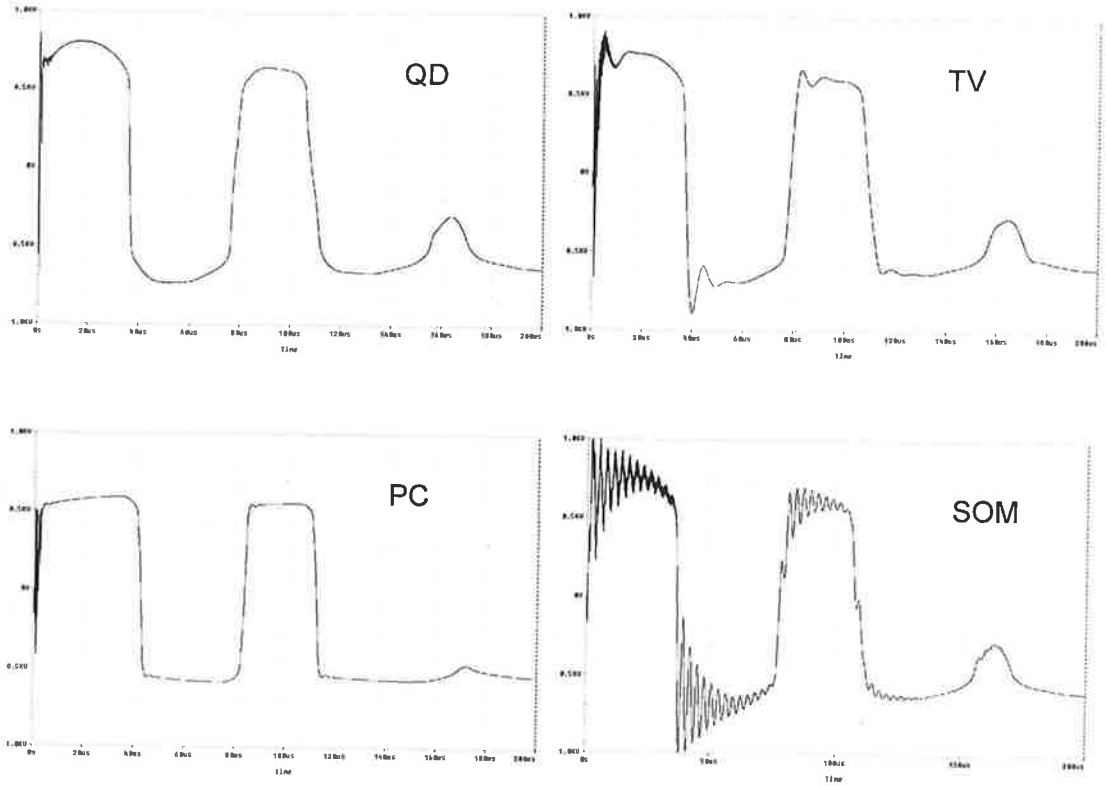


Fig. 4.21: Resultados da simulação Caso B3.

Vê-se que a inclusão do varistor junto ao microcomputador garantiu sua proteção. Adicionalmente, houve redução das sobretensões nos outros pontos que permaneceram todos com valor de pico abaixo de 1 kV.

4.3 Comentários

Dos resultados das simulações de surtos na rede secundária pode-se observar a sensibilidade dos resultados em função dos modelos de instalações utilizados.

Observando-se os resultados nos casos A1 a A6, em que foram simulados os diferentes modelos de instalações apresentados neste trabalho, nota-se relativamente maior divergência de valores e formas de onda em pontos próximos ao ponto de injeção de descarga. Para pontos mais distantes, os valores de pico e as formas de onda das sobretensões se aproximam muito mais razoavelmente entre si. Nos demais casos simulados percebe-se grande dispersão de valores em todos os pontos da rede.

Ressalte-se a grande a divergência dos resultados quando se comparam os modelos das instalações reais e os modelos mais simplificados existentes na literatura. Como destaque, no caso A10, que utiliza um valor de capacitância para representação das instalações, resultaram formas de onda extremamente oscilatórias bastante diferentes dos demais casos, evidenciando uma inadequação. O caso A9, por sua vez, que utiliza um modelo de instalação apresentado em [24], não apresentou concordância de valores em nenhum ponto da rede em relação aos casos que utilizaram os modelos desenvolvidos neste trabalho.

