



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**Contribuições para os estudos computacionais de
ressarcimento por danos elétricos: limites de
suportabilidade e induções eletromagnéticas**

Paulo Henrique Oliveira Rezende

Uberlândia
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

**Contribuições para os estudos computacionais de
ressarcimento por danos elétricos: limites de
suportabilidade e induções eletromagnéticas**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para a obtenção
do título de Doutor em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, Ph.D. - **UFU (Orientador)**
Antônio César Baleeiro Alves, Dr. - **UFG**
Olívio Carlos Nascimento Souto, Dr. - **IFG**
Aloísio de Oliveira, Dr. - **UFU**
Isaque Nogueira Gondim, Dr. – **UFU**

Contribuições para os estudos computacionais de
ressarcimento por danos elétricos: limites de
suportabilidade e induções eletromagnéticas

Paulo Henrique Oliveira Rezende

Tese apresentada por Paulo Henrique Oliveira Rezende à
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos parciais para a
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, Ph.D
(Orientador) – UFU

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Dedico este trabalho aos meus pais Ézio e Izildete, por toda à educação, compreensão e carinho, os quais tiveram papel fundamental para concretização desta tese e a formação do meu caráter. Dedico também a minha noiva Laise, que sempre me proporcionou momentos agradáveis, com todo seu amor e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma incessante a **Deus**, pela força concebida nos momentos mais difíceis para conclusão desta tese de doutorado. Ser sublime e maior o qual nos concebeu o dom da vida e a capacidade de buscar o conhecimento.

De forma especial, com muito carinho e respeito, agradeço ao meu orientador, o Professor **José Carlos de Oliveira** por toda paciência, orientação, amizade, confiança e dedicação, os quais foram fundamentais para realização deste trabalho e uma melhor formação profissional e pessoal.

Agradeço aos meus pais **Ézio e Izildete** que sempre me apoiaram e incentivaram com palavras de conforto, nos momentos de indecisões e dificuldades. A minha irmã **Jaqueline** pela confiança e credibilidade depositada em mim. Agradeço também a minha noiva **Laise** pelo carinho, companheirismo, paciência e principalmente pelas experiências trocadas ao longo de todos esses anos, fazendo com que caminhos tortuosos tornassem mais retilíneos e prazerosos.

A todos os meus familiares e amigos, em especial, aos meus avós **Hélcio e Nilza** (*In memoriam*), **Aristonides e Dinamar** que sempre me apoiaram em todas as conquistas de minha vida e ficaram muito felizes com a conquista deste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Qualidade da Energia, muitos dos quais a distância não nos separou, a saber: **Arnaldo, Fabricio, Alex, João, Diego, Vinícius, Thiago** e os presentes **Leandro, Afonso e Guilherme** pelo companheirismo, apoio, amizade e agradável convívio proporcionado nos diversos momentos de trabalho em equipe.

Aos demais colegas e professores de pós-graduação, **Aloísio de Oliveira, Antônio C. Delaiba, Carlos E. Tavares, Isaque Gondim, Ivan N. Santos, José Rubens M. Jr., José W. Resende, Marcelo L. R. Chaves, Milton I. Samesima** e pelo apoio e conhecimento que contribuíram para a conclusão desta tese.

À FAPEMIG pelo suporte financeiro em forma de bolsa.

À Direção da Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pela ajuda financeira na aquisição de alguns eletrodomésticos essenciais para a realização deste trabalho, bem como auxílio referente a todo tipo de transporte de equipamentos.

Aos profissionais envolvidos com o Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI, por possibilitar a realização de todos ensaios envolvendo geradores de impulsos, sem custo algum.

*Aquele que habita no esconderijo do Altíssimo, à sombra do Onipotente descansará.
Direi do Senhor: Ele é o meu Deus, o meu refúgio, a minha fortaleza, e nele confiarei.
Porque ele te livrará do laço do passarinho, e da peste perniciosa.
Ele te cobrirá com as suas penas, e debaixo das suas asas te confiarás; a sua verdade será o teu
escudo e broquel.
Não terás medo do terror de noite nem da seta que voa de dia.*

Salmos 91:1-5

RESUMO

Há quase quatro anos de vigência, o “Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos” do PRODIST, ainda gera muitas dúvidas e divergências sobre os processos decisórios associados com a questão do ressarcimento de danos em equipamentos elétricos instalados em unidades consumidoras. O assunto, diante da sua relevância social, da relação comercial entre fornecedores e consumidores, e ainda, da crescente demanda representa, na atualidade, tema de extrema importância. Por conseguinte, o assunto se apresenta motivado para a realização de esforços direcionados para melhor consubstanciar os processos de análise, em que pese a correlação entre causas e efeitos, classicamente denominada por nexos causais. Não obstante os avanços já obtidos quanto ao aplicativo destinado aos estudos da consistência ou não das solicitações, algumas questões específicas ainda são merecedoras de desenvolvimentos. Dentro deste contexto se insere a presente tese de doutorado, a qual se encontra direcionada para a melhoria do produto hoje existente, na forma de três contribuições ao presente estado da arte. Uma primeira, associada com a obtenção e validação de um modelo computacional para os televisores de LED, integrando, portanto, um novo dispositivo aos demais produtos já contemplados no aplicativo em questão. Uma segunda, vinculada com novas propostas dos limites de suportabilidade quanto a tensão e corrente de suprimento para equipamentos da linha branca e televisor de LED, grandezas estas de suma importância ao processo da correlação entre causas e efeitos sobre os dispositivos reclamados. E uma última contribuição, voltada para o estabelecimento das bases para a inclusão dos fenômenos atribuídos à incidência de descargas atmosféricas em pontos próximos das redes elétricas e respectivas induções eletromagnéticas.

Palavras chave: Descargas Atmosféricas Indiretas, Eletrodomésticos da Linha Branca, Limites de Suportabilidade, Pedidos de Ressarcimento por Danos Elétricos, Televisor a LED.

ABSTRACT

The Brazilian Agency ANEEL throughout the standard known as PRODIST's "Modulo 9 - Reimbursement of Electrical Damage" has been in existence for almost four years. However, the general guidelines are still generating many doubts and disagreements about the decision-making processes associated with the reimbursement of damages to electrical equipment installed in consumer units. This issue, given its social relevance, the commercial relationship between suppliers and consumers, and even the growing demand represents, at present, a subject of extreme importance. This subject has motivated a number of researches directed to better substantiate the processes of analysis, with emphasis to the relationship between causes and effects, classically called causal nexus. Notwithstanding the advances already made regarding the application for studies of the consistency or not of the requests, some specific questions still deserve development. Within this context, the present PhD thesis is inserted, which is directed to the improvement of the existing product, in the form of three contributions to the present state of the art. A first, associated with obtaining and validating a computational model for LED TVs, thus integrating a new device to the other products already contemplated in the application in question. A second, linked with new proposals the limits of supportability to the voltage and current of supply for white line equipment and LED television. These quantities are of utmost importance to the process of the correlation between causes and effects on the claimed devices. And a final contribution, aimed at establishing the bases for the inclusion of the phenomena attributed to the incidence of atmospheric discharges at points close to the electric networks and their electromagnetic inductions.

Keywords: Indirect Lightning Strikes, White Line Appliances, Supportability Limits, Electric Damage Requests, LED TV.

Sumário

Capítulo 1

Contextualização e Proposta de Avanços Para os Estudos de PIDs

1.1 Introdução.....	22
1.2 Contextualização do tema	23
1.2.1 Síntese qualitativa e quantitativa sobre PIDs a nível nacional.....	23
1.2.2 Aspectos jurídicos	27
1.3 Estado da arte sobre o tema da pesquisa	29
1.3.1 Conceitos gerais associados com Qualidade da Energia Elétrica	29
1.3.2 Normas/recomendações nacionais sobre Qualidade da Energia Elétrica.....	30
1.3.3 Sensibilidade e suportabilidade de aparelhos elétricos	30
1.3.4 Modelagem computacional de redes de distribuição e de aparelhos elétricos.....	31
1.3.5 Normas, documentos e trabalhos realizados na área de ressarcimento de danos.....	32
1.3.6 Trabalhos no contexto do fenômeno das descargas atmosféricas	34
1.3.7 Pesquisas e produtos voltados para a análise do nexso causal no âmbito da UFU.....	36
1.4 Contribuições desta proposta de tese	39
1.5 Estrutura da proposta de tese.....	40

Capítulo 2

Modelagem de Televisores a LED e Equipamentos da Linha Branca

2.1 Considerações iniciais	42
2.2 Proposta e validação da modelagem para televisores a LED	42
2.2.1 Modelo computacional do televisor a LED.....	44
2.2.2 Ensaios para validação do modelo proposto	45
2.2.3 Estrutura laboratorial utilizada	45
2.2.4 Validação do modelo computacional	46
2.2.4.1 Condições operativas ideais e nominais – Caso 01	47
2.2.4.1 Condições operativas não ideais	48
2.3 Síntese das Modelagens dos Equipamentos da Linha Branca.....	57
2.3.1 Refrigeradores	57
2.3.2 Freezers	59
2.3.3 Máquinas de Lavar Roupas	60
2.3.4 Máquinas de Lavar Louças	61
2.3.5 Condicionadores de Ar Split	63
2.4 Considerações finais.....	64

Limites de Suportabilidade Térmica

3.1 Considerações iniciais	65
3.2 Estratégia para a obtenção dos limites de suportabilidade térmica	66
3.3 Estrutura laboratorial para a obtenção dos limites de suportabilidade térmica	67
3.4 Limites de suportabilidade térmica para os produtos testados	69
3.4.1 Televisor a LED	69
3.4.2 Refrigerador	70
3.4.3 Freezer	72
3.4.4 Máquina de Lavar Roupas	73
3.4.5 Máquina de Lavar Louças	75
3.4.6 Condicionador de Ar Split	76
3.5 Considerações finais	78

Capítulo 4

Limites de Suportabilidade Dielétrica e Sensibilidade Operacional às Tensões

4.1 Considerações iniciais	80
4.2 Estratégia para a obtenção dos limites de suportabilidade dielétrica e sensibilidade operacional às tensões	81
4.2.1 Metodologia para a caracterização dos limites de suportabilidade dielétrica	81
4.2.2 Metodologia para a caracterização dos limites a sensibilidade operacional às tensões	82
4.2.3 Alguns exemplos de limites de suportabilidade dielétrica e sensibilidade operacional às tensões definidos na literatura	84
4.2.4 Estrutura laboratorial para a obtenção dos limites de suportabilidade dielétrica	88
4.2.5 Estrutura laboratorial para a obtenção dos limites de sensibilidade operacional às tensões	90
4.3 Resultados para os limites de suportabilidade dielétrica	90
4.3.1 Televisor a LED	91
4.3.2 Refrigerador	93
4.3.3 Freezer	95
4.3.4 Máquina de Lavar Roupas	97
4.3.5 Máquina de Lavar Louças	101
4.3.6 Condicionador de Ar Split	103
4.4 Análise comparativa das curvas de suportabilidade dielétrica	106
4.5 Limites de sensibilidade operacional às tensões	107
4.5.1 Televisores a LED	107
4.5.2 Refrigeradores	108
4.5.3 Freezers	109
4.5.4 Máquinas de Lavar Roupas	110
4.5.5 Máquinas de Lavar Louças	111
4.5.6 Condicionadores de Ar Split	112
4.6 Considerações finais	113

Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas

5.1 Considerações iniciais	115
5.2 Fundamentação física sobre as descargas atmosféricas	116
5.3 Modelagem da Descarga Atmosférica – Teoria de Rusck	118
5.3.1 Componente Eletrostática	121
5.3.2 Componente Magnética.....	126
5.3.3 Campo Eletromagnético Total	128
5.3.4 Tensão Induzida para Corrente Degrau.....	130
5.3.5 Tensão Induzida para Corrente em Rampa	134
5.4 Correlação entre as Tensões Induzidas e os Esforços Dielétricos	137
5.5 Considerações finais.....	140

Capítulo 6

Versão Modificada do Aplicativo APR e Análise de Desempenho

6.1 Considerações iniciais	142
6.2 Versão Modificada do Aplicativo APR	143
6.2.1 Implementação do modelo computacional do televisor a LED	145
6.2.2 Implementação dos novos limites de suportabilidade térmico e dielétrico para os produtos investigados	146
6.2.3 Implementação dos efeitos das induções eletromagnéticas	146
6.3 Estudos de Casos	149
6.3.1 Caso 01: Ruptura e queda de um cabo de média tensão sobre um alimentador residencial de baixa tensão	151
6.3.2 Caso 02: Incidência de descarga atmosférica direta e indireta.....	158
6.3.2.1 Caso 2.1: Incidência Direta	159
6.3.2.2 Caso 2.2 – Incidência Indireta: Distância variável e corrente com valor de crista fixo ...	160
6.3.2.3 Caso 2.3 – Incidência Indireta: Distância fixa e corrente com valor de crista variável ...	163
6.4 Considerações finais.....	165

Capítulo 7

Conclusões	166
-------------------------	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas	171
---	------------

APÊNDICES

APÊNDICE A

Cartão do ATP Referente ao Televisor a LED.....	177
---	-----

APÊNDICE B

Procedimento computacional para Corrente em Rampa	179
Interface e Gerações dos Cartões do APR	181

ANEXOS

ANEXO A

Procedimento computacional para Corrente Degrau	195
Procedimento computacional para tensão dupla exponencial.....	198

Lista de Figuras

Figura 1.1 Número de pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2015 – 20 empresas distribuidoras – dados da ANEEL.....	24
Figura 1.2 Histórico de solicitações e procedência de pedidos de ressarcimento.....	24
Figura 1.3 (a) DEC médio para todas as distribuidoras brasileiras nos últimos seis anos – (b) FEC médio para todas as distribuidoras brasileiras nos últimos seis anos.....	25
Figura 1.4 Principais equipamentos reclamados – dados para uma distribuidora A.....	25
Figura 1.5: Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos – dados para uma distribuidora A.....	26
Figura 1.6 Principais fenômenos aos quais estão associados os pedidos de indenização – informações para uma distribuidora B.....	27
Figura 1.7 Possíveis direções a serem tomadas diante de uma solicitação de pedido de indenização por danos elétricos.....	29
Figura 2.1 Televisor utilizado nos estudos: (a) equipamento utilizado (b) Detalhes internos dos principais componentes.....	43
Figura 2.2 Placa da fonte do televisor.....	43
Figura 2.3 Circuito eletrônico da fonte de alimentação do televisor a LED.....	44
Figura 2.4 Circuito eletrônico equivalente da fonte do televisor a LED implementado no ATPDraw.....	44
Figura 2.5 Modelo representativo do aparelho televisor a LED no ATPDraw.....	45
Figura 2.6 Diagrama ilustrativo da estrutura experimental utilizada nos ensaios.....	46
Figura 2.7 Arranjo físico para a realização dos ensaios experimentais.....	46
Figura 2.8 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) – Suprimento ideal e nominal - resultados experimentais:– Caso 01.....	47
Figura 2.9 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) – Suprimento ideal e nominal – resultados computacionais– Caso 01.....	47
Figura 2.10 Espectro harmônico da corrente de entrada – Experimental e computacional – Caso 01.....	48
Figura 2.11 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% – resultados experimentais – Caso 02.....	49
Figura 2.12 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% – resultados computacionais – Caso 02.....	50
Figura 2.13 Espectro harmônico da corrente de entrada do televisor a LED - Suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% - resultado experimental e computacional - Caso 02.....	50
Figura 2.14 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo flutuação de tensão: PST=5 e Frequência da moduladora de 13,5 Hz – resultados experimentais – Caso 03.....	51
Figura 2.15 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo flutuação de tensão: PST=5 e Frequência da moduladora de 13,5 Hz – resultados computacionais – Caso 03.....	52
Figura 2.16 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – resultados experimentais – Caso 04.....	52

Figura 2.17 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – resultados computacionais – Caso 04.....	53
Figura 2.18 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos – resultados experimentais – Caso 05	54
Figura 2.19 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos – resultados computacionais – Caso 05.....	55
Figura 2.20 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma elevação momentânea de 20% por 10 ciclos – resultados experimentais – Caso 06	56
Figura 2.21 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma elevação momentânea de 20% por 10 ciclos – resultados computacionais – Caso 06.....	56
Figura 2.22 Refrigerador utilizado: (a) Vista frontal externa e (b) Vista posterior com os principais componentes.....	57
Figura 2.23 - Representação do diagrama elétrico do motor PTCSIR.....	58
Figura 2.24 Representação do motor de indução bifásico assimétrico.	58
Figura 2.25 Representação do refrigerador no ATPDraw.....	59
Figura 2.26 Freezer utilizado: (a) Vista frontal externa e (b) Vista posterior com os principais componentes.....	59
Figura 2.27 Representação do diagrama elétrico do motor do freezer.....	59
Figura 2.28 Representação do freezer no ATPDraw.....	60
Figura 2.29 Máquina de lavar roupas utilizada: (a) Vista frontal externa e (b) Vista inferior interna com detalhes físicos	60
Figura 2.30 Detalhe do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas.....	60
Figura 2.31 Equivalente do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas	61
Figura 2.32 Representação da máquina de lavar roupas	61
Figura 2.33 Máquina de lava louças sob ensaio: (a) Vista frontal externa e (b) Vista inferior interna com detalhes físicos	61
Figura 2.34 Circuito eletrônico da lava louças.....	62
Figura 2.35 Equivalente do circuito eletrônico da lava louças	62
Figura 2.36 Representação da máquina de lavar louças no ATPDraw	62
Figura 2.37 Condicionador de ar utilizado: (a) Evaporadora e (b) Condensadora	63
Figura 2.38 Placa eletrônica da evaporadora	63
Figura 2.39 Circuito equivalente da placa eletrônica.....	63
Figura 2.40 Blocos representativos no simulador ATP referente a (a) Evaporadora (b) Condensadora	64
Figura 3.1 Função típica representativa dos limites térmicos admissíveis pelos equipamentos.....	67
Figura 3.2 Curva UFU-CEMIG: Limites de suportabilidade térmica para microcomputadores: (a) Sem estabilizador (b) Com estabilizador	67
Figura 3.3 Padrão do impulso de corrente para definição do limite de energia admissível pelo equipamento sob teste	68
Figura 3.4 Estrutura laboratorial para o levantamento dos limites térmicos dos equipamentos.....	68
Figura 3.5 Parte da estrutura física do gerador de impulso de corrente, com eletrodomésticos testados.	68

Figura 3.6 Impulso de corrente aplicado ao aparelho televisor a LED	69
Figura 3.7 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo aparelho televisor a LED	70
Figura 3.8 Limite de suportabilidade térmica do aparelho televisor a LED	70
Figura 3.9 Impulso de corrente aplicado ao aparelho refrigerador	71
Figura 3.10 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo refrigerador	71
Figura 3.11 Limite de suportabilidade térmica do refrigerador	72
Figura 3.12 Impulso de corrente aplicado ao freezer	72
Figura 3.13 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo freezer	73
Figura 3.14 Limite de suportabilidade térmica do freezer	73
Figura 3.15 Impulso de corrente aplicado a máquina de lavar roupas	74
Figura 3.16 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pela máquina de lavar roupas	74
Figura 3.17 Limite de suportabilidade térmica da máquina de lavar roupas	75
Figura 3.18 Impulso de corrente aplicado a máquina de lavar louças	75
Figura 3.19 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pela máquina de lavar louças.....	76
Figura 3.20 Limite de suportabilidade térmica da máquina de lavar louças.....	76
Figura 3.21 Impulso de corrente aplicado ao condicionador de ar Split.....	77
Figura 3.22 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo condicionador de ar Split	77
Figura 3.23 Limite de suportabilidade térmica do condicionador de ar Split.....	78
Figura 4.1 Curva típica para os níveis superiores da suportabilidade de tensão	81
Figura 4.2 Curva CBEMA: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores ...	84
Figura 4.3 Curva ITIC: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores.....	85
Figura 4.4 Curva LACTEC: Limites de suportabilidade e sensibilidade para refrigeradores	86
Figura 4.5 Curva LACTEC: Limites de suportabilidade e sensibilidade para televisores a tubo.....	86
Figura 4.6 Curva AES SUL: Limites de suportabilidade para televisores a tubo – novos e usados..	87
Figura 4.7 Curva UFU-CEMIG: Limites de suportabilidade para televisores de tubos catódicos (a) Televisor 21” (b) Televisor 29”	87
Figura 4.8 Curva UFU-CEMIG: Limites de suportabilidade para microcomputadores: (a) Sem estabilizador (b) Com estabilizador.....	88
Figura 4.9 Curva UFU-CEMIG: Limites de suportabilidade para aparelhos de som.	88
Figura 4.10 Estrutura do laboratório para os ensaios associados com a região 1	89
Figura 4.11 Arranjo experimental para os ensaios associados com a região 3	89
Figura 4.12 Estrutura física para os ensaios laboratoriais da região 3 - UFU.....	90
Figura 4.13 Tensão e corrente imposta ao televisor de LED sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial.....	91
Figura 4.14 Capacitores avariados	92
Figura 4.15 Limite de suportabilidade dielétrica do aparelho televisor a LED	93
Figura 4.16 Tensão e corrente imposta ao refrigerador sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial.....	94
Figura 4.17 Limite de suportabilidade dielétrica do aparelho refrigerador.....	95
Figura 4.18 Tensão e corrente imposta ao freezer sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial.....	96
Figura 4.19 Limite de suportabilidade dielétrica do freezer	97