Vale notar que os resultados obtidos utilizando o modelo geral da Figura 3.39 se aproximam bastante do comportamento obtido nas simulações utilizando os modelos das instalações reais. Como ilustração, a Figura 4.22 mostra a porcentagem de pontos em que cada modelo avaliado (Casos A6 a A10) resultou na mesma faixa de sobretensão dos resultados obtidos utilizando os modelos das instalações reais (Casos A1 a A5).

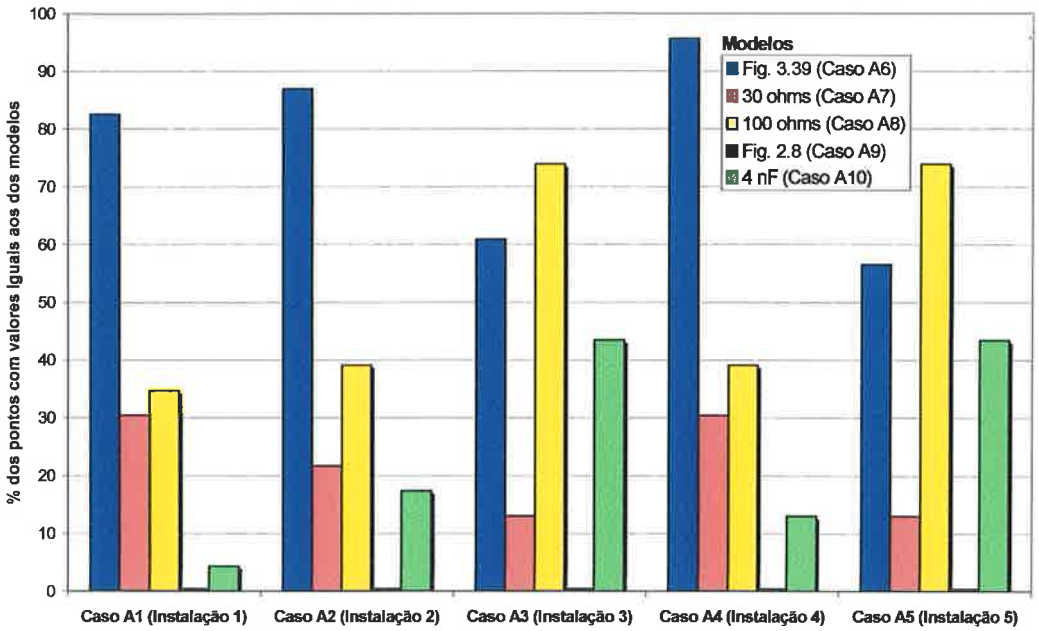


Fig. 4.22: Avaliação do desempenho dos modelos de instalação simulados.

Por inspeção na Figura 4.22 observa-se que em pelo menos 50% dos pontos da rede, em cada um dos casos A1 a A5, o modelo geral apresenta mesma faixa de sobretensão. Por exemplo, analisando-se os resultados do Caso A4, 22 dos 23 pontos da topologia estudada (96%) apresentam valores na mesma faixa de sobretensão que os obtidos no Caso A6 (o caso que utiliza o modelo geral).

Os modelos apresentados nas figuras 2.8 (utilizado no caso A9) e 3.39 (utilizado no caso A6) apresentam a mesma topologia, porém valores significantemente diferentes. Dessa grande diferença de valores resulta grande divergência resultados obtidos. Vale lembrar que o modelo da Figura 2.8, apresentado em [24] reflete a avaliação de apenas uma instalação, na Noruega, com práticas de instalações diferentes e eventualmente diferenças construtivas também entre os equipamentos eletro-eletrônicos em relação ao Brasil.

Foram realizadas também simulações para avaliação de sobretensões propagando-se internamente às instalações. Dos resultados das simulações realizadas é possível verificar que oscilações podem ocorrer em uma instalação. A amplitude dessas oscilações dependerá dos parâmetros dos circuitos e cargas conectadas, podendo atingir valores muito superiores aos valores aplicados à entrada, especialmente no caso de haver dispositivo de proteção, pois sua tensão de limitação praticamente submete a instalação a um degrau de tensão. Isso faz com que a tarefa de proteção efetiva de equipamentos sensíveis venha exigir a instalação de protetores adicionais.

CAPÍTULO 5

COMENTÁRIOS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresenta um estudo acerca da caracterização dos componentes situados na porção final do sistema de distribuição de energia elétrica, os equipamentos eletro-eletrônicos e instalações residenciais, e sua resposta a surtos associados a descargas atmosféricas.

A avaliação computacional da propagação e das oscilações resultantes nas entradas das instalações em uma rede secundária de distribuição ou ainda dentro de uma instalação é bastante dependente dos modelos utilizados justificando, portanto, o uso de modelos realísticos.

Dada a extrema diversidade de configurações e tipos de equipamentos, este trabalho procurou refletir situações típicas. Os modelos apresentados têm como característica principal a simplicidade, sem que seja comprometido seu desempenho, importante quando se considera sua inserção em programas de simulação de transitórios.

Os equipamentos eletro-eletrônicos ensaiados apresentaram boa concordância em suas curvas de impedância de entrada, o que confere maior aderência dos modelos sugeridos aos grupos de equipamentos mais comumente encontrados nas instalações residenciais. As curvas de impedância de entrada das instalações, por outro lado, apresentaram maior dispersão. Uma característica comum, porém, pode ser observada, com uma predominância de comportamento capacitivo, para freqüências de poucas centenas de kHz, e efeito predominantemente indutivo para freqüências acima de 1 MHz.

Com os modelos das instalações desenvolvidos, pequenas redes RLC, espera-se que as tensões resultantes nos pontos de inserção do modelo sejam oscilatórias, ou ainda mais oscilatórias, em comparação a uma simples representação da instalação residencial por um resistor.

Como foi visto, uma instalação ou equipamento apresenta comportamento que pode ser representado por modelos com elementos RLC, de forma que resultam em tensões oscilatórias nas instalações, o que não ocorre no caso de representação muito simples, com um resistor, por exemplo. Entretanto, é comum definir por normas internacionais [27, 33] formas de onda unidirecionais para representação dos surtos nas entradas das instalações consumidoras. Isso fica bem evidenciado em [33], que define categorias de localização de uma instalação elétrica, como mostrado na Figura 5.1. Basicamente, as categorias representam localizações na instalação a partir da entrada até pontos mais distantes da mesma. A categoria de localização C é a com maior probabilidade de

exposição a surtos de maior intensidade, seguida pela categoria B e, finalmente, a categoria A.