Figura 4.20 Tensão e corrente imposta à máquina de lavar roupas sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial – “processo de lavagem”	98
Figura 4.21 Zoom da tensão e corrente imposta à máquina de lavar roupas após a manifestação da sobretensão à frequência industrial de 2.4 p.u – “processo de lavagem”	98
Figura 4.22 Tensão e corrente imposta à máquina de lavar roupas sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial – “processo de centrifugação”	99
Figura 4.23 Bomba de sucção avariada.....	99
Figura 4.24 Limite de suportabilidade dielétrica da máquina de lavar roupas	100
Figura 4.25 Tensão e corrente imposta à máquina de lavar louças sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial.....	101
Figura 4.26 Detalhes da tensão e da corrente impostas à máquina de lavar louças sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial	102
Figura 4.27 Limite de suportabilidade dielétrica da máquina de lavar louças	103
Figura 4.28 Tensão e corrente imposta ao condicionador de ar Split sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial.....	104
Figura 4.29 Detalhe da tensão e corrente imposta ao condicionador de ar Split sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial	104
Figura 4.30 Limite de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar Split	105
Figura 4.31 Limites de suportabilidades dielétricas para o aparelho televisor a LED – análise comparativa entre o limite proposto e os tradicionais da literatura.....	106
Figura 4.32 Limites de suportabilidades dielétricas para o refrigerador – análise comparativa entre o limite proposto e os tradicionais da literatura	106
Figura 4.33 Limites de sensibilidades operacional de televisores a LED sob a ação de afundamentos e interrupções de tensão	108
Figura 4.34 Limites de sensibilidades operacional de refrigeradores sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão	109
Figura 4.35 Limites de sensibilidades operacional de freezers sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão	110
Figura 4.36 Limites de sensibilidades operacional de máquinas de lavar roupas sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão	111
Figura 4.37 Limites de sensibilidades operacional de máquinas de lavar louças sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão	112
Figura 4.38 Limites de sensibilidades operacional de condicionadores de ar Split sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão	113
Figura 5.1 Mecanismos através dos quais as descargas atmosféricas podem atingir um consumidor	116
Figura 5.2 Posição geométrica do ponto de incidência com relação a rede elétrica	120
Figura 5.3 Variação do campo elétrico vertical (<i>E_{eiv}</i>) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição	123
Figura 5.4 Variação do campo elétrico vertical (<i>E_{eiv}</i>) para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição	123
Figura 5.5 Variação do campo elétrico horizontal na direção axial (<i>E_{eihx}</i>) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição	125
Figura 5.6 Variação do campo elétrico horizontal na direção axial (<i>E_{eihx}</i>) para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição.....	125
Figura 5.7 Variação do campo magnético (<i>E_{mi}</i>) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição	127

Figura 5.8 Variação do campo magnético (<i>E_{mi}</i>) para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição	127
Figura 5.9 Componentes eletrostáticas (<i>E_{eiv}</i>) e magnéticas (<i>E_{mi}</i>) do campo eletromagnéticos (<i>E_i</i>) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição	128
Figura 5.10 Componentes eletrostáticas (<i>E_{eiv}</i>) e magnéticas (<i>E_{mi}</i>) do campo eletromagnéticos (<i>E_i</i>) para diferentes amplitudes da corrente para a descarga atmosférica incidindo a 50 metros da rede de distribuição	129
Figura 5.11 Campo eletromagnéticos (<i>E_i</i>) total para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição	129
Figura 5.12 campo eletromagnéticos (<i>E_i</i>) total para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição	130
Figura 5.13 Tensão Induzida total para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição – corrente degrau	133
Figura 5.14 Tensão induzida total para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição – corrente degrau	133
Figura 5.15 Corrente do tipo rampa	134
Figura 5.16 Tensão Induzida total para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição – corrente tipo rampa	136
Figura 5.17 Tensão induzida total para diferentes amplitudes das correntes para as descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição – Corrente tipo rampa	136
Figura 5.18 Tensão induzida total para diferentes tempos de frente das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição – Corrente tipo rampa	137
Figura 5.19 Tensões induzidas obtidas pelos três procedimentos: degrau, rampa e onda padrão ...	139
Figura 5.20 Solicitações dielétricas impostas pelas tensões induzidas em função do procedimento de cálculo empregado	139
Figura 6.1 Interface gráfica do APR	144
Figura 6.2 Estrutura do aplicativo APR com as inserções desta tese	144
Figura 6.3 Interface do aplicativo APR destacando a inserção do novo equipamento disponível dentre as opções já existentes	145
Figura 6.4 Interface do APR para seleção dos limites de suportabilidade	146
Figura 6.5 Interface gráfica com usuário na plataforma MATLAB	147
Figura 6.6 Formato do cartão contendo o vetor representativo das tensões induzidas	147
Figura 6.7 Cartão para adequação das informações a serem exportadas para o APR	148
Figura 6.8 Configuração das induções eletromagnéticas no aplicativo APR	149
Figura 6.9 Identificação geográfica do consumidor e alimentador elétrico – [Fonte: Google Maps]	150
Figura 6.10 Rede de distribuição importada automaticamente para o APR	150
Figura 6.11 Sistema elétrico equivalente e importado para o aplicativo APR incluindo a configuração do curto MT/BT – Caso 01	151
Figura 6.12 Tensões trifásicas no ponto de conexão do consumidor – Caso 01	152
Figura 6.13 (a) tensão e (b) corrente na entrada do refrigerador – Caso 01-A	152
Figura 6.14 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica no refrigerador - Caso 01-A	153
Figura 6.15 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica no refrigerador - Caso 01-A	153
Figura 6.16 (a) tensão e (b) corrente na entrada do freezer – Caso 01-B	154

Figura 6.17 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica no freezer - Caso 01-B	154
Figura 6.18 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica no freezer - Caso 01-B	154
Figura 6.19 (a) tensão e (b) corrente na entrada da máquina de lavar roupas – Caso 01-C	155
Figura 6.20 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica na máquina de lavar roupas - Caso 01-C	155
Figura 6.21 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica na máquina de lavar roupas - Caso 01-C	156
Figura 6.22 (a) tensão e (b) corrente na entrada da máquina de lavar louças – Caso 01-D	156
Figura 6.23 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica na máquina de lavar louças - Caso 01-D	157
Figura 6.24 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica na máquina de lavar louças - Caso 01-D	157
Figura 6.25 (a) tensão e (b) corrente na entrada do condicionador de ar Split – Caso 01-E	157
Figura 6.26 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica no condicionador de ar Split - Caso 01-E	158
Figura 6.27 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica no condicionador de ar Split - Caso 01-E	158
Figura 6.28 Interface do APR para parametrização da descarga atmosférica de incidência direta	159
Figura 6.29 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica – Caso 2.1	159
Figura 6.30 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica – Caso 2.1	160
Figura 6.31 Parametrização dos dados para obtenção da tensão induzida – Caso 2.2	161
Figura 6.32 Tensões induzidas utilizadas para as análises do Caso 2.2 – influência da distância entre o ponto de incidência da descarga e a localização física da rede de distribuição	161
Figura 6.33 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica – Caso 2.2	162
Figura 6.34 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica – Caso 2.2	162
Figura 6.35 Tensões induzidas utilizadas para as análises do Caso 2.3 – influência do valor de crista da corrente impulso com distância constante entre o ponto de incidência e da rede de distribuição	163
Figura 6.37 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica – Caso 2.3	164
Figura 6.38 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica – Caso 2.3	164

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Dissertações de mestrado e teses de doutorado pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – UFU no âmbito dos PIDs.....	36
Tabela 1.2 Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados entre empresas concessionárias de energia elétrica e a UFU.....	38
Tabela 2.1 Características dos ensaios para validação do modelo computacional da TV a LED.....	45
Tabela 2.2 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob condições ideais e nominais de suprimento – Caso 01	48
Tabela 2.3 Distorções Harmônicas Total e Individuais	49
Tabela 2.4 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% – Caso 02.....	51
Tabela 2.5 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – Caso 04	53
Tabela 2.6 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% por 10 ciclos – Caso 05.....	55
Tabela 2.7 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo uma elevação momentânea de 20% por 10 ciclos – Caso 06.....	57
Tabela 4.1 Estudos avaliativos do desempenho dos equipamentos diante de afundamentos e interrupções de tensão	83
Tabela 4.2 Síntese dos resultado experimentais para tensões limites do televisor a LED.....	92
Tabela 4.3 Síntese dos resultado experimentais para tensões limites do refrigerador	95
Tabela 4.4 Síntese dos resultado experimentais para tensões limites do freezer	96
Tabela 4.5 Síntese dos resultado experimentais para tensões limites da máquina de lavar roupas ..	100
Tabela 4.6 Síntese dos resultado experimentais para tensões limites da máquina de lavar louças..	102
Tabela 4.7 Síntese dos resultado experimentais para tensões limites do condicionador de ar Split	105
Tabela 4.8 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – televisor de LED	107
Tabela 4.9 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão - refrigerador	108
Tabela 4.10 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão - freezer	109
Tabela 4.11 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – máquina de lavar roupas	110
Tabela 4.12 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – máquina de lavar louças.....	111
Tabela 4.13 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – condicionador de ar Split.....	112

Lista de Símbolos e Abreviaturas

\vec{E}_{ei_h}	Parcelas do campo elétrico paralelas aos planos horizontal
\vec{E}_{ei_v}	Parcelas do campo elétrico paralelas aos planos vertical
\vec{A}_i	Potencial Vetor magnético criado pela corrente que circula pelo canal de descarga
\vec{E}_{ei}	Componente eletrostática do campo elétrico
\vec{E}_i	Campo elétrico no solo, perpendicular à superfície, associado ao canal da descarga atmosférica
\vec{E}_{mi}	Componente magnética do campo elétrico
\vec{E}_{mi}	Componente magnética do campo elétrico total
$U_{1(x)}$	Tensão induzida no sentido positivo de x
$U_{2(-x)}$	Tensão induzida no sentido negativo de x
$U_{máx}$	Maior valor para tensão induzida
V_i	Potencial Escalar criado pelas cargas do canal de descarga
Z_0	Impedância de propagação dos campos
q_0	Densidade linear de cargas do líder
Δt	Intervalo de tempo, em segundo, o qual o equipamento suportou antes de se danificar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APR	Analizador de Pedidos de Ressarcimento
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CDC	Código de Defesa do Consumidor
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
d	Distância entre a linha e o ponto físico de incidência da descarga
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DTI	Distorção Total de Corrente
DTT	Distorção Total de Tensão
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
h	Altura da rede elétrica, em relação ao solo, na direção do eixo z
I_0	Amplitude da Corrente de retorno
IAC	<i>Interactive Activation and Competition</i>

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
J	Energia máxima admitida pelo equipamento
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
$P(r_0, h)$	Ponto da linha para o qual será determinada a tensão induzida
PID	Pedidos de Indenização por Danos
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PST	<i>Perception of Light Flicker in the Short Term</i>
$Q(d, h)$	Ponto da linha mais próximo ao local de incidência da descarga
r_0	Distância entre o ponto $P(r_0, h)$ e o de incidência, no plano xy
T_D	Intervalo de tempo, em segundos, durante o qual o equipamento foi submetido ao esforço de corrente
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V_K	Solicitação dielétrica
x	Distância entre os pontos $P(r_0, h)$ e $Q(d, h)$, no sentido positivo da coordenada x
U	Tensão total induzida
c	Velocidade da luz no vácuo
$s(t)$	Altura do canal correspondente à posição da frente de onda da corrente

CAPÍTULO 1

CONTEXTUALIZAÇÃO E PROPOSTA DE AVANÇOS PARA OS ESTUDOS DE PIDS

1.1 Introdução

Os desenvolvimentos tecnológicos e suas correlações com consumidores de energia elétrica, tanto os residenciais, comerciais e industriais, têm ocasionado a utilização, de forma crescente, dos mais diversos equipamentos eletroeletrônicos, os quais, se mostram, cada dia, mais eficazes e eficientes, facilitando e otimizando processos e a vida humana. Não obstante a isto, não se pode ignorar que, conjuntamente a esta evolução, também surge uma série de questões envolvendo a relação comercial entre os agentes envolvidos, a saber: consumidores, distribuidoras e a agência nacional responsável pela regulação e fiscalização da relação comercial em pauta. De um modo pontual e, em consonância com as metas do trabalho de pesquisa em foco, surge um tema de grande relevância atual, qual seja, a correspondência e adequação entre a qualidade da energia elétrica fornecida e os requisitos impostos pelos agentes reguladores e consumidores [1].

De fato, a dinâmica operacional de um sistema elétrico, concebido para uma operação sob condições ideais, impõe distúrbios e fortes impactos sobre as características operacionais de equipamentos causados, dentre outros motivos, pelas atuações de dispositivos de proteção, entradas e saídas de cargas de grande porte, ocorrências de curtos-circuitos, presença de cargas não-lineares, incidências de descargas atmosféricas, etc. [2]. Diante deste contexto, responsável por suprimentos elétricos frequentemente denominados por não-ideais, tais equipamentos podem apresentar um funcionamento inadequado e, em casos mais extremos, sofrer danos físicos que resultam na necessidade de reparos ou mesmo a total substituição dos mesmos [3]–[5]. Diante destas circunstâncias, surgem questões que crescem em importância nos dias atuais, envolvendo o cenário da comercialização e responsabilidades jurídicas, conhecido por Ressarcimentos por Danos Elétricos ou, como comumente designado por Pedido de Indenização por Danos (PID). A área encontra sustentação nos fundamentos das leis que norteiam os direitos e deveres entre um supridor e um consumidor, conforme previsto na Constituição Federal e no Código de Direito do Consumidor.

Com o intuito de intermediar tal situação, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) possui orientações que norteiam a solução de tais conflitos, porém os métodos por ela sugeridos não

encontram, via de regra, sustentação em princípios técnicos ou científicos, o que ocasiona em insatisfações quanto aos pareceres finais [6], [7]. De acordo com estas orientações, a não ser que haja prova em contrário, basta a existência de um fenômeno anômalo da rede e simultaneidade com o dano reclamado, para que o pedido seja considerado procedente. Todavia, a real avaliação do que se denomina por nexo causal, de fato, fica extremamente fragilizada diante do processo em pauta.

Ainda, um fato que contribui para o agravamento da situação é a falta de registros de grandezas elétricas associadas com a maioria das ocorrências por parte da concessionária, e tampouco, processos sistematizados para correlação dessas ocorrências com os padrões de suportabilidade dos equipamentos.

Isto posto e diante do crescente número de pedidos de ressarcimento por danos elétricos, ficam evidenciados os motivadores para a busca por mecanismos fundamentados na ciência e tecnologia que permitam balizar, de forma imparcial, os interesses individuais.

1.2 Contextualização do tema

De forma a oferecer meios para a caracterização do estado da arte sobre a área de pesquisa aqui tratada, apresenta-se, a seguir, uma descrição sumária dos principais aspectos associados com o assunto.

1.2.1 Síntese qualitativa e quantitativa sobre PIDs a nível nacional

A Figura 1.1 expressa aspectos quantitativos sobre o número de solicitações encaminhadas para análise pelas mais diversas concessionárias distribuidoras do país. Os números são considerados parciais e representam a situação vivenciada ao longo do ano de 2015 para cerca de 30% das empresas nacionais. Vale observar que a síntese apresentada compreende 20 empresas distribuidoras, enquanto o Brasil possui 63 concessionárias de distribuição de energia elétrica. As demais, por apresentarem valores inferiores ao mínimo indicado, foram omitidas nesta apresentação. No total, constata-se que o número de solicitações chega a cerca de 287.550 reclamações de pedidos de ressarcimento, das quais, aproximadamente, 26% foram julgados procedentes e 74% improcedentes.

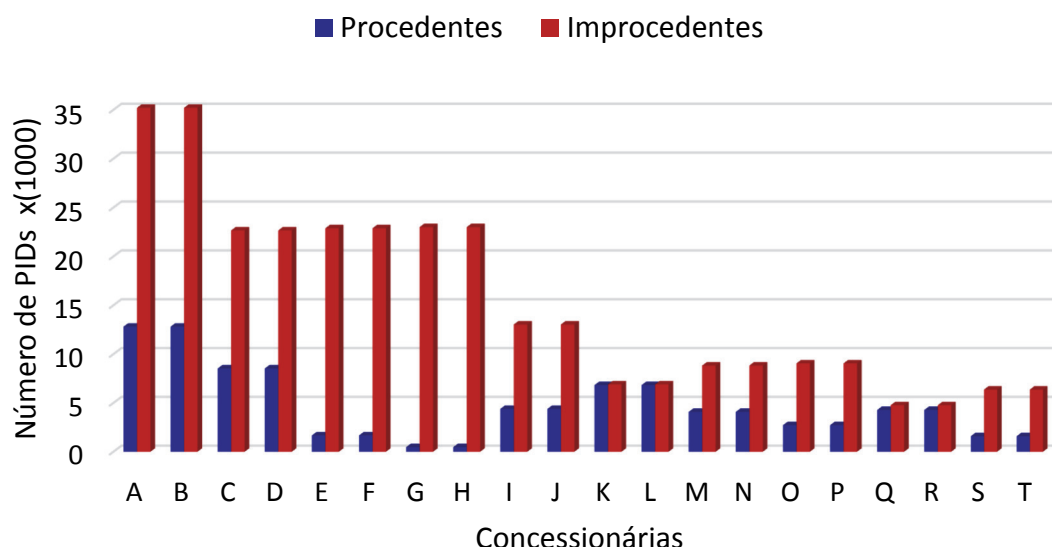


Figura 1.1 Número de pedidos de indenização por danos elétricos – ano de 2015 – 20 empresas distribuidoras – dados da ANEEL.

Neste mesmo contexto, pode-se constatar ainda, através de números da ouvidoria da ANEEL [8], a ocorrência de um significativo aumento dos recursos encaminhados a esta Agência. Estes números compreendem as situações para as quais não houve acordo entre a distribuidora e o consumidor. Estes indicativos revelam, ainda, que o número de pedidos improcedentes, de acordo com os procedimentos internos das empresas, tem aumentado consideravelmente, fato este que evidencia um acréscimo do número de conflitos entre as partes.

Em complementação às informações supra postas, a Figura 1.2 mostra o cenário brasileiro dos últimos seis anos no que diz respeito ao número de solicitações de PIDs e a porcentagem desses que são procedentes. Os números se estende a todas as distribuidoras do país, compreendendo os anos de 2010 a 2015.

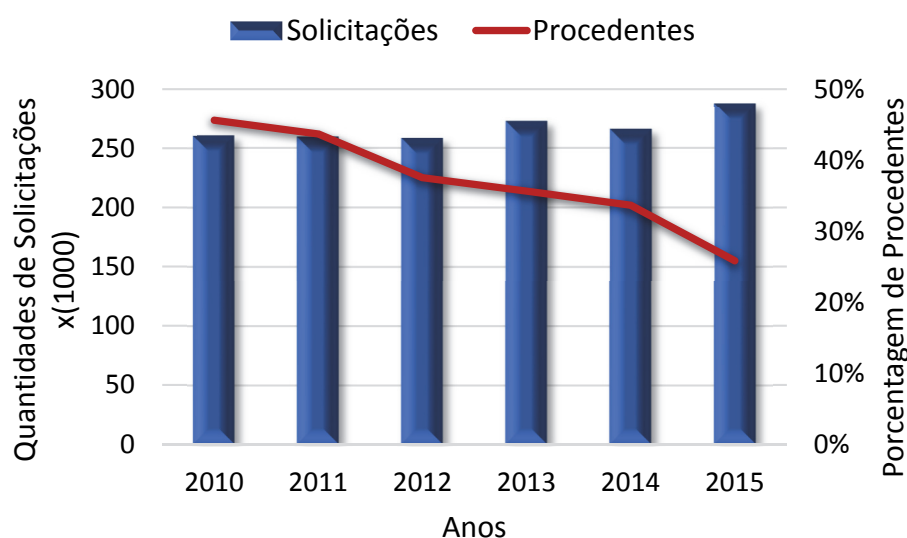


Figura 1.2 Histórico de solicitações e procedência de pedidos de ressarcimento

Visando associar as questões anteriores com fatores representativos da Qualidade da Energia Elétrica, a Figura 1.3 aponta alguns indicadores da Qualidade do Serviço, como o DEC e o FEC, médio de todas as distribuidoras do Brasil [9]. Pode-se verificar que o valor do DEC permanece praticamente inalterado, já o FEC, possui uma notável redução contradizendo com o aumento gradativo do número de solicitações. Isso demonstra que mesmo ocorrendo investimentos financeiros, por parte das concessionárias, para tentar reduzir os indicadores apresentados, do ponto de vista dos PIDs esses investimentos não são correspondidos e vem se elevando a cada ano.

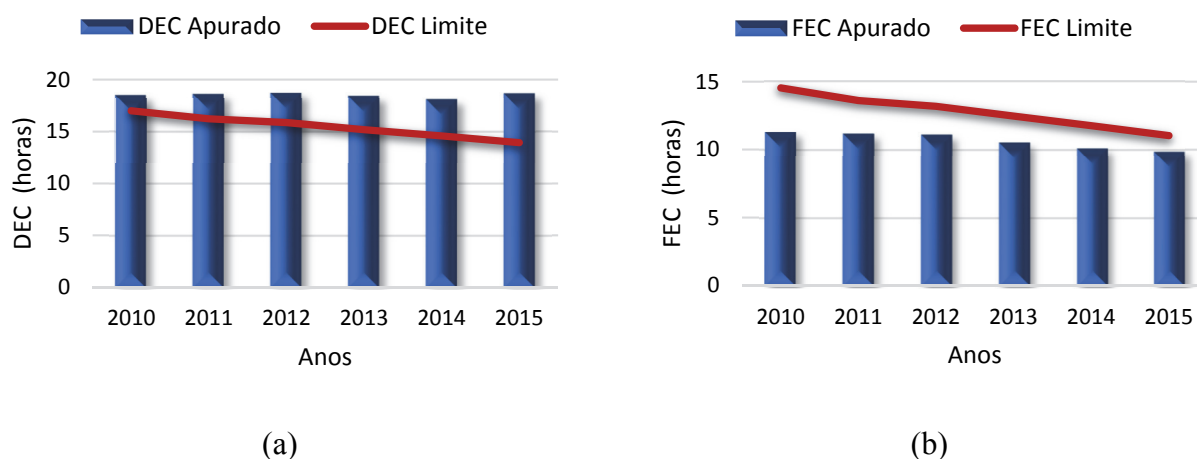


Figura 1.3 (a) DEC médio para todas as distribuidoras brasileiras nos últimos seis anos – (b) FEC médio para todas as distribuidoras brasileiras nos últimos seis anos

A Figura 1.4, por outro lado, é indicativa dos principais equipamentos contemplados nos processos de indenização para uma dada empresa distribuidora de grande porte, a qual é aqui identificada por “A”. A diversidade de produtos fica evidenciada e, ainda, que a maioria dos pedidos envolve eletrodomésticos de custo mais elevado, fato este que, em atenção aos dados financeiros, conduz a um custo estimado de R\$300,00 por produto indenizado.

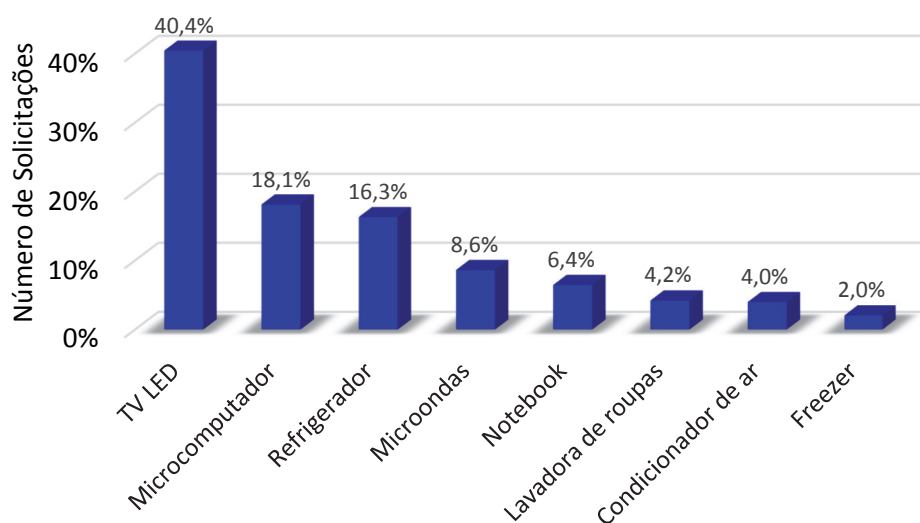


Figura 1.4 Principais equipamentos reclamados – dados para uma distribuidora A.

Diante do número de solicitações e dos custos associados com o reparo ou substituição dos equipamentos cujos pedidos foram julgados procedentes, mais uma vez, objetivando consubstanciar o assunto contemplado nesta tese, a Figura 1.5 apresenta os valores totais dos ressarcimentos feitos pela empresa A, ao longo dos últimos anos. Novamente, fica evidenciado que os valores financeiros são significativos e a taxa de crescimento das solicitações de indenização se apresenta evidente. Esses argumentos, somados às ponderações anteriores, refletem, de forma clara e inequívoca, a relevância do tema e a importância da busca por mecanismos legais e técnicos para a solução dos problemas de conflitos entre as partes.

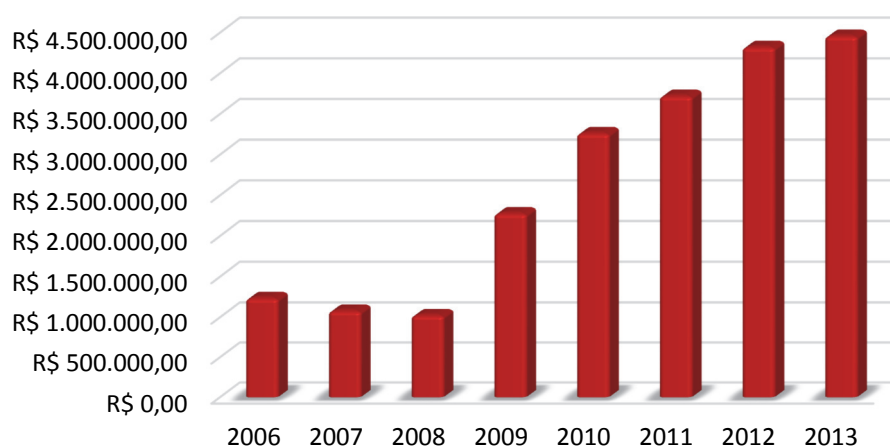


Figura 1.5: Custos totais ressarcidos por pedidos de indenização por danos – dados para a distribuidora A.

Por fim, visando oferecer um panorama amplo sobre a questão em foco, a Figura 1.6 mostra a origem dos supostos fenômenos aos quais estariam vinculados, em sua maioria, os pedidos de indenização, para uma outra distribuidora, aqui identificada como “B”. Como pode ser visto, as descargas atmosféricas e os religamentos automáticos constam como as principais causas das reclamações direcionadas às distribuidoras de energia elétrica. Não obstante a isto, a correlação entre tais distúrbios e os danos a eles atribuídos, certamente, constitui-se ainda em motivos para discussões e avaliações mais criteriosas, não bastando a existência para uma justa correlação entre causas e efeitos. Isso tem provocado um conjunto de ações de ordem regulamentadora, métodos de análise, processos e outros aspectos diretamente ligados ao assunto [10].

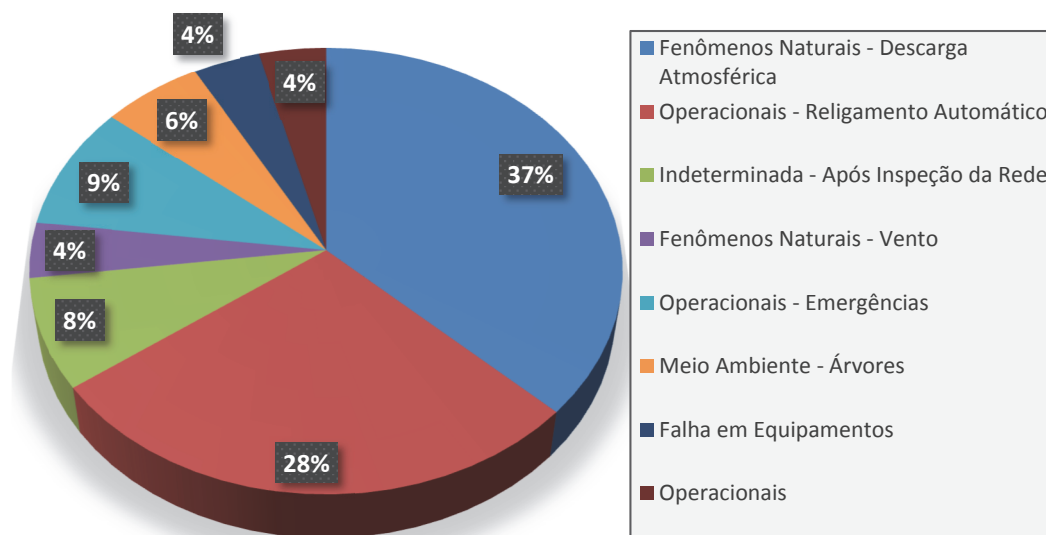


Figura 1.6 Principais fenômenos aos quais estão associados os pedidos de indenização – informações para uma distribuidora B.

1.2.2 Aspectos jurídicos

A energia elétrica é considerada um serviço essencial e, consoante com o disposto em Lei, esta deve ser oferecida de maneira adequada e com qualidade. Partindo-se desse pressuposto e, considerando o quanto previsto pelo ordenamento jurídico vigente, sobretudo o que preceitua a Constituição Federal, não restam dúvidas de que as pessoas jurídicas de direito privado prestadoras de serviços públicos, dentre as quais se encontram inseridas as concessionárias de energia elétrica, responderão pelos danos a outrem ocasionados. Assim sendo, fica evidenciado que as empresas privadas, quando lhes é atribuído o dever de executar os serviços de interesse público, seja através de concessão, permissão ou autorização, respondem pelos danos causados pela falha ou defeito na prestação de seus serviços. De acordo com os termos apresentados em [11] “quem tem os bônus deve suportar os ônus”, aduzindo que “aquele que participa da Administração Pública, que presta serviços públicos, usufruindo os benefícios dessa atividade, deve suportar seus riscos, deve responder em igualdade de condição com o Estado, em nome de quem atua”.

Muito embora mereça destaque o entendimento de [12] que adverte que usuário de serviço público não é consumidor sob a ótica jurídica, adota-se o posicionamento de que não dispondo o usuário de serviço público de uma legislação específica que assegure e respalde os seus direitos e obrigações enquanto usuários e, considerando ainda que o Código de Defesa do Consumidor encontra-se em harmonia com o quanto previsto pela Constituição Federal, inclusive tendo sido criado em decorrência de preceito constitucional, deve-se recorrer à aplicação da referida legislação na relação verificada entre as pessoas jurídicas de direito privado prestadoras de serviços públicos e seus usuários. Além do mais, é importante destacar que as normas trazidas pelo Código de Defesa do Consumidor são de ordem pública e interesse social e, desse modo, disciplinam os valores básicos de

uma sociedade, sendo, portanto, de observância obrigatória. É essencial ponderar que a mencionada legislação traz em seu cerne a responsabilidade objetiva, segundo a qual faz-se prescindível a comprovação da culpa para que se concretize o dever de indenizar.

De acordo com [13] “diante dessa tendência, o legislador veio a de fato contemplar a aplicação do CDC aos serviços públicos”, mas adverte o autor que isto “contudo, não pode levar à sua aplicação indiscriminada a eles”. À luz destes argumentos depreende-se que a legislação vem sendo aplicada às relações envolvendo usuários de serviços públicos, inclusive naquelas situações envolvendo danos ao usuário em decorrência da prestação do serviço público de energia elétrica, entendimento este que vem sendo ratificado por reiteradas decisões provenientes dos tribunais.

Finalmente, não se pode desconsiderar o papel da Agência Reguladora do setor elétrico, ANEEL, na mitigação dos problemas existentes entre as concessionárias de energia elétrica e seus usuários. Com efeito, além da missão regulatória e fiscalizatória atribuída por lei, a ANEEL possui a competência de expedir os atos necessários ao cumprimento das normas estabelecidas pela legislação em vigor. Dessa maneira, na resolução de conflitos existentes entre usuários do serviço público de energia elétrica – tidos como consumidores no presente estudo - e as concessionárias de energia elétrica, merece observância o disposto pelas Resoluções normativas editadas pela ANEEL, as quais devem estar em perfeita harmonia com o disposto no Código de Defesa do Consumidor e, sobretudo, em consonância com o que dispõe a Constituição Federal, que se sobrepõe a toda e qualquer legislação, tendo em vista a hierarquia de normas existente no ordenamento jurídico.

Contudo, não obstante seja dispensável a comprovação da culpa, para que se concretize o dever das concessionárias de energia elétrica de indenizar os danos elétricos ocasionados aos consumidores faz-se imprescindível a constatação de alguns pressupostos, quais sejam: o dano efetivamente ocasionado ao consumidor; o ato ilícito, consistente na ação ou omissão por parte do agente causador do dano que viola direitos causando danos a outrem e o nexo causal entre a conduta por parte daquele que ocasiona danos a outrem e o dano experimentado.

Dessa maneira, que em algumas situações a Administração Pública e as prestadoras de serviços públicos poderão ter por elidida a obrigação de indenizar, ainda que se constate danos a outrem ocasionados, nos casos em que se vislumbre alguma excludente de responsabilidade civil.

Assim sendo, naquelas situações em que se vislumbre a incidência de alguma das excludentes de responsabilidade civil, constatando-se a ausência do nexo causal entre o dano ocasionado ao consumidor e eventual falha ou deficiência na prestação de serviços pela concessionária de energia elétrica, não há que se falar em dever de indenizar por parte desta. Diante desta realidade, o total desconhecimento por parte dos consumidores das situações em que de fato estar-se-ia diante de alguma excludente de responsabilidade da concessionária de energia elétrica, não havendo, pois, qualquer obrigação desta última em proceder às indenizações pleiteadas, leva a crer que se faz

premente a uniformização dos procedimentos adotados na análise dos pedidos de indenização por danos elétricos. Para tanto, a padronização através de mecanismos ou *softwares* alicerçados em critérios técnicos e científicos da engenharia, capazes de aferir com maior precisão se de fato houve correlação entre a perturbação no sistema elétrico e o dano ocasionado ao consumidor, uma vez que somente em se constatando o nexo causal entre a falha na prestação do serviço público de energia elétrica e o dano alardeado é que se poderia cogitar na indenização correspondente [14] [10].

Dentro deste contexto, as etapas que constituem o processo de análise supra posto se apresenta sintetizado na Figura 1.7. Esta mostra o caminho tradicional e também esclarece sobre níveis de recursos que podem ser acionados caso não haja concordância entre as partes quanto a um determinado PID e parecer emitido pela empresa.

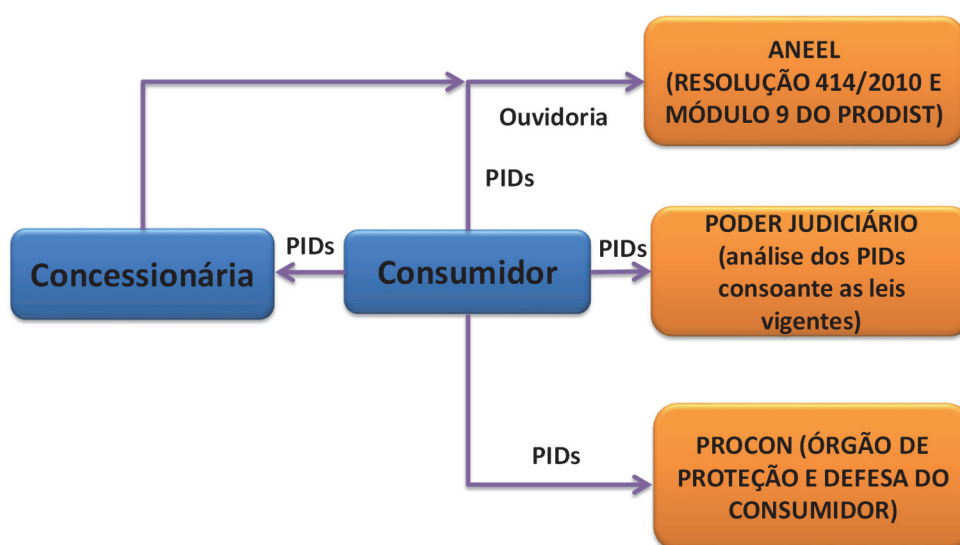


Figura 1.7 Possíveis direções a serem tomadas diante de uma solicitação de pedido de indenização por danos elétricos

1.3 Revisão bibliográfica sobre o tema da pesquisa

Somado aos trabalhos já mencionados, todos realizados no contexto da UFU, foram ainda realizados levantamentos bibliográficos em temas atinentes ao assunto em pauta. Para tanto, utilizando-se de meios tradicionais de acesso, obteve-se um conjunto de informações sobre os mais distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no âmbito da área de análise de pedidos de ressarcimento. De um modo geral, os documentos obtidos encontram-se, na sequência, agrupados de forma a contemplar distintos pontos focais, os quais exploram a matéria como um todo.

1.3.1 Conceitos gerais associados com Qualidade da Energia Elétrica

Nas referências [1], [2], [15] e [16] podem ser encontrados conceitos, definições e uma extensa descrição dos distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica. Complementarmente, a referência [17] apresenta formas para categorizar problemas relativos à qualidade da energia. Tendo

em vista que as questões associadas com o tópico aqui discutido são de ampla difusão no meio acadêmico e outros, considera-se dispensável tecer maiores comentários sobre o assunto neste trabalho.

1.3.2 Normas/recomendações nacionais sobre Qualidade da Energia Elétrica

A referência [18], associada com o conhecido PRODIST-ANEEL, tem por objetivo estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia em sistemas de distribuição de energia elétrica. Define os conceitos e os parâmetros envolvidos dando mecanismos que possibilitem à ANEEL estabelecer valores-limite para os indicadores de Qualidade da Energia Elétrica. Os Procedimentos de Rede do ONS [19], por sua vez, considera os padrões de qualidade recomendados para a rede básica do sistema elétrico nacional. Novamente, devido à reconhecida disseminação desses documentos, entende-se ser desnecessária uma maior discussão. Muito embora a questão ainda se apresente de forma embrionária, vale ressaltar que os Procedimentos da Distribuição da ANEEL, em seu Módulo 9, contempla, de forma pontual, o tema central focado nesta proposta de tese, qual seja, os assuntos correlacionados com as diretrizes desde a entrada de um pedido até a emissão de um parecer final por parte da distribuidora de energia.

1.3.3 Sensibilidade e suportabilidade de aparelhos elétricos

Os trabalhos de pesquisa [3]–[5], [20]–[36] realizados por diversas instituições nacionais e internacionais contemplam assuntos relacionados com a sensibilidade e suportabilidade de aparelhos elétricos, quando submetidos a suprimento de energia contendo distúrbios de naturezas diversas. Estes objetivam, sobremaneira, um melhor entendimento dos limites toleráveis por equipamentos eletroeletrônicos e outros. Enquanto alguns desses estudos visam quantificar os níveis de sensibilidade e suportabilidade admissíveis pelos produtos, outros direcionam suas investigações de modo a observar as interdependências de modo mais qualitativo. Não obstante os trabalhos ora identificados, ressalta-se que são poucos aqueles que, efetivamente, produzem resultados finais conclusivos na forma de curvas representativas de tais níveis, as quais, certamente, se apresentariam como fundamentos sólidos para os estudos em foco.

Em [37] pode-se encontrar uma síntese das principais publicações pertinentes ao assunto. Dos trabalhos indicados destaca-se a relevância da referência [4], a qual apresenta resultados de estudos experimentais envolvendo uma boa gama de produtos eletroeletrônicos, a exemplo de: televisores, aparelhos de som e DVD e microcomputadores. Todos eles submetidos a transitórios impulsivos e sobretensões à frequência industrial. Uma outra contribuição importante corresponde a publicação [5], contendo curvas de sensibilidade e suportabilidade para cada um dos seguintes equipamentos: televisores, rádio relógios, DVD players, refrigeradores e microcomputadores. A tônica desta referência está no desempenho dos equipamentos diante de interrupções, afundamentos de tensão e

transitórios impulsivos. O documento [20] mostra a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*), a qual estabelece os níveis toleráveis de tensão de suprimento recomendados, na fase de projeto, para a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos de tecnologia da informação. Em [3] são apresentados os resultados de testes de aparelhos de videocassete no que tange à suportabilidade destes equipamentos quanto da incidência de sobretensões transitórias.