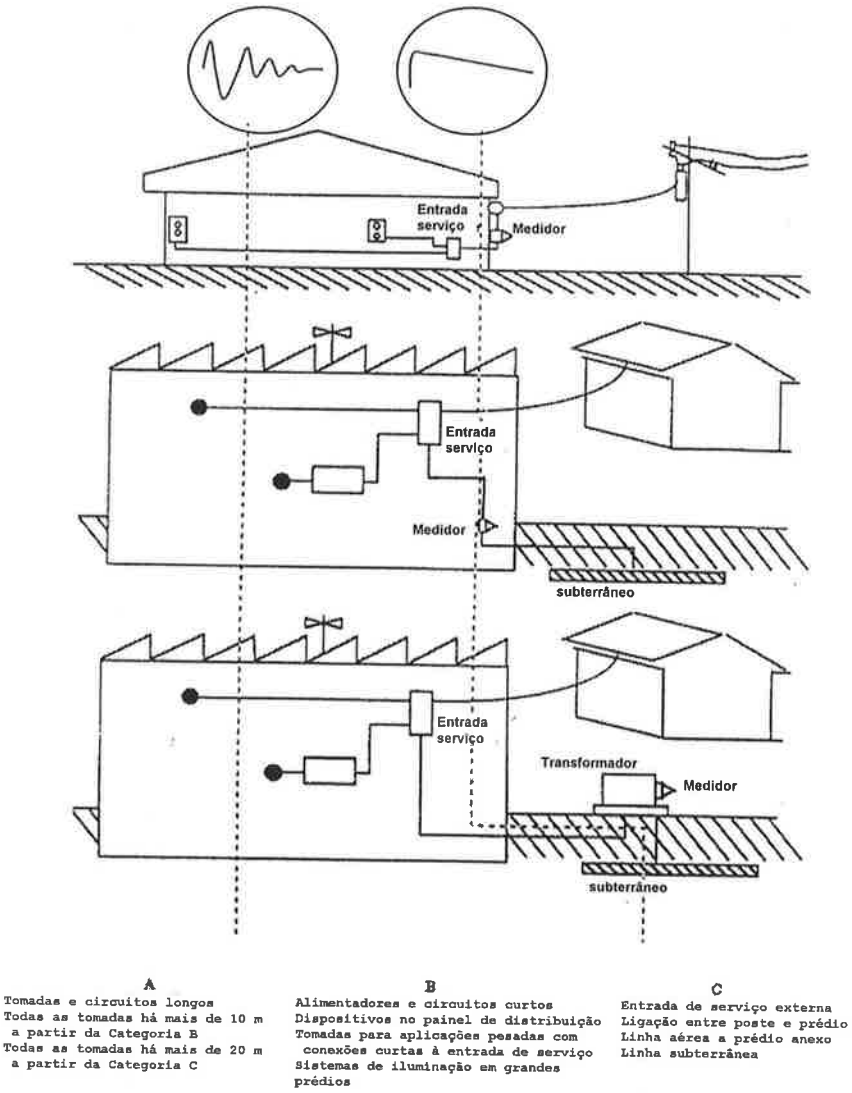
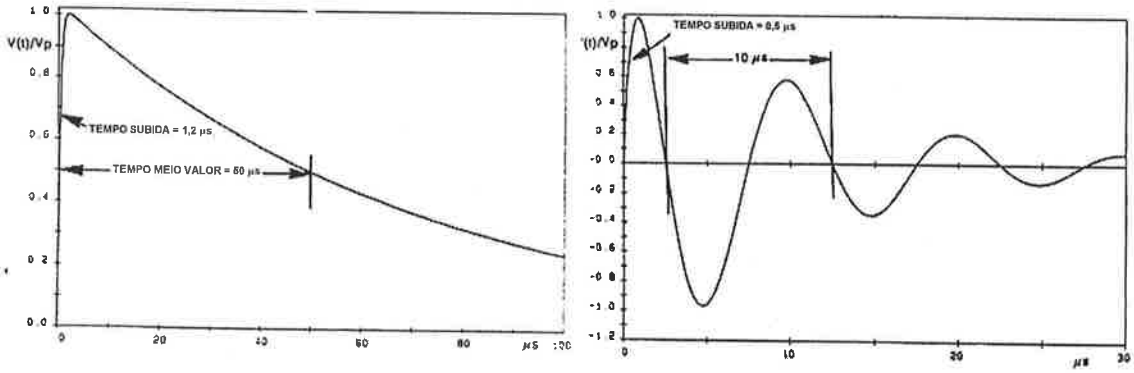


Fig. 5.1: Localização das categorias na instalação (adaptada de [33]).

Assim, definem-se para cada categoria de localização, formas de ondas representativas a que, em tese, os equipamentos presentes estariam submetidas. Duas formas de onda normalizadas [27,33] encontram-se mostradas na Figura 5.2. A primeira, uma forma de onda unidirecional, associada a surtos de maior energia na entrada da instalação é

comumente utilizada em ensaios dielétricos; apresenta tempo de frente 1,2 μs e o tempo até metade do valor de crista 50 μs. A segunda forma de onda, oscilatória, seria em princípio resultante das oscilações causadas pela interação de ondas unidirecionais na entrada com as capacitâncias e indutâncias da própria instalação, uma onda denominada *Ring Wave*, com freqüência de oscilação 100 kHZ. A Tabela 5.1 mostra a seleção da forma de onda representativa em função da localização das categorias dentro da instalação.



(a) (b)

Fig. 5.2: Formas de onda normalizadas. a) 1,2/50 b) *Ring Wave* 100 kHz (adaptada de [33]).

Tabela 5.1 – Aplicação das formas de onda para as diferentes categorias [33]

Categoria	Ring Wave 100 kHz	Onda 1,2/50 μs
A	aplica-se	não se aplica
B	aplica-se	aplica-se
C	não se aplica	aplica-se

Nota-se que as normas relativas associam apenas surtos unidirecionais aos pontos próximos à entrada da instalação. Tal situação não se verifica, por exemplo, observando-se os resultados das simulações. Em verdade, a entrada da instalação consumidora representa um ponto dentro do complexo sistema de distribuição com um sem número de redes e componentes RLC. Devem, portanto, ocorrer ondas oscilatórias junto ao ponto de entrada da instalação consumidora o que justificaria a avaliação do comportamento, imunidade e suportabilidade, dos equipamentos submetidos a esses impulsos.

Uma das questões que surgiram ao longo do desenvolvimento do trabalho refere-se justamente à vulnerabilidade de equipamentos eletrônicos a surtos. É altamente provável que os fabricantes realizem avaliações dos efeitos dos surtos em seus produtos. Entretanto, os resultados dessas avaliações ou ensaios não são divulgados e permanecem mantidos sob sigilo de marca. Se não o fazem, especialmente no Brasil revela-se um fato ainda mais grave, pois demonstra o desinteresse pelo assunto e de certo modo aos consumidores. Se tais informações fossem disponibilizadas seriam de extrema valia à comunidade, tanto para usuários, como a concessionárias de energia, projetistas e instaladores.

As sobretensões internas nas instalações, assim como nos outros pontos da rede de distribuição, são dependentes, dentre outros fatores, do valor de crista e da forma de onda dos surtos, do comprimento e da topologia dos circuitos e dos equipamentos

conectados. Os modelos desenvolvidos e apoiados em ensaios reais de dispositivos eletro-eletrônicos foram utilizados em simulações computacionais para avaliação da propagação dos surtos em uma instalação com dimensões e equipamentos tipicamente encontrados no Brasil. Quando uma tensão com forma de onda íngreme, como a resultante da tensão residual em um varistor, é aplicada à entrada da instalação, a combinação das impedâncias dos equipamentos e dos componentes da rede pode resultar em oscilações com valores superiores aos níveis admissíveis de sobretensões dos equipamentos nos diversos pontos da instalação exigindo, portanto, instalação de diversos dispositivos de proteção.

Esses dispositivos de proteção eventualmente com diferentes características protetivas e de suportabilidade de energia necessitam funcionar de maneira coordenada, ou seja, os dispositivos de maior capacidade operam drenando as grandes porções das correntes de surtos antes que os de menor capacidade o façam. Estes estudos de coordenação atualmente podem ser muito bem realizados através de simulações computacionais e inserindo-se também, por exemplo, os modelos aqui apresentados para representação efetiva dos equipamentos presentes nas instalações.

Em suma, pretendeu-se com este trabalho oferecer contribuições aos estudos de sobretensões em redes secundárias e em seus componentes, quais sejam as instalações e equipamentos conectados. Foram agregadas informações sobre o assunto, com o

desenvolvimento de modelos mais completos, que foram aplicados em simulações, discutindo-se os resultados.

Apesar do avanço em termos de informações sobre modelagem aqui apresentadas, a diversidade e complexidade de possibilidades envolvendo os circuitos de baixa tensão suscitam sempre a extensão dos estudos. Nesse sentido propõem-se outros trabalhos sistematicamente estabelecidos para agregarem ainda mais informações das características dos componentes nas redes de baixa tensão: estudos com simulações computacionais envolvendo variações e combinações estatísticas dos modelos dos equipamentos e instalações apresentados; extensão das medições realizadas com aprimoramento de instrumentação de medição para coleta de dados de campo das características de instalações residenciais ou comerciais; avaliação mais extensiva de suportabilidade e imunidade de diversos equipamentos e análises dos danos causados em função do tipo de evento; meios e dispositivos para monitoração e registro de índices de qualidade de energia focando-se surtos e transitórios nas redes e instalações de baixa tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MCMILLEN, C.J.; CAVERLY, D.W; SCHOENDUBE, C.W. Scaled low-voltage side surge current tests on a model distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 3, n. 2, April 1988, p. 655-661.