Além das publicações anteriores, retratando resultados e desempenhos experimentais sob a ação de distúrbios diversos, destacam-se ainda os documentos balizadores sobre os procedimentos de testes visando avaliar os níveis de suportabilidade dos equipamentos. Neste particular, reconhece-se, em especial, aqueles identificados nas referências [38] [39], [40]. Tais documentos apresentam orientações para a aplicação de sobretensões impulsivas, afundamentos e interrupções quando da análise operacional de equipamentos.

Do exposto segue que, apesar dos avanços relatados, o assunto oferece ainda desafios merecedores de maiores investigações, a exemplo de trabalhos direcionados ao estabelecimento de diretrizes conclusivas sobre a correlação entre distúrbios e níveis de suportabilidade de equipamentos e o estabelecimento de limites de suportabilidade no que tange aos impactos dielétricos e térmicos associados com distintos distúrbios elétricos.

1.3.4 Modelagem computacional de redes de distribuição e de aparelhos elétricos

No que tange aos sistemas elétricos e sua modelagem no domínio do tempo, a referência [41] trata especificamente das características dos recursos computacionais disponibilizados pelo simulador ATP (*Alternative Transients Program*). Tendo em vista que este ponto constitui-se num dos alicerces desta proposta de tese, é importante observar que inúmeros trabalhos foram publicados e que contemplam o emprego desta ferramenta para os fins aqui almejados, fato este encorajador para a manutenção desta estratégia de análise.

Informações sobre a questão da modelagem dos diversos equipamentos que compõem os seguimentos de consumo industrial, comercial e residencial e respectivas implementações em ambientes computacionais podem ser encontradas em [30], [31], [33], [34], [37], [42]. Essas e outras referências estabelecem as diretrizes utilizadas, propõem estratégias para representações de vários dispositivos e validam as propostas através da comparação entre seus desempenhos teóricos diante dos resultados experimentais. Tendo em vista as particularidades atreladas com os estudos investigativos para cada um dos produtos focados neste contexto, considera-se relevante ressaltar que os modelos disponibilizados e já implementados na base ATP se mostram compatíveis às exigências impostas por estudos de regime permanente e sob condições de suprimento adversas.

Nestes termos pode-se considerar que a plataforma destinada à modelagem da rede elétrica e respectivos distúrbios (ATP, programas correlatos ou aplicativos advindos deste), assim como

também os modelos dos equipamentos eletroeletrônicos objetos dos mais distintos pedidos de indenização, para o momento, se mostram apropriados aos objetivos aqui delineados.

1.3.5 Normas, documentos e trabalhos realizados na área de ressarcimento de danos

A referência [43] constitui-se uma resolução normativa vigente sobre o tema enfocado e estabelece, conforme mencionado anteriormente, as disposições relativas ao ressarcimento de danos em equipamentos instalados em unidades consumidoras, causados por perturbação ocorrida no sistema supridor de energia elétrica. De acordo com este documento, os consumidores que tenham tido aparelhos danificados devem procurar a distribuidora em até 90 dias para solicitar ressarcimento. No que tange a distribuidora de energia, o prazo para ressarcir o consumidor será de 45 dias. Dentro desse prazo, a concessionária tem até 10 dias para vistoriar o equipamento, até 15 dias, após a inspeção, para comunicar o resultado do pedido ao consumidor e mais 20 dias para efetuar o ressarcimento em dinheiro, conserto ou substituição do equipamento, se for o caso. Para eletrodomésticos usados na conservação de alimentos perecíveis, como geladeiras e freezers, a vistoria deve ocorrer em até um dia útil.

Complementarmente, em [44] são propostos critérios e procedimentos para padronizar a análise das responsabilidades pelos danos materiais, reclamados por terceiros, naqueles casos em que a concessionária possui a devida responsabilidade. Somado a tais embasamentos, a referência [45] foca especificamente a correlação do tema ressarcimentos com efeitos atrelados com descargas atmosféricas e manobras. Esta última ainda mostra aos agentes do setor elétrico, de forma explícita, os procedimentos da ANEEL e das Agências Estaduais Conveniadas em relação ao tema, de modo a prevenir conflitos com consumidores.

O trabalho [7] analisa o agravamento das relações entre consumidores e concessionárias a respeito dos pedidos de ressarcimento por danos em aparelhos elétricos provocados por distúrbios da rede elétrica. Esta referência também aponta para o fato que as agências de regulação observam um número crescente de conflitos entre as partes, e que, atualmente, não há meios eficientes para resolver tais contendas. Para minimizar parte dos problemas, esta referência propõe ações envolvendo concessionárias e sociedade para a proteção do sistema, equilibrando responsabilidades pela instalação de dispositivos protetores para diminuir a solicitação de danos causados por transitórios na tensão de alimentação.

Em [46] são feitas considerações sobre a interrupção da tensão por meio de manobras na média tensão em condições normais de operação, tendo-se detectado, via equipamentos de medição, que estes eventos na rede podem produzir um tipo de transitório que se converte, devido a uma série de fatores, em possíveis sobretensões na baixa tensão. Embora consideradas como fenômenos normais,

essas sobretensões, muitas vezes não muito severas, têm sido apontadas como prováveis causas de danos a aparelhos elétricos.

A referência [47] discute a questão do fluxo de correntes na terra e da tensão de surto entre dois aterramentos distintos quando da incidência de uma descarga atmosférica ou falta para a terra nas redes de distribuição. O documento exemplifica danos causados aos equipamentos eletroeletrônicos nessas situações, defendendo que a queima pode não ser atribuída, exclusivamente, a surtos de sobretensões provenientes da rede de alimentação da distribuidora.

A publicação [48] apresenta estudos de simulação com vistas à verificação da possibilidade das descargas atmosféricas danificarem equipamentos eletroeletrônicos instalados em edifícios localizados a centenas ou até mesmo a milhares de metros do ponto de impacto. O documento conclui que, dentre as causas mais comuns para o surgimento destes problemas, uma delas está na instalação inadequada das proteções contra raios e dos dispositivos de proteção contra sobretensões nas edificações.

Em [49] são discutidas questões relativas aos custos decorrentes das descargas atmosféricas em sistemas de distribuição de energia à luz das mudanças no Código Civil, do Código de Defesa do Consumidor e das alterações na norma ABNT NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão – na sua última revisão de 2004 [50]. O documento contempla: o enfoque jurídico, as mudanças mais significativas ocorridas na NBR 5410 com referência ao assunto, as formas de custeio das interrupções de energia e informações relativas à evolução do número de pedidos de indenização por danos (PID) nos últimos anos, principalmente, após a publicação da Resolução Normativa nº 61 de 2004 da ANEEL.

A referência [51], por sua vez, encontra-se associada com os seguintes temas: identificação das causas mais frequentes dos pedidos de ressarcimento; desenvolvimento de ferramenta computacional para estimar as sobretensões e subtensões quando da ocorrência de eventos; análise de religamentos e plano de ação com um elenco de proposições para empresas e consumidores visando à redução de queimas de aparelhos elétricos.

Com relação a *softwares* específicos para análise de pedidos de ressarcimento, a referência [52] apresenta uma proposta visando auxiliar a tomada de decisões. O sistema consta de interfaces para registro e caracterização de ocorrências de danos ao consumidor, ocorrências de perturbações de qualidade da energia na rede de distribuição e um módulo inteligente para apoio a tomada de decisão quanto à responsabilidade por danos elétricos em equipamentos do consumidor. A proposta é baseada no emprego da Rede Neural Artificial tipo IAC – *Interactive Activation and Competition*.

Ainda com relação a programas computacionais, como já destacado anteriormente, a referência [37] traz importantes contribuições para esta complexa área de pedidos de indenização por danos elétricos. Esse trabalho, a partir de uma metodologia fundamentada na correlação entre

distúrbios e esforços dielétricos e térmicos impostos aos equipamentos eletroeletrônicos, permite uma análise da consistência do nexo causal, nos termos estabelecidos no pedido de ressarcimento. Esse procedimento, sistematizado na forma de um programa computacional, originou o aplicativo denominado por APR [37].

1.3.6 Trabalhos no contexto do fenômeno das descargas atmosféricas

Não obstante a diversidade de fenômenos passíveis de representação das condições anômalas impostas aos consumidores, vale ressaltar que, em consonância com os resultados indicados na Figura 1.6, um dos mais expressivos distúrbios associados com as solicitações de indenização encontra-se atrelado com a incidência das descargas atmosféricas, quer sejam elas manifestadas de forma direta ou indireta.

Tomando por base os trabalhos que culminaram no já denominado aplicativo APR, como detalhado em [37] e [53], observa-se que este se apresenta, na sua forma original, contemplando tão apenas as incidências diretas das descargas atmosféricas sobre os condutores fase ou neutro. Nestas circunstâncias, fica evidenciada uma limitação do processo de análise visto que, as descargas atmosféricas podem produzir surtos de tensão e corrente na rede elétrica através do impacto direto sobre os condutores, ou via um mecanismo indireto, através do qual o ponto de incidência se localiza nas imediações do consumidor reclamante.

À luz do exposto segue que o fenômeno envolvendo as descargas atmosféricas, por si só, se apresenta como tema já considerado em inúmeros trabalhos, porém desperta, ainda nos dias atuais, motivações para pesquisas e esforços na concepção física do problema, modelagem e vários outros aspectos próprios ao assunto.

Focando, de forma pontual, a questão dos efeitos indiretos associados com a incidência das descargas, um primeiro trabalho destinado a proposição de uma metodologia para cálculo da tensão induzida em uma linha de transmissão foi apresentado por [54] em 1908. O modelo suposto considera que a tensão induzida na linha é dada pelo campo elétrico originado pelas cargas elétricas presentes na nuvem antes da descarga. Este modelo resultou em uma onda de tensão induzida com tempo de crista e tempo de cauda relativamente longos.

Em 1929, [55] ajustou o modelo citado em [54], em que pese sua principal contribuição voltada para a consideração dos tempos de crista e cauda no processo da indução. Em 1942, foi proposto por [56], que a indução de tensão na linha é provocada principalmente pelo campo elétrico gerado no canal de descarga. Nesta abordagem é considerada uma corrente de retorno em forma de degrau, facilitando os cálculos dos valores de tensão induzida. Continuando, em 1954, na referência [57] foi adicionado ao modelo de [56], o decaimento exponencial da corrente de retorno ao longo do tempo, de forma a aproximar o modelo com as características reais do fenômeno.

Dentre as teorias mais adotadas, sobressai a proposta [58] apresentada em 1957, a qual recebeu o nome de Modelo de Rusck. Esta pesquisa mostrou que o fluxo da corrente de retorno pelo canal se apresenta como componente colaboradora da indução nas linhas de transmissão. Realizando algumas considerações e simplificações, este documento obteve uma expressão simples, porém com resultados satisfatórios para o valor da tensão induzida. Tamanha foi sua aceitação que, associações renomadas como o CIGRÉ [59] e o IEEE (*IEEE Std 1410-2010*) [60] adotam, até o momento, o método em questão para os estudos de desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas.

Em 1983, no trabalho [61], foi implementado uma metodologia diferente daquela apresentada por [58]. Entretanto, mais tarde, muito embora as diferenças entre os dois métodos, cálculos numéricos comprovaram resultados praticamente idênticos entre as duas propostas, comprovadas em [62]. Avançando nesta direção, em 1984, estudos apresentados em [63], foram os primeiros a propor uma metodologia capaz de calcular tensões induzidas em redes com cabos aterrados e com para-raios. Anos depois, seus trabalhos e resultados experimentais foram amplamente utilizados com a finalidade de validar novas propostas de metodologias de cálculos para tensão induzida em linhas aéreas. Na mesma linha, utilizando-se de resultados experimentais, a referência [72], seguiu uma estratégia fundamentada em uma rede de distribuição monofásica e foguetes adaptados para provocar descargas atmosféricas nas proximidades desta. Concluiu-se que os picos da tensão induzida na linha experimental pode-se chegar a valores bem maiores do que os indicados por [58]. Um outro trabalho que apresenta uma contribuição via simulação e medição em modelo reduzido, pode ser encontrado em [64]. Este diferencia dos demais no que tange a utilização de equações no domínio do tempo aplicáveis a fontes arbitrárias de descargas atmosféricas.

Por volta de 1988, um convênio entre a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais e a Telebrás, gerou alguns trabalhos sobre o tema, materializados em quatro dissertações de mestrados. Dentre essas, as pesquisas realizadas por [65] e [66] ambas em 1990, procuram estabelecer uma modelagem que caracterizasse o fenômeno da descarga atmosférica e o campo eletromagnético manifestado em linhas aéreas. Novamente, estes desenvolvimentos ratificaram a proposta por [58] ou de Rusck. Um outro desenvolvimento conduziu ao trabalho de mestrado desenvolvido por [67], o qual resultou num programa de uso dedicado, aplicável a linhas aéreas monofásicas e cabos subterrâneos, baseado na metodologia apresentada em [58], substituindo os pontos de descontinuidades por fontes de corrente equivalentes localizadas apenas em pontos onde ocorrem descontinuidades. Por fim, a última dissertação [68] ratificou os resultados teóricos fornecidos pelos trabalhos anteriores através de medições realizadas em modelos de escala reduzida.

Em 1991, a pesquisa [69] desenvolveu o Modelo de Rusck Estendido (“Extended Rusck Model - ERM”), proposta está aprimorada na tese de doutorado [70]. Este avanço foi comprovado através de experimentos em escalas real e reduzida, como relatado em [71] [72]. Outra importante complementação do trabalho [58], foi publicada em 1994, em [73], a qual compreendeu a

implementação do processo num programa próprio destinado a realização de simulações de redes elétricas de vários condutores, com um deles multi-aterrado, e ainda, a presença de para-raios instalados ao longo das linhas. Ainda de maneira a contribuir com no contexto do modelo contido em [58], pode-se citar três importantes trabalhos que utilizaram a plataforma ATP (Alternative Transients Program) para a implementação dos cálculos objetivando a determinação das tensões induzidas. Tais trabalhos podem ser encontrados em [74], [75] e [76], sendo que este último utilizada também um *software* dedicado, desenvolvido em Visual Basic, para conexão com o ATP.

Inúmeras outras pesquisas acerca das tensões induzidas por descargas atmosféricas foram e continuam sendo desenvolvidas, todavia, os métodos de análise fogem ao contexto aqui referido (Modelo de Rusck), o qual se constitui no fundamento da metodologia utilizada nesta proposta de tese. Por tal motivo tais trabalhos não diretamente relacionados com esta técnica, muito embora se encontrem inseridos no tema, não são aqui considerados.

1.3.7 Pesquisas e produtos voltados para a análise do nexso causal no âmbito da UFU

No âmbito dos trabalhos realizados pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no que diz respeito a mecanismos balizadores para emissão de pareceres envolvendo pedidos de ressarcimento por danos elétricos, a Tabela 1.1 resume todas as dissertações de mestrado e teses de doutorado defendidas sobre o assunto em pauta.

Tabela 1.1 Dissertações de mestrado e teses de doutorado pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica – UFU no âmbito dos PIDs.

AUTOR	TIPO DE TRABALHO	ANO	TÍTULO DO TRABALHO
Afonso Bernardino de Almeida Junior	Qualificação de Doutorado	2014	Contribuições aos Estudos Computacionais do Nexso Causal Associados com Ressarcimento por Danos Elétricos Devido a Descargas Atmosféricas Diretas e Indiretas
Paulo Henrique de Oliveira Rezende	Dissertação de Mestrado	2012	Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos.
Isaque Nogueira Gondim	Tese de Doutorado	2012	Contribuição para o aplicativo APR: Novos limites de Suportabilidades, perturbações via medições e sistematização no processo da configuração da rede.
Jomil Marques Borges	Dissertação de Mestrado	2012	Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise de Ressarcimento de Aparelhos de Som Associados aos Distúrbios na Rede Elétrica da CEMIG Testando Dispositivos Mitigadores.
Claudinei Jeremias de Ávila	Dissertação de Mestrado	2012	Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores Integrados ao APR e ao Banco de Dados da CEMIG Distribuição SA.

José Nelson Quadrado Júnior	Dissertação de Mestrado	2012	Estudos Avaliativos de Desempenho do Aplicativo APR Através de Caso Reais de Consumidores da Região Metropolitana de Cuiabá.
Edécio Antônio Martins	Dissertação de Mestrado	2012	Elaboração de Curvas de Suportabilidade para Microcomputadores e Estudos de Desempenhos de Dispositivos Mitigadores para Subsidiar os PIDs.
Fernando Gadenz	Dissertação de Mestrado	2010	Uma Proposta para a Inserção do Tempo de Uso dos Equipamentos no Aplicativo APR e Estudos Avaliativos de Casos Reais de PIDs.
Orlando Adolfo da Silva	Dissertação de Mestrado	2010	Metodologia para subsidiar a análise de Solicitações de ressarcimento com dispositivos de proteção contra surtos.
Marcus Vinícius Borges Mendonça	Tese de Doutorado	2010	Contribuições ao Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos.
Ivandro Antonio Bacca	Dissertação de Mestrado	2008	Modelagem para Análise de Desempenho de Eletrodomésticos à Força-Motriz Diante de Distúrbios de Qualidade da Energia.
Carlos Eduardo Tavares	Tese de Doutorado	2008	Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento a Consumidores.
Rodrigo Antônio Peniche	Dissertação de Mestrado	2004	Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio.
Carlos Eduardo Tavares	Dissertação de Mestrado	2004	Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Televisores, VCR's e Som.
Mateus Duarte Teixeira	Dissertação de Mestrado	2003	Uma Estrutura Laboratorial para Testes de Desempenho de Equipamentos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ricardo Nogueira Magalhães	Dissertação de Mestrado	2003	Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia.
Bismarck Castilho Carvalho	Dissertação de Mestrado	2003	Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ana Carolina Azevedo	Dissertação de Mestrado	2003	Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.
Ana Cláudia Daroz dos Santos	Dissertação de Mestrado	2001	Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica.

Como demonstrado, a linha de pesquisas na qual se insere a presente proposta de tese já se apresenta com um lastro significativo de contribuições, também materializadas na forma de inúmeros artigos em congressos nacionais e internacionais, periódicos e outros meios de divulgação.

Visando ainda consubstanciar a relevância do assunto, relaciona-se, na Tabela 1.2, projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados pelo Grupo de Qualidade da Energia Elétrica em conjunto com empresas distribuidoras que compõem o setor elétrico nacional.

Tabela 1.2 Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento realizados entre empresas concessionárias de energia elétrica e a UFU

PROJETOS	DESCRIÇÃO
CELG-UFU 2014-2016	Este projeto contempla um aprimoramento do produto desenvolvido até o seu início e tem por foco a melhoria de várias questões para a estrutura composta de hardware e <i>software</i> até então obtidas. Dentre os principais aspectos explorados ressaltam-se os seguintes pontos: redução das dimensões físicas da sonda e respectivo peso, tipo de transmissão de dados, suportabilidade ambiental e seu aspecto físico, redução de custos, etc.
CELG-UFU 2008-2010	Fundamentalmente, através da definição de uma estrutura de hardware e <i>software</i> , tal projeto contemplou a formação de bancos de dados sobre ocorrências reais nas redes de distribuição, os quais poderão ser utilizados como entrada de informações para o APR-2.0.
CEMIG-UFU 2008-2010	Esta pesquisa visou, sobretudo, a determinação de curvas reais que expressem os níveis de suportabilidade de distintos equipamentos eletro-eletrônicos, possibilitando, assim, melhorias significativas para o processo de análise e parecer emitido pelo APR-2.0.
LIGHT-UFU 2006-2009	Este projeto ofereceu expressivos avanços em relação ao produto anterior. Dentre as principais inovações destacam-se: novos equipamentos foram inseridos, foi proposta uma estratégia para a inclusão do tempo de uso dos produtos, foram considerados modelos mais complexos para os cabos elétricos, os equipamentos fundamentados no princípio da força motriz foram aprimorados, e outros aspectos visando situações particulares para as redes de distribuição da empresa contratante. Ao final das atividades foi produzido um <i>software</i> que recebeu a designação: APR-2.0, ou seja, uma segunda versão do produto anteriormente destacado.
CEB-UFU 2005-2007	Produziu um <i>software</i> que reproduz efeitos associados com os indicadores de conformidade dos suprimentos e, conjuntamente com outro grupo de equipamentos devidamente simulados, permite correlacionar as intensidades dos fenômenos com as curvas de suportabilidade dielétrica e térmica dos produtos investigados. Neste projeto a rede elétrica até o consumidor é modelada manualmente, são contemplados alguns equipamentos definidos pela empresa e avança no sentido de se utilizar o ATP como plataforma para os cálculos. Este trabalho resultou numa primeira versão do aplicativo, o qual foi designado por APR-1.0, ou seja, Analisador de Pedidos de Ressarcimento - versão 01.
LIGHT-UFU 2002-2004	Possibilitou a geração de modelos computacionais para distintos aparelhos eletro-eletrônicos, os quais permitem a reprodução, via <i>software</i> , do desempenho dielétrico e térmico dos mesmos, sob a ação dos mais distintos tipos de distúrbios passíveis de manifestação numa rede de distribuição. Nesta fase das atividades foi utilizado um simulador que não o ATP.

Maiores informações e detalhamentos sobre os objetivos alcançados com os trabalhos ressaltados podem ser obtidos diretamente através de uma consulta ao banco de dados da ANEEL. Entretanto, é importante destacar que, como resultado deste volume de pesquisas, a UFU produziu um *software* destinado ao processo de análise da consistência entre causas e efeitos, destinado à avaliação dos processos de indenização e a oferecer pareceres conclusivos sobre a existência ou não do pressuposto nexo causal. Este programa foi denominado por Analisador de Pedidos de

Ressarcimento (APR). Esta ferramenta se apresenta como o fundamento da presente proposta de pesquisa, em que pese contribuições voltadas para os pontos destacados na sequência.

1.4 Contribuições desta tese

Como já destacado, dados fornecidos através da Figura 1.1 refletem a situação nacional experimentada ao longo do ano de 2015. Os números apontados evidenciam que ao longo deste ano foram contabilizadas cerca de 300.000 solicitações de PIDs. Isto mostra que, não obstante as melhorias constatadas nos indicadores de continuidade de suprimento da energia elétrica, o número de requerimentos se mostram exponencialmente crescente.

Numa outra via, resta observar que os procedimentos até então empregados para a emissão de pareceres se apoiam, meramente, numa correlação entre o fato e o efeito, sem qualquer outro tipo de embasamento que conduza a uma efetiva avaliação da consistência ou não do nexo causal. Isto, por si só, evidencia grandes fragilidades dos processos de análise e a possibilidade de conflitos entre as partes.

Neste cenário, somado aos desenvolvimentos parciais já realizados no passado pela equipe do Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica / UFU, esforços estes voltados para o estabelecimento de uma metodologia concisa, consistente e eficaz, muito embora os avanços obtidos, o fato é que, nos termos atuais, a ANEEL, através do processo 48500.006342/2014-32 – Reunião da Diretoria ocorrida em 5 de maio de 2015, esta Agência aprovou o seguinte texto:

“Simulações computacionais não são suficientes para afastar a presunção de nexo de causalidade de perturbações na rede com danos elétricos em equipamentos de consumidores e não eximem a distribuidora da responsabilidade pelo ressarcimento”

Esta decisão apontou para o fato que, a metodologia utilizada, na forma até então feita, se apresenta com fragilidades que limitam sua confiabilidade e segurança quanto a emissão de pareceres sobre o nexo causal.

Não obstante ao posicionamento dado e sua aprovação pela diretoria da ANEEL, a mesma Súmula esclareceu, em seu item 12 que:

“Todavia, reconhece-se que simulações computacionais têm potencial para deixar a análise dos pedidos de ressarcimento de danos mais completa. Contudo, deve-se cuidar para que essa ferramenta não seja utilizada de forma inadequada por empresas que queiram esquivar-se indevidamente de suas obrigações. Nesse sentido, as simulações podem ser utilizadas como ferramentas de análise para auxiliar as distribuidoras a selecionarem quais solicitações devem ser prontamente atendidas e quais devem ser objeto de Laudo de Oficina ou de Verificação”.

À luz do exposto, constata-se que os trabalhos associados com estudos computacionais podem e devem ser considerados como uma opção, desde que ofereçam confiabilidade, segurança e outros aspectos direcionados para uma ferramenta de trabalho almejando a verdade sobre a consistência ou não dos fatos ocorridos.

A partir dos fundamentos apresentados, reconhecendo-se as áreas de carência apontadas, e ainda, apoiado no aplicativo computacional descrito na referência [37], esta proposta de tese de doutorado avança no contexto da sistematização dos procedimentos, trazendo melhorias quanto aos seguintes pontos focais:

- Modelagem de televisores de LED e síntese das representações dos principais equipamentos da linha branca;
- Estabelecimento de uma estratégia laboratorial para a obtenção de curvas de suportabilidade dielétrica e térmica para os televisores de LED e equipamentos da linha branca, bem como os limites de sensibilidade operacional às variações das tensões;
- Proposta e implementação de uma metodologia para a determinação das tensões induzidas provenientes da incidência de descargas atmosféricas;
- Inserção dos novos recursos no aplicativo para análise dos PIDs, e realização de estudos típicos de desempenho da nova versão do *software* APR.

Em consonância com estes objetivos, o trabalho de pesquisa ora proposto, encontra-se estruturado nos termos subsequentes.

1.5 Estrutura da tese

Em consonância com os objetivos supra estabelecidos, a organização do trabalho aqui proposto se apresenta constituída das seguintes unidades:

Capítulo 2: Modelagem de Televisores a LED e Equipamentos da Linha Branca

Essa seção é destinada a proposição da modelagem dos televisores a LED e sintetizar os resultados de representações para os equipamentos da linha branca, em consonância com trabalhos anteriores.

Capítulo 3: Limites de Suportabilidade Térmica

Esta etapa contempla os procedimentos empregados na obtenção dos limites térmicos para os eletrodomésticos em questão, em consonância com resultados laboratoriais de ensaios destrutivos conduzidos no âmbito desta pesquisa.

Capítulo 4: Limites de Suportabilidade Dielétrica e Sensibilidade Operacional às Tensões

Este capítulo contempla os procedimentos empregados na obtenção dos limites de suportabilidade de tensão, com possibilidade de ocasionar danos físicos aos equipamentos, somado a investigações que visam a obtenção dos níveis de sensibilidade operacional dos equipamentos.

Capítulo 5: Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas

Esse capítulo encontra-se centrado no desenvolvimento de uma sistemática de cálculo visando correlacionar a incidência de descargas atmosféricas nas regiões circunvizinhas às instalações consumidoras aos fenômenos da indução eletromagnética e impactos sobre os eletrodomésticos.

Capítulo 6: Versão Modificada do Aplicativo APR e Análise de Desempenho

Esta unidade é destinada a inserção das contribuições feitas no decorrer da pesquisa visando a obtenção de uma nova versão do aplicativo computacional, assim como a realização de estudos de casos para fins da avaliação do desempenho do *software* APR.

Capítulo 7: Conclusões

Por fim, apresenta-se uma síntese dos principais pontos e conclusões relacionados com o trabalho como um todo, em que pese o estágio atual dos desenvolvimentos desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DE TELEVISORES A LED E EQUIPAMENTOS DA LINHA BRANCA

2.1 Considerações iniciais

Tendo por foco os objetivos delineados para o presente trabalho, o qual tem por meta o aprimoramento e expansão da potencialidade oferecida pelo programa desenvolvido no âmbito da UFU e destinado para os estudos da correlação entre causas e efeitos manifestados nas redes elétricas, com impactos diretos sobre os mais distintos dispositivos eletroeletrônicos que constituem os complexos consumidores residenciais, comerciais e industriais. Este capítulo destina-se a modelagem e validação experimental de televisores a LED e mostrar uma síntese de estratégias elaboradas no passado para a representação de diversos eletrodomésticos da linha branca.

Diante deste contexto, neste capítulo encontra-se uma proposta para modelagem de televisores a LED, hoje comumente utilizadas no mercado e, a partir da proposição feita e respectiva implementação computacional, proceder a uma sistemática voltada para a validação experimental, em ambiente laboratorial controlado, com vistas a ratificação da eficácia da representação computacional no contexto do suprimento elétrico sob condições nominais e anômalas.

Somado a tais diretrizes, o capítulo em pauta contempla, ainda, a apresentação de uma síntese de vários outros dispositivos pertencentes ao que se denomina por linha branca, visto serem estes focados nos estudos posteriores quando da obtenção dos limites de suportabilidade e sensibilidade às tensões e correntes. Vale ressaltar que as considerações aqui feitas encontram-se fundamentadas em trabalhos de pesquisas anteriores, conforme explicitado ao longo do texto.

2.2 Proposta e validação da modelagem para televisores a LED

Essa seção consiste em propor e validar um modelo de televisores a LED, de modo que possa representar seu funcionamento em condições ideais e não ideais de tensão de suprimento.

A Figura 2.1 mostra o televisor a LED de uma marca tradicional, comercializada no Brasil, de 32 polegadas, o qual foi alvo dos estudos aqui descritos. Nesta pode-se identificar as principais partes e componentes eletrônicos que perfazem o dispositivo.

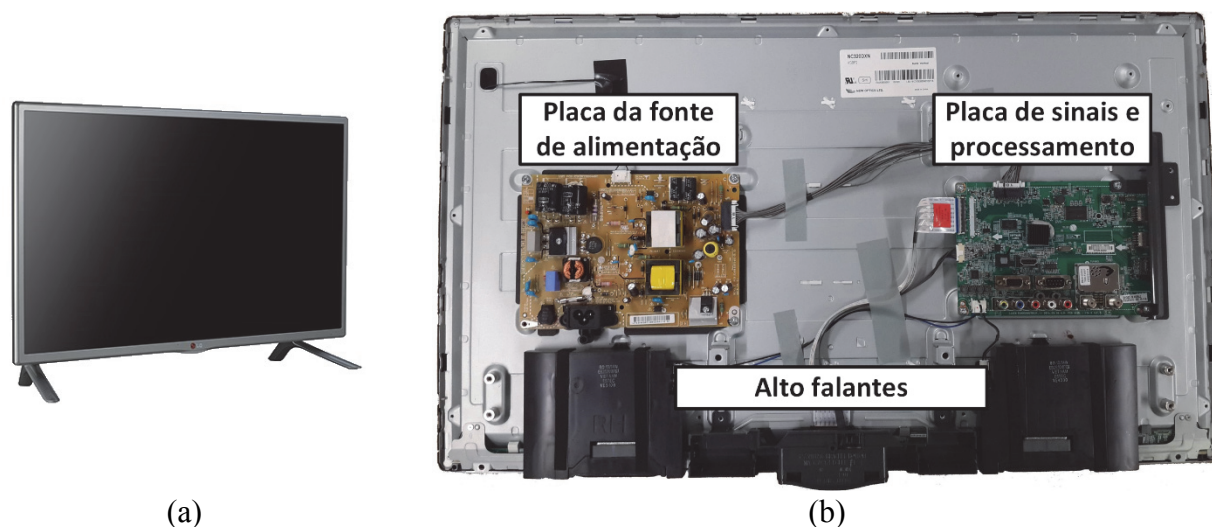


Figura 2.1 Televisor utilizado nos estudos: (a) equipamento utilizado (b) Detalhes internos dos principais componentes

Para maiores entendimentos acerca dos componentes eletrônicos presentes no televisor e a serem representados computacionalmente, a Figura 2.2 mostra os principais componentes de sua fonte de alimentação. Uma vez que experiências anteriores como [77] [37] relatam que, na maioria dos casos, a fonte de alimentação é a unidade com maior probabilidade de danos físicos sob a ação de alguma manifestação anômala na rede elétrica, esta é considerada em maiores detalhes para fins da representação do equipamento.

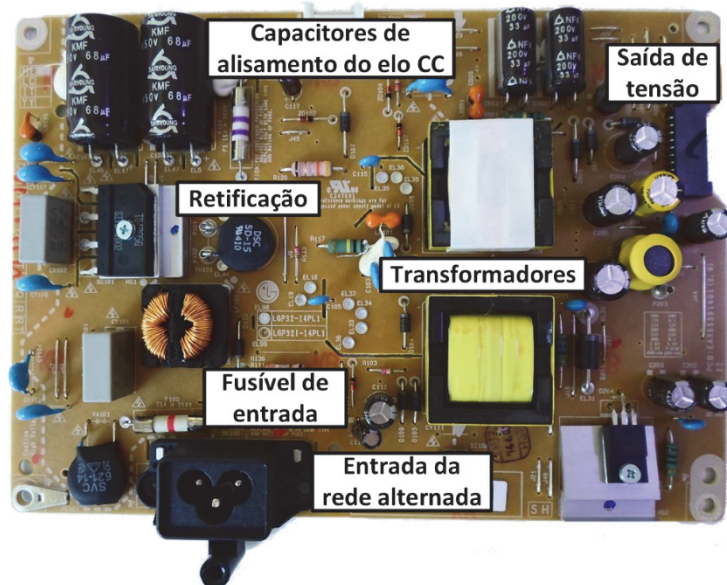


Figura 2.2 Placa da fonte do televisor

A Figura 2.3 evidencia que a fonte do aparelho televisor a LED é essencialmente constituída pelo estágio de entrada da rede de alimentação, filtragem do sinal alternado, uma ponte retificadora, um Circuito Integrado (CI) para controle e regulação dos níveis de tensão, capacitores de alisamento e um transformador, perfazendo, assim, as principais partes componentes da fonte.

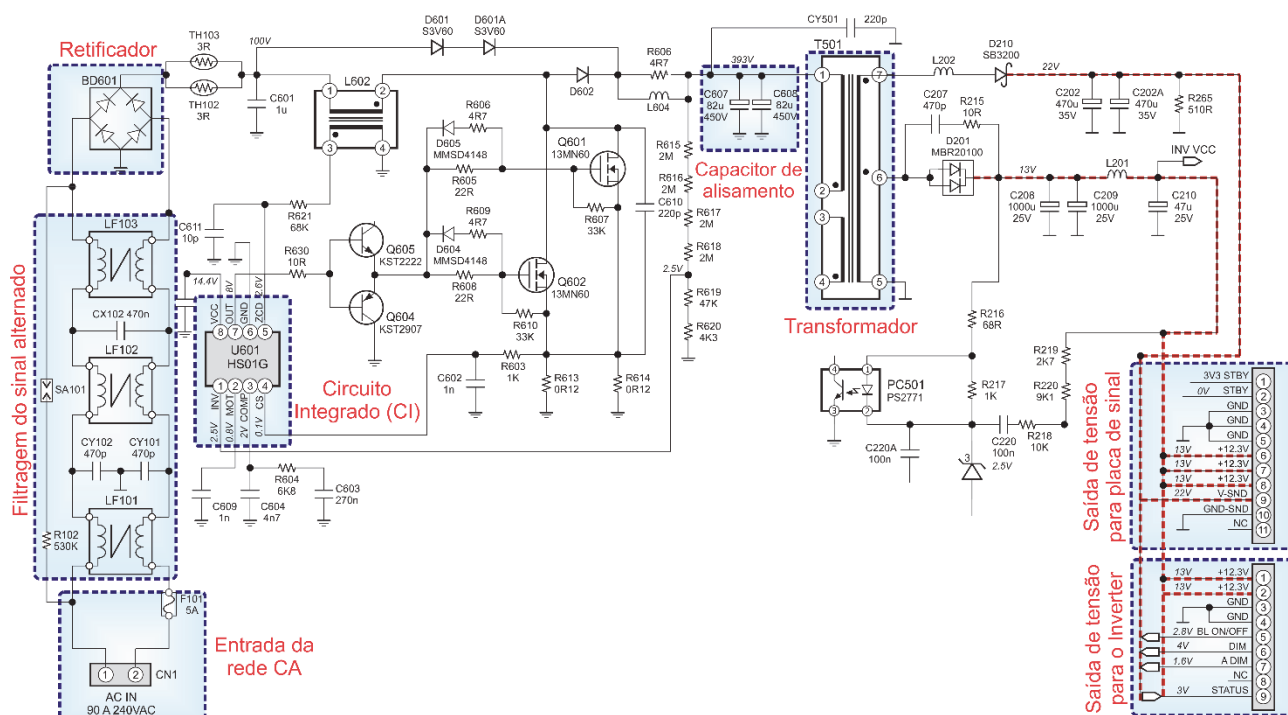


Figura 2.3 Circuito eletrônico da fonte de alimentação do televisor a LED: Fonte [Manual do fabricante LG]

2.2.1 Modelo computacional do televisor a LED

O conhecimento prévio do circuito eletrônico da fonte chaveada permite, via inspeção e análise operacional, sua implementação computacional no simulador ATPDraw [41]. No que tange a carga utilizada e suprida pela fonte, esta é tratada na forma de um equivalente à potência constante. Diante do exposto, a Figura 2.4 resume o circuito elétrico equivalente do televisor, o qual produziu o equivalente computacional no ATPDraw nos termos ilustrados na Figura 2.5. O respectivo cartão representativo do equipamento encontra-se no APÊNDICE A.

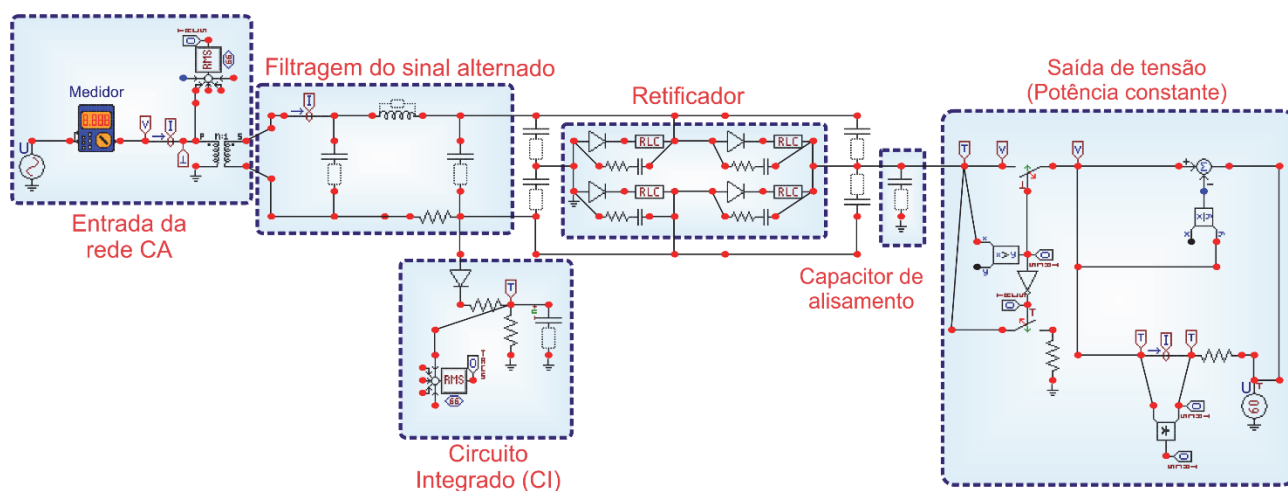


Figura 2.4 Circuito eletrônico equivalente da fonte do televisor a LED implementado no ATPDraw

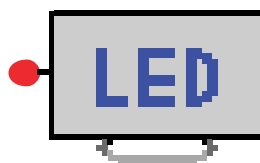


Figura 2.5 Símbolo representativo do modelo apresentado na Figura 2.4 para o aparelho televisor a LED no ATPDraw

2.2.2 Ensaaios para validação do modelo proposto

Para validar o modelo computacional implementado, foi utilizado um arranjo experimental que permitisse reproduzir, em laboratório, resultados similares àqueles passíveis de extração dos trabalhos computacionais. Isto possibilita estabelecer termos comparativos entre as formas de onda obtidas através das duas estratégias (computacional e experimental) e concluir sobre o grau de aderência entre os resultados teóricos e laboratoriais, validando ou não a proposta feita.

No que tange aos testes de desempenho selecionados, estes foram extraídos de [37], os quais são classificados em 5 (cinco) condições operacionais, cada uma delas relacionada a um tipo de distúrbio.

A Tabela 2.1 descreve as principais características dos ensaios adotados e realizados.

Tabela 2.1 Características dos ensaios para validação do modelo computacional da TV a LED

CASOS	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
Caso 01	Tensão de fornecimento sob condições nominais e ideais	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal trifásica equilibrada de 220 V, fase-fase, rms, 60 Hz; Puramente Senoidal.
Caso 02	Distorção harmônica superposta à tensão fundamental	<ul style="list-style-type: none"> Tensão fundamental de 220 V, rms, 60 Hz; Distorção Harmônica Total - DHT = 20%; Sinal constante ao longo do tempo;
Caso 03	Tensão com flutuação	<ul style="list-style-type: none"> Tensão fundamental de 220 V, rms, 60 Hz e Pst = 5,0pu; Sinal constante ao longo do tempo;
Caso 04	Afundamento da tensão	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal de 220 V, rms, 60 Hz; Afundamento para 60% da tensão nominal; Duração do evento igual a 10 ciclos.
Caso 05	Interrupção	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal de 220 V, rms, 60 Hz; Interrupção da tensão (0,0 V); Duração do evento igual a 10 ciclos.
Caso 06	Elevação da tensão	<ul style="list-style-type: none"> Tensão nominal de 220 V, rms, 60 Hz; Elevação para 120% da tensão nominal; Duração do evento igual a 10 ciclos.