[2] MCMILLEN, C.J.; SCHOENDUBE, C.W.; CAVERLY, D.W. Susceptibility of distribution transformers to low-voltage side lightning surge failure. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, vol. PAS-101, Sept. 1982, p. 3457-3470.

[3] DUGAN, R.C.; SMITH, S.D. Low-voltage side current surge phenomena in single-phase distribution transformer systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 3, n. 2, April 1988, p. 637-645.

[4] PURI, J.L.; ABI-SAMRA, N.C.; DIONISE, T.J; SMITH, D.R. Lightning induced failures in distribution transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 3, n. 4, October 1988, p. 1784-1801.

[5] SMITH, D.R; PURI, J.L. A simplified lumped parameter model for finding distribution transformer and secondary system responses to lightning. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 4, n. 3, July 1988, p. 1921-1936.

[6] GOEDDE, G. L.; DUGAN, R.C.; ROWE, L.D. Full scale lightning surge tests of distribution transformers and secondary systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 7, n. 3, July 1992, p. 1592-1600.

[7] MIRRA, C.; PORRINO, A.; ARDITO A.; NUCCI, C.A. Lightning overvoltages in low-voltage networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), 1997, **Proceedings.** p. 2.19.1 - 2.19.6.

[8] NICHOLSON, J.R.; MALACK, J.A. RF impedance of power lines and line impedance stabilization networks in conducted interferences measurements. **IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility**, vol. EMC-15, n. 2, May 1973, p. 84-86.

[9] ONEAL, J.B. The residential power circuit as a communication medium. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, vol. CE-32, n. 3, August 1986, p. 567-577.

[10] MARUBAYASHI, G.; TACHIKAWA, S. Spread spectrum transmission on residential power line. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPREAD SPECTRUM TECHNIQUES AND APPLICATIONS, 1996, **Proceedings.** p. 1082-1086.

[11] HUSE, J. Lightning surge protection in low-voltage electric power distribution systems, including consumers installations and equipment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION (SIPDA), 1999, São Paulo. **Proceedings.** p.325-361.

[12] STANDLER, R.B. Coordination of surge arresters and supressors for use on low-voltage mains. In: 9TH INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON EMC, March 1991, Zurich. **Proceedings.** paper 98N5, p.517-524.

[13] HOSFET, O.T.; HERVLAND, T.; HANSEN, B.; HUSE, J. Coordination of surge protective devices in power supply systems needs for secondary protection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 1992, Berlin. **Proceedings** p. 381-386.

[14] CIRED/CIGRE Working Group 05 Protection of MV and LV networks against lightning. Part I: Basic information. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), June 1997, **Proceedings.** p. 2.21.1 - 2.21.7.

[15] MARZ, M.D.; MENDIS, S.R. Protecting load devices from the effects of low-side surges. **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 29, n. 6, November 1993, p. 1196-1203.

[16] BASSI, W.; JANISZEWSKI, J. M Evaluation of currents and charges in low-voltage surge arresters due to lightning strikes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 18, n. 1, Jan 2003, p. 90-94.

[17] BASSI, Welson **Estudo de surtos em redes secundárias de distribuição devido a descargas atmosféricas diretas na rede primária.** São Paulo, 1999, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[18] BASSI, W.; PIANTINI, A.; MATSUO, N. M. Evaluation of currents and charge in surge protective devices in low-voltage distribution networks due to direct lightning strikes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), Amsterdam, 2001, **Proceedings.** Paper 2-10.

[19] BASSI, W.; PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M.; MATSUO, N. M. Voltages and currents on secondary lines caused by direct lightning hits on medium voltage lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING (GROUND 2000), Belo Horizonte, 2000, **Proceedings.** p. 29-34.