2.2.3 Estrutura laboratorial utilizada

Para realização dos ensaios experimentais foram utilizados, além do televisor a LED testado, os seguintes recursos laboratoriais: uma fonte programável trifásica da California Instruments,

modelo CSW5550, com potência nominal de 11 kVA; um medidor de qualidade da energia modelo G4500 BLACKBOX, da marca ELSPEC; um osciloscópio digital 200MHz com 4 canais isolados Tektronix TPS2024, um microcomputador destinado ao controle da fonte programável; e um notebook para parametrização e configuração do medidor de qualidade da energia elétrica, bem como tratamento dos dados medidos.

A Figura 2.6 mostra a estrutura estabelecida para os fins aqui postos, enquanto que a Figura 2.7 ilustra a montagem experimental assim obtida.

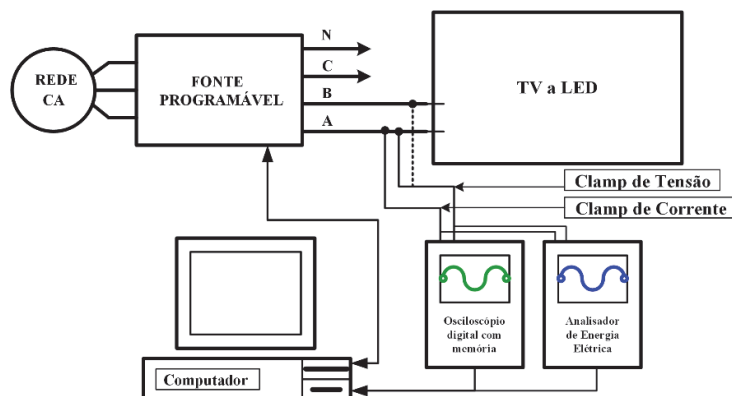


Figura 2.6 Diagrama ilustrativo da estrutura experimental utilizada nos ensaios

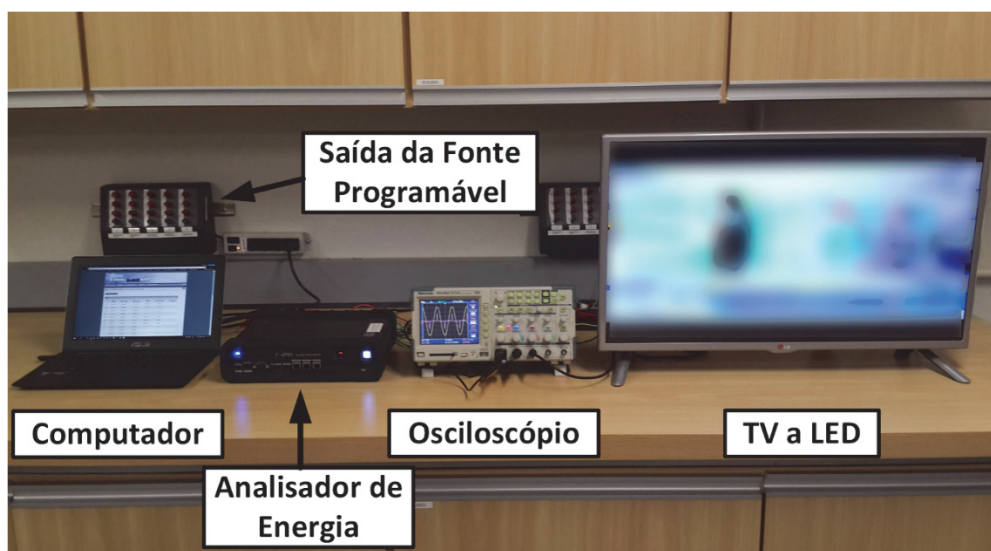


Figura 2.7 Arranjo físico para a realização dos ensaios experimentais

No que tange às grandezas selecionadas para monitoração e posterior comparação com resultados de desempenho computacionais, estas são: tensões na entrada do equipamento, tensão nos terminais CC da fonte e as correntes na entrada do equipamento.

2.2.4 Validação do modelo computacional

Apresentam-se, a seguir, os resultados de cunho experimentais e computacionais advindos dos ensaios constantes na Tabela 2.1.

2.2.4.1 Condições operativas ideais e nominais – Caso 01

Este primeiro teste visa avaliar o funcionamento do televisor a LED quando o mesmo se encontra suprido por uma tensão que se apresenta com padrões ideais quanto a seu valor e forma de onda. Assim, aplicando-se uma tensão de suprimento senoidal, de amplitude fixa com valor eficaz de 220V, têm-se os resultados experimentais indicados na Figura 2.8, os quais evidenciam as formas de onda da tensão de alimentação, da tensão já retificada no barramento CC e também da corrente envolvida no processo. Observa-se que, como esperado, a forma de onda da corrente se mostra com alto nível de distorção, fato que denota uma natureza não linear para a carga suprida.

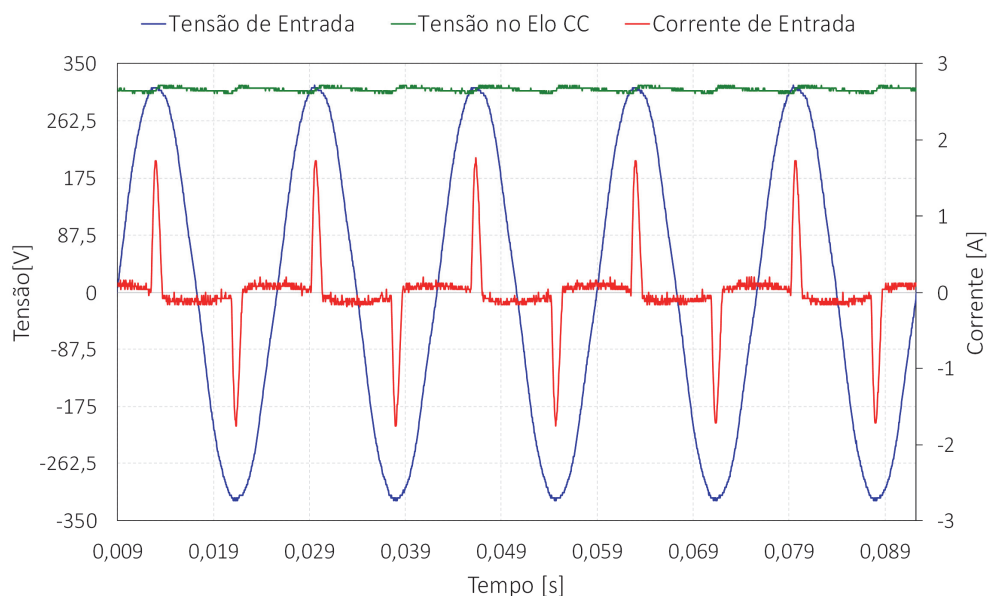


Figura 2.8 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) – Suprimento ideal e nominal - resultados experimentais – Caso 01

Estudo semelhante realizado com o modelo do televisor implementado no simulador, Figura 2.4, nos termos anteriormente esclarecidos, conduziu aos resultados fornecidos pela Figura 2.9.

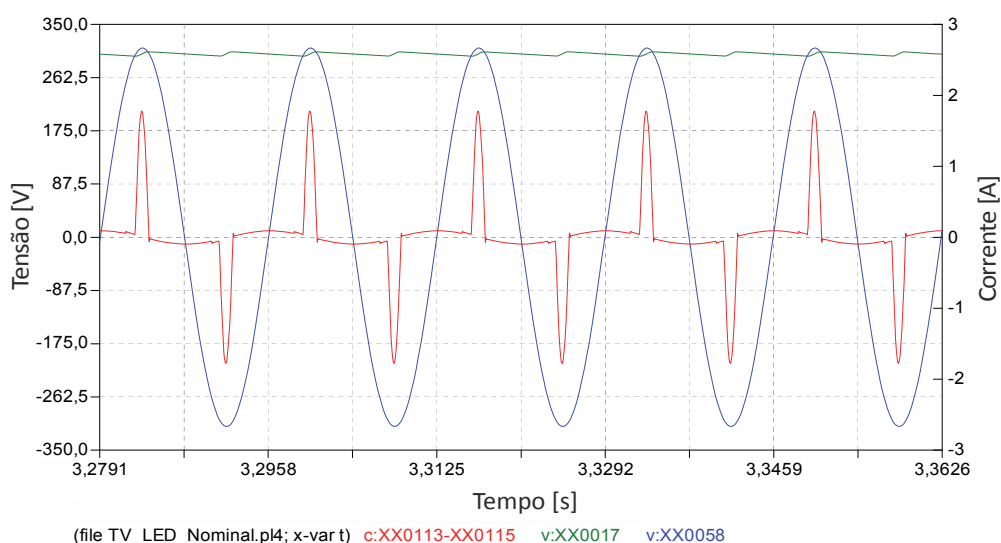


Figura 2.9 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) – Suprimento ideal e nominal – resultados computacionais – Caso 01

A Figura 2.10 permite observar uma pronta correlação entre as componentes harmônicas computacionais e experimentais presentes no televisor.

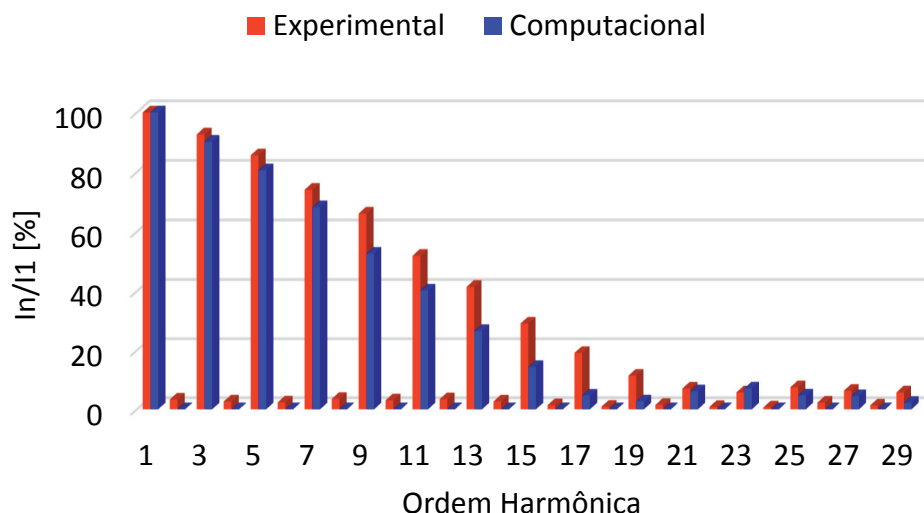


Figura 2.10 Espectro harmônico da corrente de entrada – Experimental e computacional – Caso 01

A Tabela 2.2 resume as principais grandezas monitoradas e computacionalmente obtidas para o aparelho televisor ora estudado.

Tabela 2.2 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob condições ideais e nominais de suprimento – Caso 01

LOCAL		GRANDEZA	EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	DESVIO
Entrada	Corrente	Valor eficaz [mA]	463	502	8,42 %
		Harmônicas mais 3ª	92,63	90,15	2,68 %
		Significativas [%] 5ª	85,62	80,54	5,93 %
		DTI [%]	178,20	157,12	11,82 %
		Valor de pico [A]	1,72	1,77	2,90 %
Barramento CC	Tensão	Valor médio [V]	298,81	301,20	0,79 %

Os resultados são indicativos que o modelo computacional proposto e implementado se apresenta com uma boa margem de exatidão qualitativa e quantitativa quando da operação do equipamento sob condições ideais de suprimento.

2.2.4.1 Condições operativas não ideais

Como de praxe, os estudos compreendem, para uma mesma condição imposta para a tensão de suprimento, a obtenção de informações para correlacionar e validar os resultados advindos das simulações com seus correspondentes extraídos de ensaios laboratoriais. Desta forma, as atividades descritas na sequência desta tese visam, sobretudo, evidenciar os impactos relacionados com distúrbios na rede de suprimento sobre o equipamento focado, nos termos estabelecidos pelos casos

identificados por 2 até 6, e proceder, assim, a uma análise do grau de aderência do modelo às situações práticas passíveis de manifestação em campo.

a) Suprimento com Tensões Distorcidas - Caso 02

Essa situação encontra-se direcionada ao processo avaliativo da influência de uma tensão de suprimento contendo distorções harmônicas sobre o funcionamento do televisor sob análise. Muito embora um conjunto de investigações com distintos níveis de distorções tenha sido explorado, apenas um caso foi selecionado para apresentação e discussões.

A Tabela 2.3 resume, para a situação escolhida, os valores percentuais dos harmônicos individuais de tensão, assim como o nível de distorção total de tensão (DTT) empregado, para a tensão fase-neutro programada na fonte.

Tabela 2.3 Distorções Harmônicas Total e Individuais

DISTORÇÃO HARMÔNICA					
Total (DTT)	Individual (DTI)				
20%	3º Ordem	5º Ordem	7º Ordem	11º Ordem	13º Ordem
	15%	10%	5%	5%	5%

As Figura 2.11 (experimental) e Figura 2.12 (computacional) mostram os resultados obtidos para a tensão de suprimento, tensão no barramento CC e corrente total do equipamento em foco.

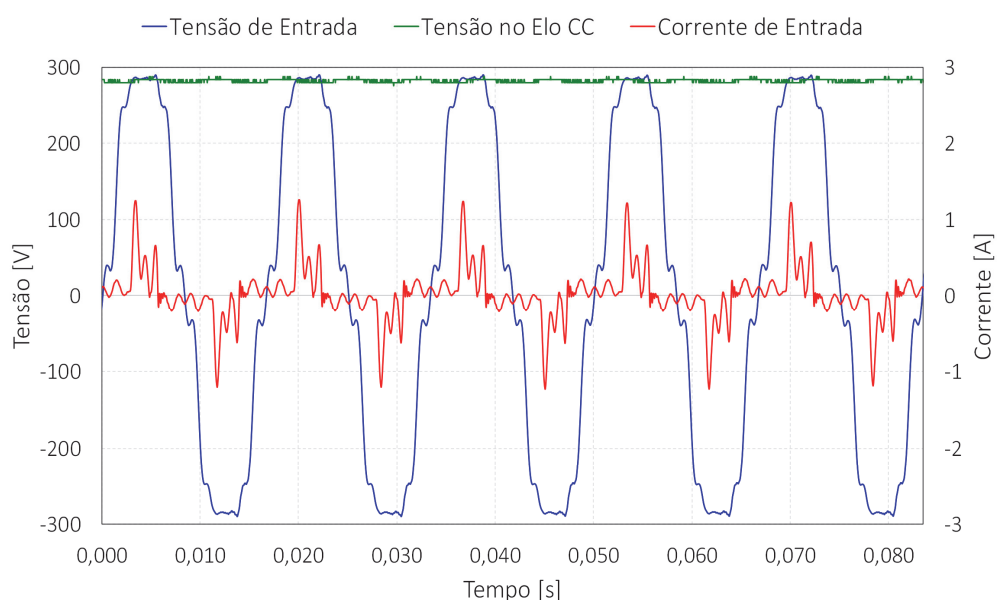


Figura 2.11 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% – resultados experimentais – Caso 02

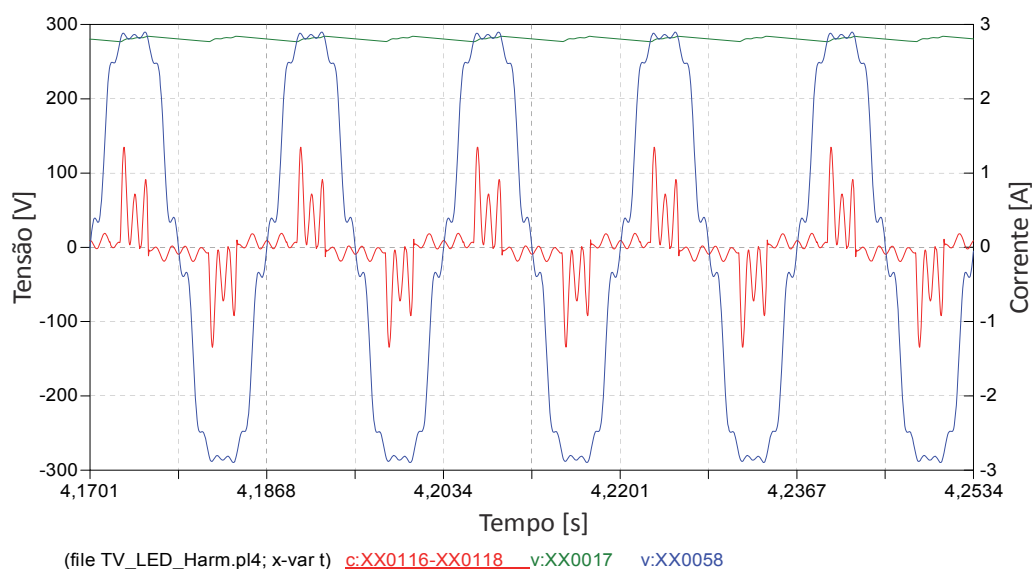


Figura 2.12 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% – resultados computacionais – Caso 02

As figuras evidenciam, novamente, uma boa concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos, fato este que, mais uma vez, corrobora a adequação do modelo implementado computacionalmente.

A Figura 2.13 representa o espectro harmônico das correntes, do televisor e do modelo, para os trabalhos laboratoriais e computacionais.

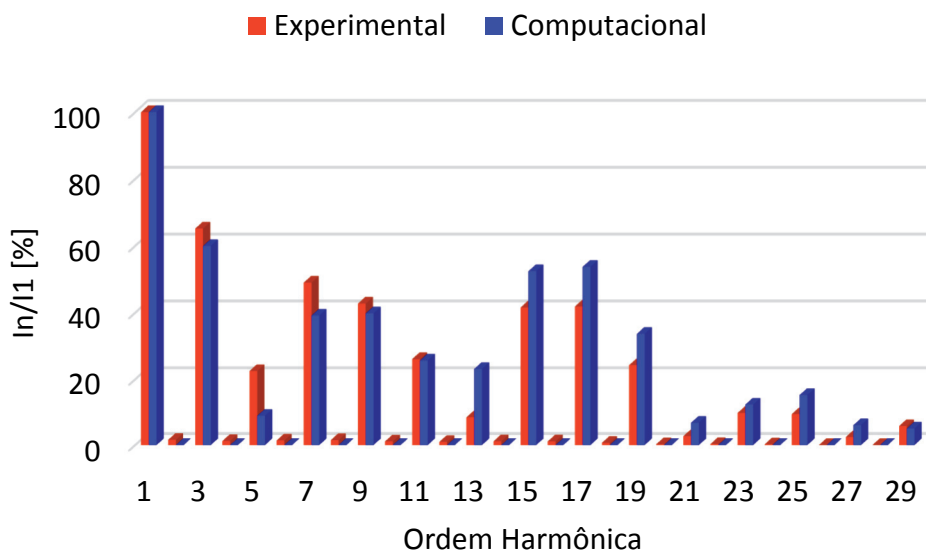


Figura 2.13 Espectro harmônico da corrente de entrada do televisor a LED - Suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% - resultado experimental e computacional - Caso 02

A Tabela 2.4 sintetiza os resultados obtidos das análises computacionais e experimentais. Como anteriormente, constata-se uma boa concordância entre os valores, mostrando, assim, que o modelo proposto se apresenta compatível com as condições ora postas.

Tabela 2.4 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo distorção harmônica total (DTT) de 20% – Caso 02

LOCAL		GRANDEZA		EXPERIMENTAL	COMPUTACIONAL	DESVIO
Entrada	Corrente	Valor eficaz [mA]		397	454	14,35 %
		Harmônicas mais	3ª	65,18	59,91	8,08 %
		Significativas [%]	7ª	48,99	39,99	18,37 %
		DTI [%]		118,39	123,27	4,12 %
		Valor de pico [A]		1,38	1,42	2,89 %
Barramento CC	Tensão	Valor médio [V]		283,81	280,6	0,79 %

b) Suprimento com Flutuações na Tensão - Caso 03

Um outro tipo de distúrbio encontrado nas redes elétricas está associado com flutuações dos valores eficazes das tensões de suprimento em frequências perniciosas ao conforto visual humano. Para fins deste processo avaliativo optou-se pelo uso dos padrões de flutuação contemplados em [78]. Estes se apresentam em conformidade com a recomendação da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), em sua publicação IEC 61000-4-15 intitulada “Flickermeter – Functional and Design Specifications”. Ressalta-se que o caso selecionado para apresentação nesta tese consiste numa condição mais severa do que aquelas frequentemente encontradas nos sistemas elétricos. Esta escolha, no entanto, tem por finalidade intensificar e melhor ilustrar a resposta do equipamento quando da ocorrência destas condições operacionais.

A Figura 2.14 ilustra os oscilogramas da tensão de entrada, tensão no barramento CC e da corrente total, obtidos experimentalmente, para um suprimento contendo flutuação de tensão atingindo um nível de PST=5 (Perception of Light Flicker in the Short Term) e frequência da moduladora de 13,5 Hz.

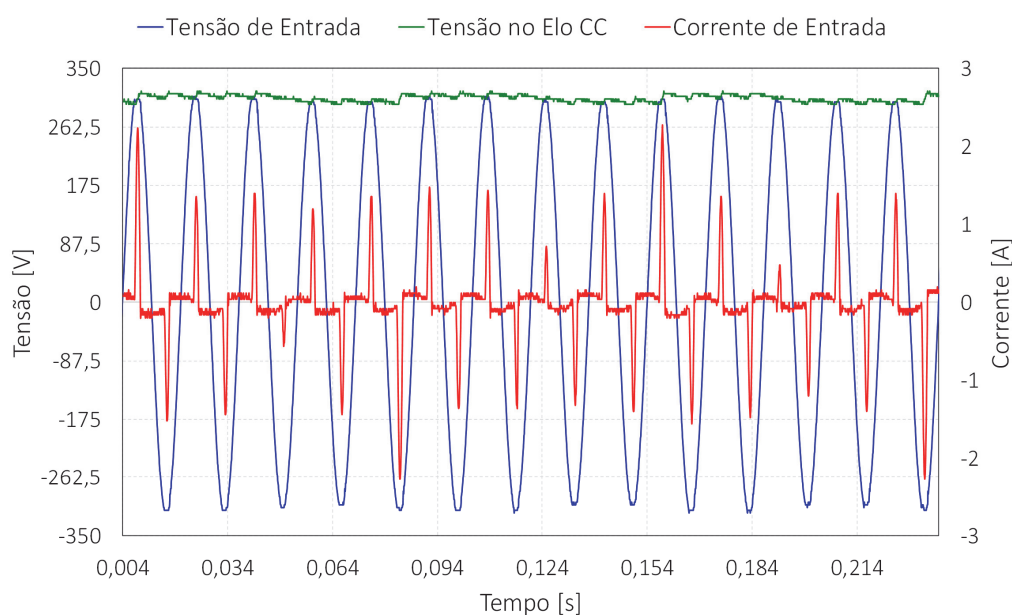


Figura 2.14 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo flutuação de tensão: PST=5 e Frequência da moduladora de 13,5 Hz – resultados experimentais – Caso 03

Os resultados computacionais correspondentes encontram-se indicados na Figura 2.15.

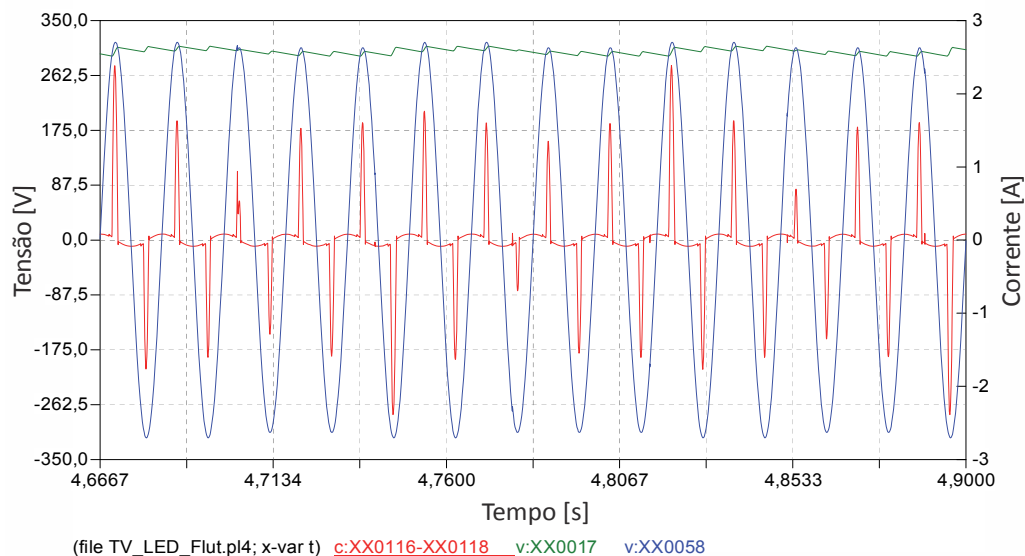


Figura 2.15 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo flutuação de tensão: PST=5 e Frequência da moduladora de 13,5 Hz – resultados computacionais – Caso 03

Analisando comparativamente os desempenhos experimentais com os computacionais constata-se que os picos de correntes foram, respectivamente, de 2,38 A e 2,46 A. No que tange aos demais aspectos, novamente fica ratificada uma boa concordância entre os resultados.

c) Suprimento com Afundamentos Temporários de Tensões - Caso 04

Os estudos em questão foram realizados para um afundamento de 40% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos. A Figura 2.16 ilustra as formas de onda para a tensão aplicada, tensão no barramento CC e corrente na entrada do televisor a LED avaliado.

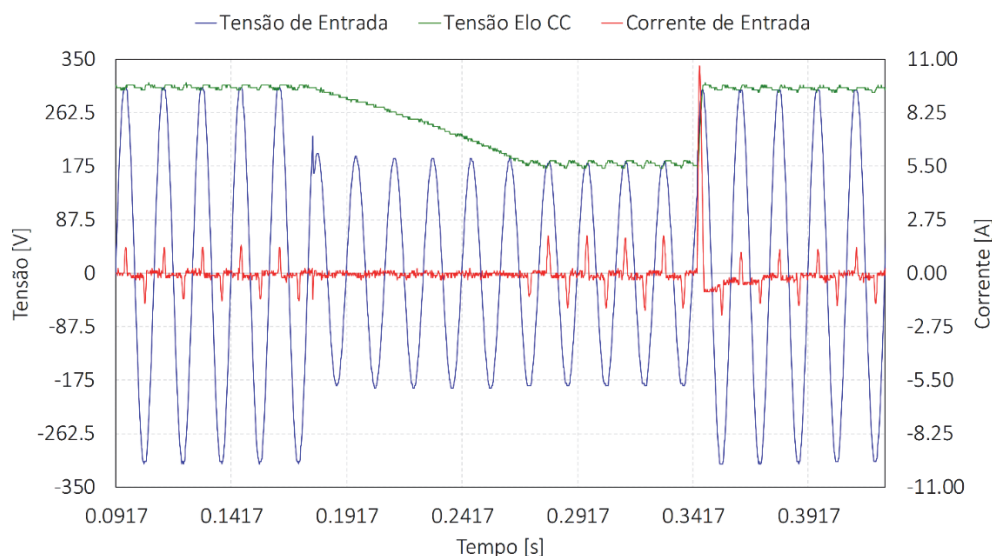


Figura 2.16 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – resultados experimentais – Caso 04

Como para os demais casos, a Figura 2.17 ilustra os desempenhos computacionais correspondentes.

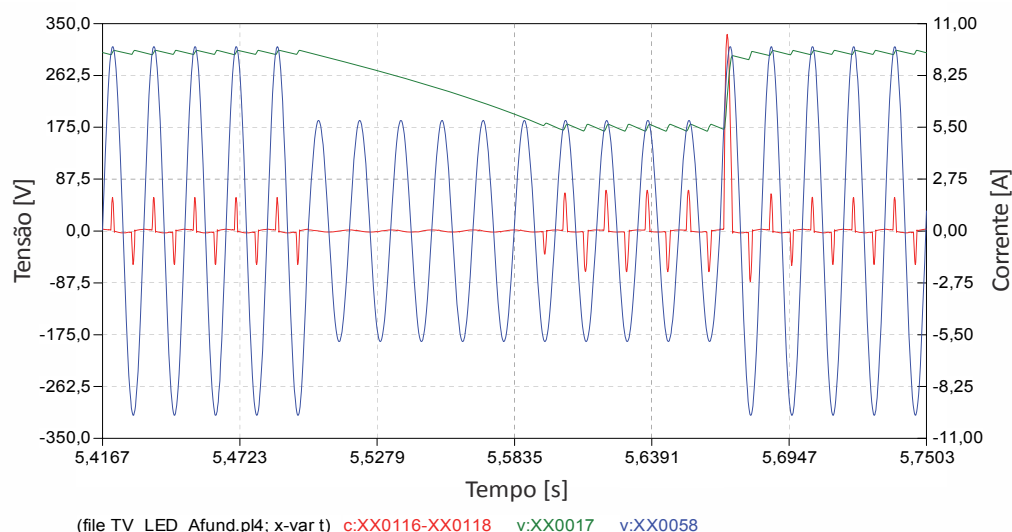


Figura 2.17 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo um afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – resultados computacionais – Caso 04

Em decorrência do afundamento de tensão aqui utilizado, a corrente solicitada pelo aparelho de TV a LED se anula pela polarização reversa dos diodos da ponte retificadora, permanecendo nesta condição durante os 7 primeiros ciclos do fenômeno. Uma vez restabelecida a tensão, como se constata nas figuras, ocorre um pico de corrente (cerca de 5,5 vezes o valor nominal) devido à recarga do capacitor, restabelecendo a condição de regime permanente após alguns ciclos.

Observa-se também que a tensão no barramento CC acusou um afundamento correspondente, apresentando um decréscimo em seu valor para um nível compatível com aquele apresentado pela tensão de alimentação. Isto ocorreu a cerca de 5 ciclos após o início do fenômeno manifestado na tensão de alimentação. Analogamente, a tensão retorna ao seu patamar inicial quando a tensão da rede restabelece seu valor nominal.

A Tabela 2.5 sintetiza as principais grandezas obtidas e compara seus valores. Mais uma vez fica evidenciado que o modelo computacional se apresenta com uma boa aderência em relação ao funcionamento experimental do Televisor a LED.

Tabela 2.5 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo afundamento de tensão de 40% com duração de 10 ciclos – Caso 04

		TENSÃO [V]			CORRENTE [A]		
		Exper.	Comput.	Desvio	Exper.	Comput.	Desvio
Valores de Pico		304,13	308,26	1,35 %	10,44	10,32	1,14 %
Valores eficazes	Pré-evento	218,76	220	0,56 %	0,446	0,412	7,62 %
	Durante	130,8	132	0,91 %	0,568	0,571	0,52 %

d) Suprimento com Interrupções das Tensões - Caso 05

De acordo com os padrões estabelecidos pelos documentos normativos sobre a matéria, a categoria “interrupção” deve compreender reduções de tensões que conduzam a um valor final de 0,1 pu ou abaixo. Diante desta imposição, o caso aqui considerado contempla uma súbita queda da tensão de suprimento de tal forma que a mesma foi reduzida a zero durante 10 ciclos. Na Figura 2.18 estão ilustradas as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente total absorvida pelo componente durante o referido experimento.

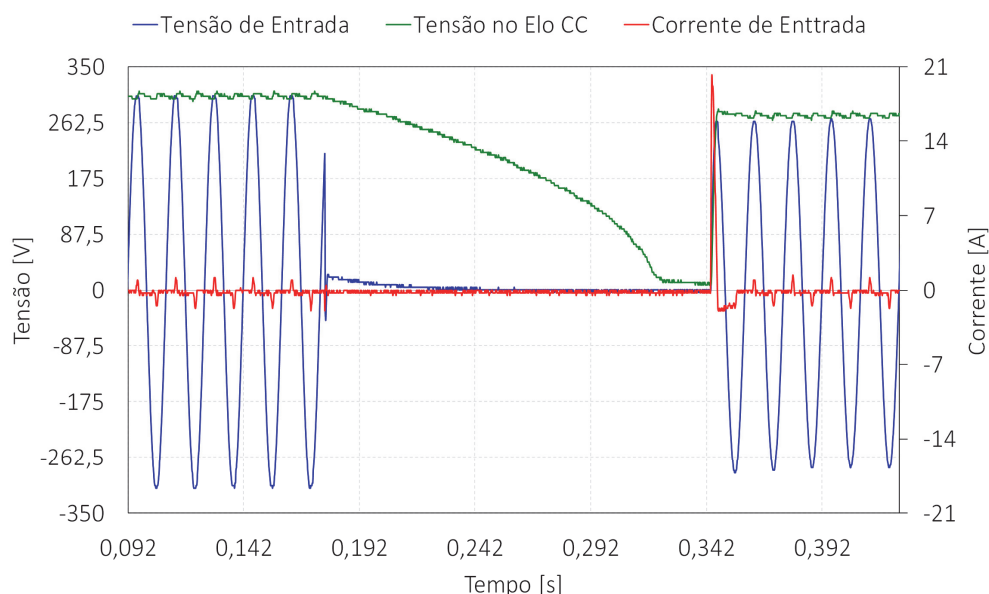


Figura 2.18 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos – resultados experimentais – Caso 05

Observa-se, novamente, que no instante da aplicação da interrupção, a corrente na entrada do aparelho de TV a LED se anula, fato este que ocasiona o desligamento do televisor, permanecendo nesta situação enquanto perdura o distúrbio. No instante do restabelecimento da tensão aos padrões normais, o pico de corrente atinge 13 vezes o seu valor nominal quando dos estudos experimentais e 11 vezes para o caso computacional. Isto pode ser comprovado pela Figura 2.19.

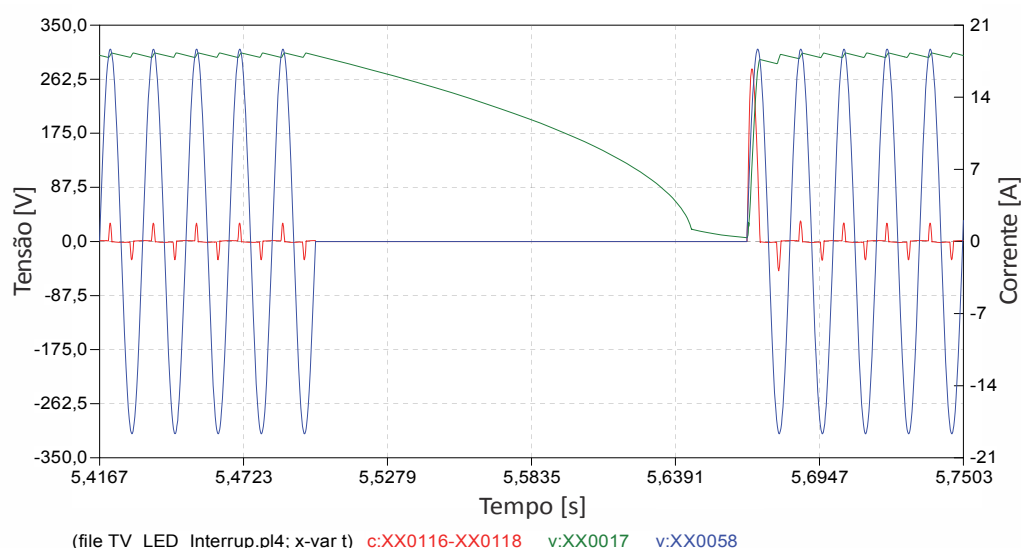


Figura 2.19 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma interrupção de tensão de 0% com duração de 10 ciclos – resultados computacionais – Caso 05

Com relação ao comportamento da tensão no barramento CC, verifica-se um comportamento semelhante ao descrito para o afundamento de tensão. Entretanto, diferentemente do televisor a tubo [37], a tensão no barramento CC chegou a praticamente zero, justificando o desligamento do mesmo. Isto evidencia uma menor robustez do equipamento a LED, perante um evento dessa natureza, quando comparado com tecnologias mais antigas. Não obstante a isto, destaca-se que, mais uma vez, houve uma grande semelhança entre os resultados obtidos por ambos os métodos, fato este que ratifica o desempenho do modelo computacional implementado.

Tabela 2.6 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% por 10 ciclos – Caso 05

		TENSÃO (V)			CORRENTE (A)		
		Exper.	Comput.	Desvio	Exper.	Comput.	Desvio
Valores de Pico		0,0	0,0	0,0 %	20,12	18,02	10,43 %
Valores eficaz	Pré-evento	218,7	220	0,55 %	0,446	0,412	7,62 %
	Durante	0,0	0,0	0,0 %	0,0	0,0	0,0 %

e) Suprimento com Elevações de tensão – Caso 06

Esta última situação encontra-se direcionada ao processo avaliativo do desempenho do modelo computacional sob a ação de uma elevação momentânea de tensão para 120% do valor nominal, com duração de 10 ciclos.

As Figura 2.20 e Figura 2.21 mostram as formas de onda da tensão de suprimento, tensão no barramento CC e da corrente de entrada do dispositivo, para os casos experimental e computacional, respectivamente.

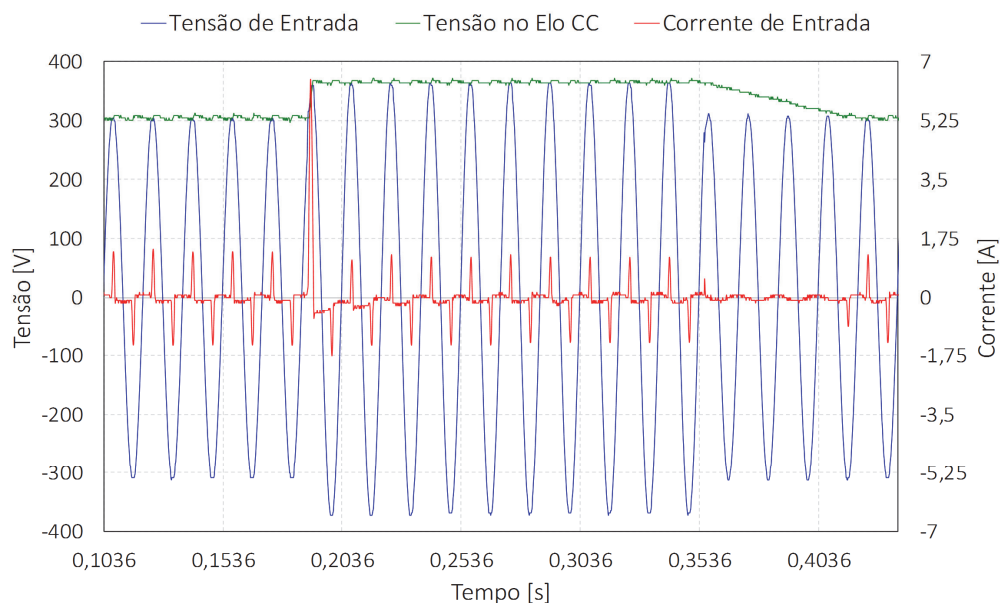


Figura 2.20 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma elevação momentânea de 20% por 10 ciclos – resultados experimentais – Caso 06

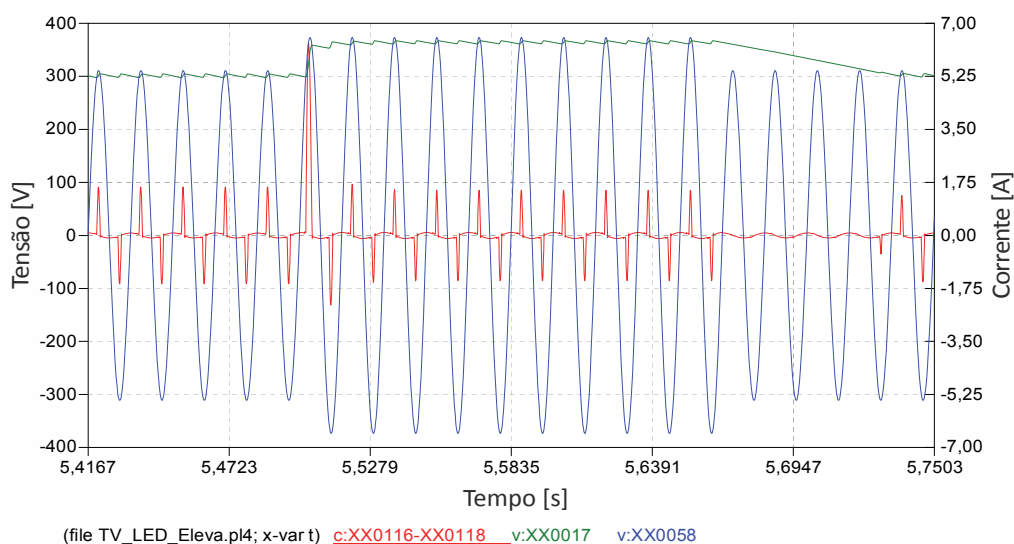


Figura 2.21 Tensão de alimentação (azul), tensão no barramento CC (verde) e corrente de entrada (vermelho) - Suprimento contendo uma elevação momentânea de 20% por 10 ciclos – resultados computacionais – Caso 06

Observa-se nos resultados que, no instante da elevação da tensão, ocorre um pico de corrente de cerca de 4 vezes o valor nominal, fato este associado com o comportamento transitório do capacitor do barramento CC. Ao término da perturbação, a corrente se anula por alguns ciclos, assumindo os valores de regime permanente em seguida. Esse fenômeno se reflete também na tensão do barramento CC, de forma inversa àquela observada quando do afundamento de tensão analisado.