[20] PIANTINI, A.; BASSI, W.; MATSUO, N. M.; JANISZEWSKI, J. M. A Simple transformer model for analysis of transferred lightning surges from MV to LV lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED), Nice, 1999, **Proceedings.**

[21] BASSI, W.; MATSUO, N. M.; PIANTINI, A. Currents and charge absorbed by low-voltage SPDs in overhead distribution systems due to lightning. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING (11TH ISH), London, 1999, **Proceedings.** v. 2, p. 2349-2352.

[22] BASSI, W.; JANISZEWSKI, J. M.; PIANTINI, A.; MATSUO, N. M. Surges in low-voltage networks due to lightning strikes in MV lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION (V SIPDA), São Paulo, 1999, **Proceedings.** p. 206-210.

[23] SILVEIRA, F.H.; VISACRO, S. Lightning induced overvoltages: Effects on consumer service entrance. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, Bologna, 2003, **Proceedings.**

[24] HOIDALEN, H. K. Lightning-induced voltages in low-voltage systems and its dependency on voltage line terminations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 1998, Birmingham. **Proceedings.** p.287-292

[25] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION **Electrical installations of buildings, Section 444: Protection against electromagnetic interference (EMI) in installations of buildings**. Geneve, 1996. (IEC 60364-444)

[26] http://www.itic.org

[27] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 4 Testing and measurement techniques. Section 5- Surge immunity test.**, Geneve,1995. (IEC 61000-4-5)

[28] ERMELER, K.; PFEIFFER, W.; SCHOEN, D.; SCHOKE, M. Surge immunity of electonic equipment. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, vol. 16, n. 2, 2000, p. 12-16.

[29] SILFVERSKIOLD, S.; THOTTAPPILLIL, R.; YE, M.; COORAY, V.; SCUKA, V. Induced voltages in a low-voltage power installation network due to lightning electromagnetic fields: an experimental study. **IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility**, Volume: 41 , Issue: 3 , Aug. 1999, p. 265 - 271.

[30] GALVAN, A.; COORAY, V.; SCUKA, V. Interaction of electromagnetic fields from cloud and ground lightning flashes with an artificial low-voltage power installation. **IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility**, Volume: 41 , Issue: 3 , Aug. 1999, p250 - 257.

[31] GALVAN, A.; COORAY, V.; THOTTAPPILLIL, R. A technique for the evaluation of lightning-induced voltages in complex low-voltage power-installation networks. **IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility**, Volume: 43 , Issue: 3 , Aug. 2001, p.402 - 409.

[32] GALVAN, A.; COORAY, V. Analysis of lightning-induced voltages in a network of conductors using the ATP-EMTP program. In: IEE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, São Paulo, 1997, **Proceedings.** p. 153-157.

[33] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. **Recommended practice on surge voltages in low-voltage AC power circuits**. New York, 2002. (IEEE C62.41)

[34] SILVA NETO, A. **Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de baixa tensão.** São Paulo, 2004, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[35] OBASE, P. F. **Surtos atmosféricos transferidos à rede secundária via transformador.** São Paulo, 2004, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

[36] SILVEIRA, F.H.; VISACRO, S. Lightning induced overvoltages: effects on consumer service entrance. In: IEEE POWER TECH CONFERENCE, Bologna, 2003, **Proceedings.**

[37] HOSFET, O.T.; HERVLAND, T.; HANSEN, B.; HUSE, J. Coordination of surge protective devices in power supply systems needs for secondary protection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 1992, Berlin. **Proceedings** p. 381-386.

[38] STRINGFELLOW, M.F. Coordination of surge suppressors in low-voltage AC power circuits. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, New Jersey, 1991, **Proceedings.** p.464-468.

[39] STANDLER, R.B. Calculations of lightning surge currents inside buildings. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Anaheim, 1992, **Proceedings.** p. 195-199.

[40] STANDLER, R.B. Transmission line models for coordination of surge-protective devices. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Dallas, 1993, **Proceedings.** p. 358-362.

[41] TANG, H.; LARSSON, A.; HOGBERG, R.; SCUKA, V. Simulation of transient protector co-ordination in a low voltage power installation network using ATP-EMTP. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Roma, 1996, **Proceedings.** p. 802-807.