Tabela 2.7 Comparativo entre os resultados computacionais e experimentais sob suprimento contendo uma elevação momentânea de 20% por 10 ciclos – Caso 06

		TENSÃO (V)			CORRENTE (A)		
		Exper.	Comput.	Desvio	Exper.	Comput.	Desvio
Valores de Pico		355,60	357,48	0,52 %	6,48	6,93	6,94 %
Valores eficaz	Pré-evento	218,65	220	0,061 %	0,446	0,412	7,62 %
	Durante	262,51	263,99	0,56 %	0,391	0,422	7,92 %

Nesta última etapa do processo de validação da modelagem proposta para a fonte do televisor a LED, conforme indica os resultados sintetizados pela Tabela 2.7, constata-se, mais uma vez, uma boa concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos, fato este que ratifica as questões de ordem qualitativa e quantitativa do modelo proposto e implementado computacionalmente.

2.3 Síntese das Modelagens dos Equipamentos da Linha Branca

Muito embora o reconhecimento que as considerações feitas a seguir estejam atreladas tão somente com uma mera transcrição resumida de resultados de desenvolvimentos conduzidos em [42] e [79], vale aqui ressaltar que a motivação para tal procedimento se apresenta motivada pelo fato que os equipamentos (refrigeradores, freezers, máquinas de lavar roupas, máquinas de lavar louças e condicionadores de ar tipo Split) são, neste trabalho de pesquisa, explorados quanto as suas respectivas limitações térmicas e dielétricas.

2.3.1 Refrigeradores

A Figura 2.22 indica o refrigerador doméstico utilizado. O mesmo possui uma única porta, capacidade de 320 litros, tensão 127 V e potência 95 W. Este equipamento, assim como os demais da linha branca, serão considerados de forma resumida, visto que maiores detalhes sobre os modelos estabelecidos e respectivas validações são encontradas nas referências supramencionadas.



Figura 2.22 Refrigerador utilizado: (a) Vista frontal externa e (b) Vista posterior com os principais componentes

A Figura 2.23 ilustra o diagrama elétrico do motor selecionado e seus dispositivos de proteção, cujos maiores detalhes podem ser encontrados junto ao seu fabricante [80].

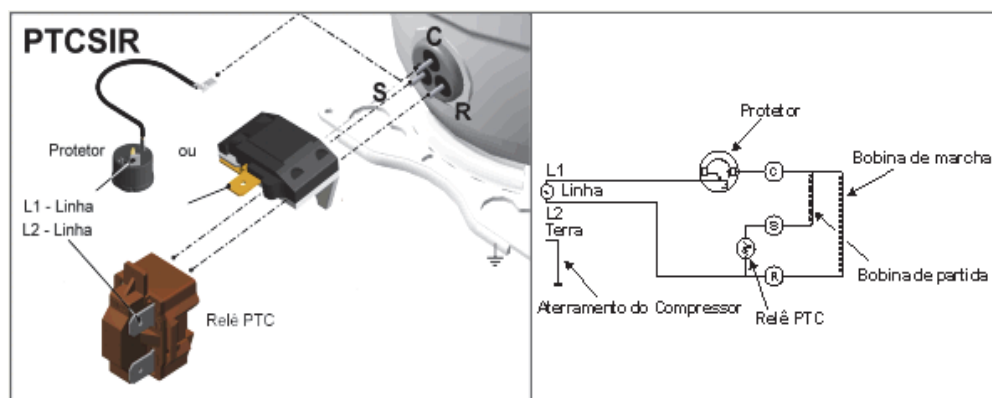


Figura 2.23 - Representação do diagrama elétrico do motor PTCSIR

O modelo matemático foi desenvolvido com base nas equações dos enlaces de fluxo e da equação de equilíbrio dos conjugados [30]. As equações são escritas para uma máquina monofásica, resultando num conjunto de equações diferenciais, não lineares, que representam a operação da máquina. Para tal, foi utilizado o modelo elementar de uma máquina de indução ideal, bifásica, assimétrica, 2 polos, [81], constituído por dois enrolamentos estatóricos, defasados de 90° no espaço, com características diferentes. O rotor em gaiola é representado por dois enrolamentos idênticos, também defasados de 90° no espaço. Na Figura 2.24 encontra-se ilustrada esquematicamente a representação do dispositivo, com seus respectivos enrolamentos e defasagens.

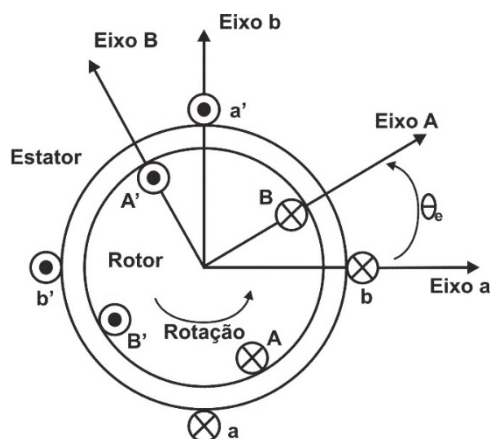


Figura 2.24 Representação do motor de indução bifásico assimétrico.

O programa usado para os estudos computacionais foi o ATP (*Alternative Transients Program*), o qual é uma ferramenta com boa aceitação no setor elétrico para estudos e análises de sistemas elétricos no domínio do tempo, através do qual foi obtida a representação indicada na Figura 2.25.

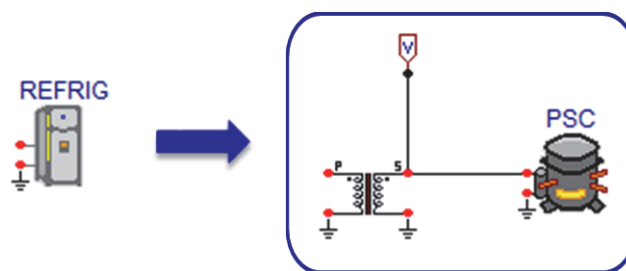


Figura 2.25 Representação do refrigerador no ATPDraw

2.3.2 Freezers

Quanto a este produto, os trabalhos focaram um equipamento doméstico, vertical e com capacidade de 195 litros, tensão 220 V e potência 115 W, conforme ilustra a Figura 2.26.

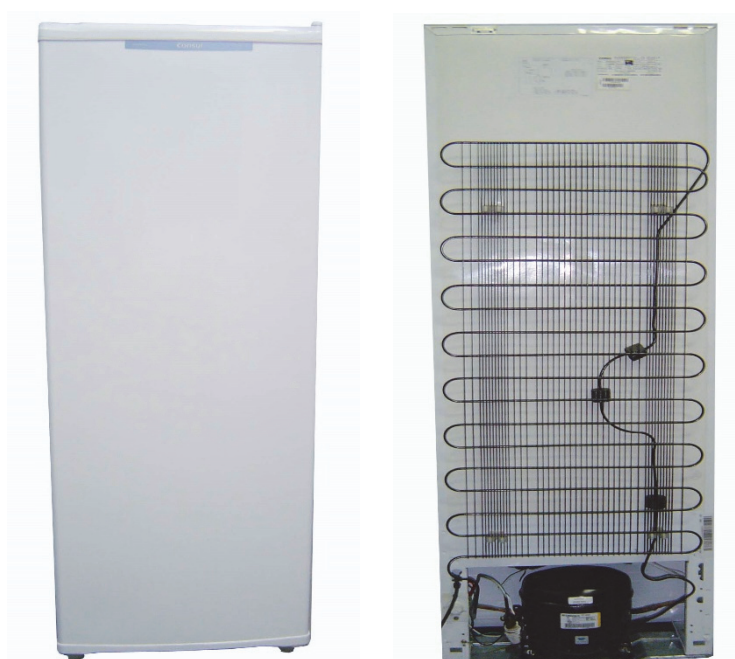


Figura 2.26 Freezer utilizado: (a) Vista frontal externa e (b) Vista posterior com os principais componentes

A Figura 2.27 ilustra o diagrama elétrico do motor utilizado no freezer e seus dispositivos de proteção, cujos maiores detalhes podem ser encontrados junto ao seu fabricante [33].

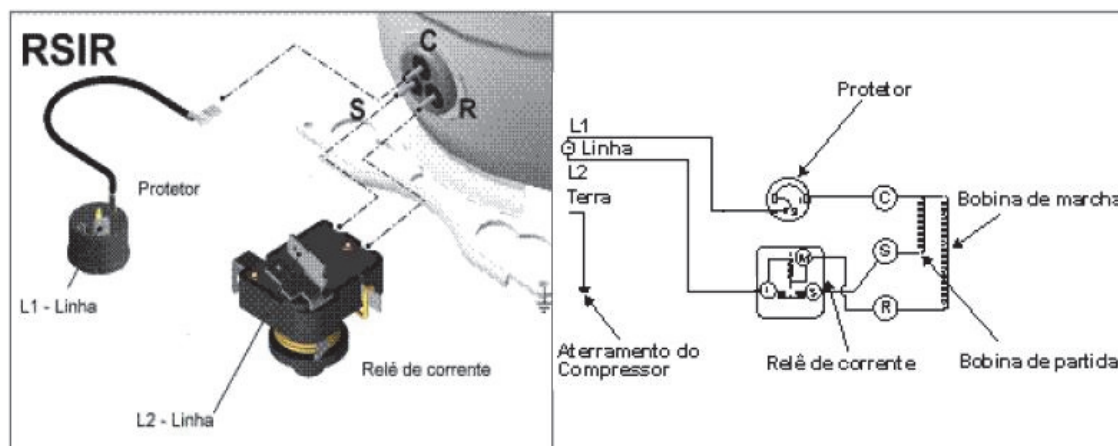


Figura 2.27 Representação do diagrama elétrico do motor do freezer

A Figura 2.28 ilustra o bloco representativo do freezer no ATPDraw.

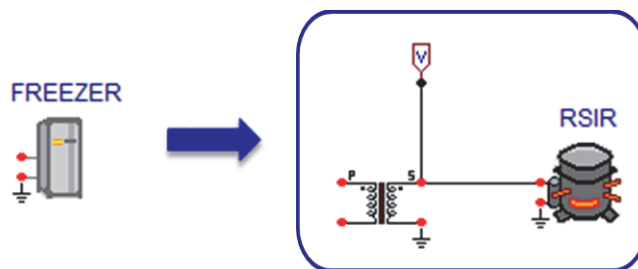


Figura 2.28 Representação do freezer no ATPDraw

2.3.3 Máquinas de Lavar Roupas

O equipamento empregado se apresenta do tipo com abertura superior, capacidade de 6 quilos de roupa, tensão 127 V e potência de 530 W, conforme ilustra a Figura 2.29.

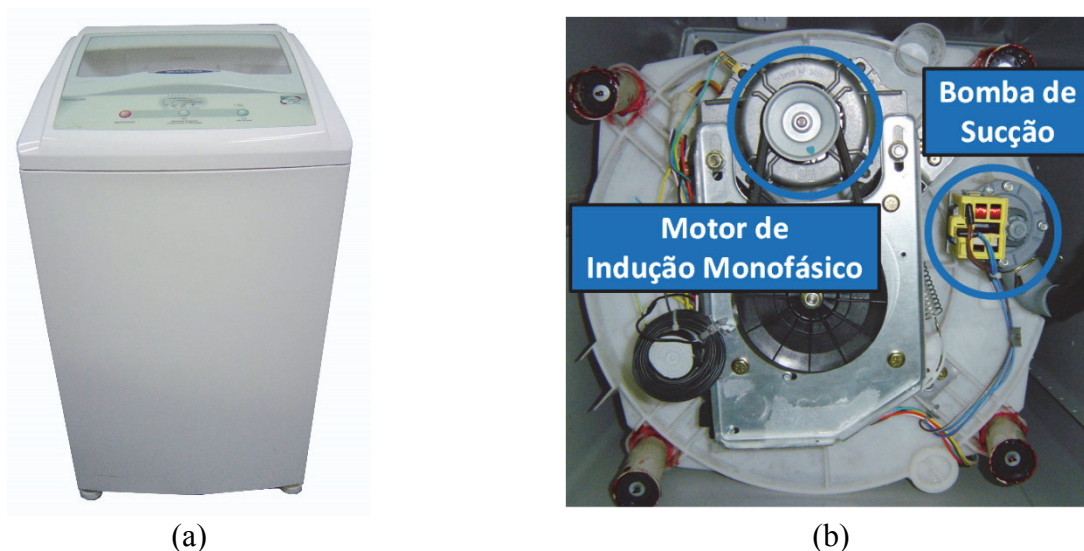


Figura 2.29 Máquina de lavar roupas utilizada: (a) Vista frontal externa e (b) Vista inferior interna com detalhes físicos

Diferente dos equipamentos anteriores, esse eletrodoméstico possui uma parte eletrônica responsável pela programação das funções realizadas pelo equipamento. A Figura 2.30 mostra com detalhes os principais sistemas comentados.



Figura 2.30 Detalhe do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas

Reconhecendo que os principais componentes elétricos da máquina de lavar roupa se apresentam na forma do circuito eletrônico anteriormente posto e um motor de indução monofásico. No que tange à estrutura eletrônica, esta é representada pelo circuito equivalente da Figura 2.31.

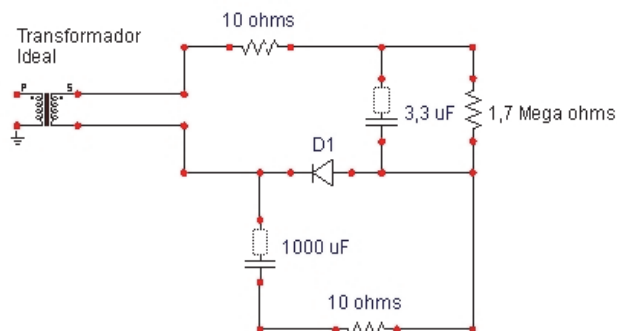


Figura 2.31 Equivalente do circuito eletrônico da máquina de lavar roupas

Quanto a unidade motora propriamente dita, esta encontra-se representada em total consonância com o tipo de acionamento e seus complementos, como destacado na referência [42], arranjo este que conduziu ao modelo final constante na Figura 2.32.

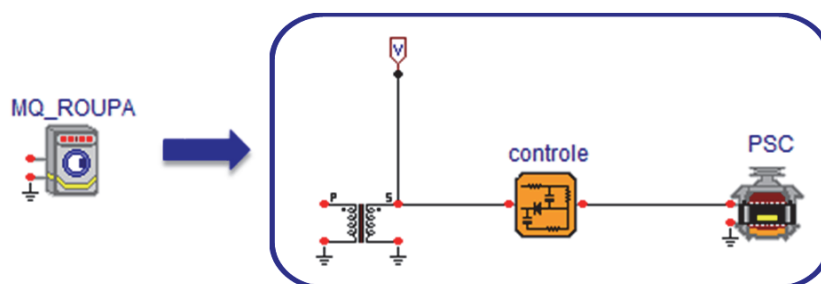


Figura 2.32 Representação da máquina de lavar roupas no ATPDraw

2.3.4 Máquinas de Lavar Louças

O equipamento empregado consiste numa máquina com capacidade de 25 litros, tensão de 220 V e potência de 1370 W, conforme ilustra a Figura 2.33 (a).



Figura 2.33 Máquina de lavar louças sob ensaio: (a) Vista frontal externa e (b) Vista inferior interna com detalhes físicos

Os principais componentes elétricos da lava louças, são: sistema de aquecimento, caracterizado por uma resistência elétrica; sistema de bombeamento, representado pela eletrobomba de circulação; sistema de controle, constituído por um circuito eletrônico.

A Figura 2.33 (b) ilustra a parte inferior desse equipamento, onde está localizado o seu sistema de aquecimento, composto por uma resistência elétrica e o sistema de bombeamento, formado principalmente por uma eletrobomba de circulação [42]. A parte eletrônica da máquina de lavar louças está indicada na Figura 2.34.

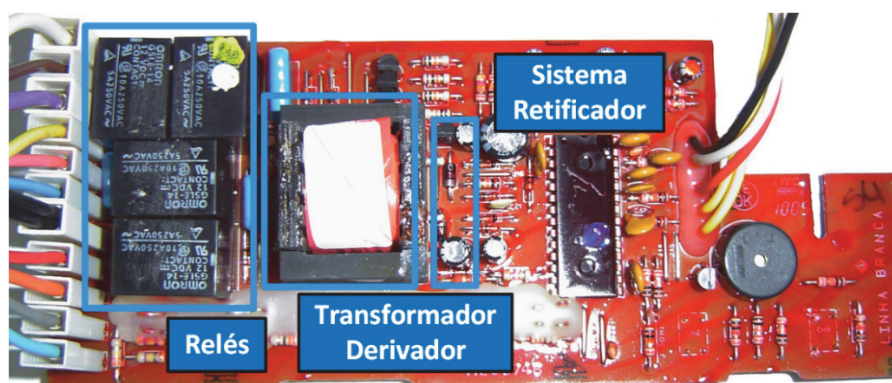


Figura 2.34 Foto da placa eletrônica da lava louças

O circuito eletrônico equivalente encontra-se ilustrado na Figura 2.35.

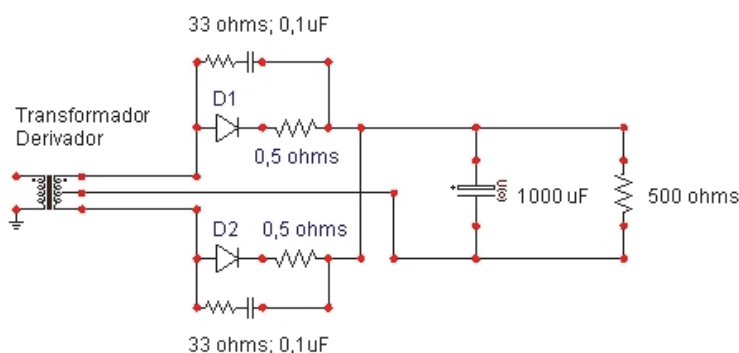


Figura 2.35 Equivalente do circuito eletrônico da lava louças no ATPDraw

Com base nas características dos sistemas de controle, bombeamento e aquecimento, aliado a toda descrição supracitada, foram desenvolvidos os trabalhos para a representação computacional do equipamento na plataforma ATP, os quais conduziram ao modelo constante na Figura 2.36.

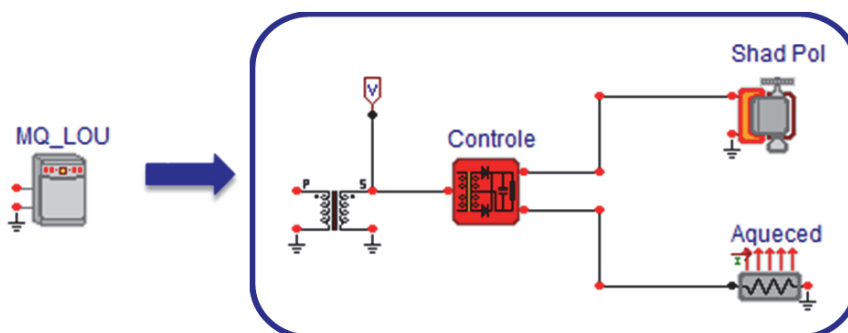


Figura 2.36 Representação da máquina de lavar louças no ATPDraw

2.3.5 Condicionadores de Ar Split

O produto em pauta é do tipo Split, de 7500 BTU/h, tensão de 220 V e potência de 762 W, conforme ilustra a Figura 2.37, que mostra a unidade evaporadora e a condensadora.



(a) (b)
Figura 2.37 Condicionador de ar utilizado: (a) Evaporadora e (b) Condensadora

Somado às unidades de potência, a parte eletrônica do condicionador de ar Split está indicada na Figura 2.38.

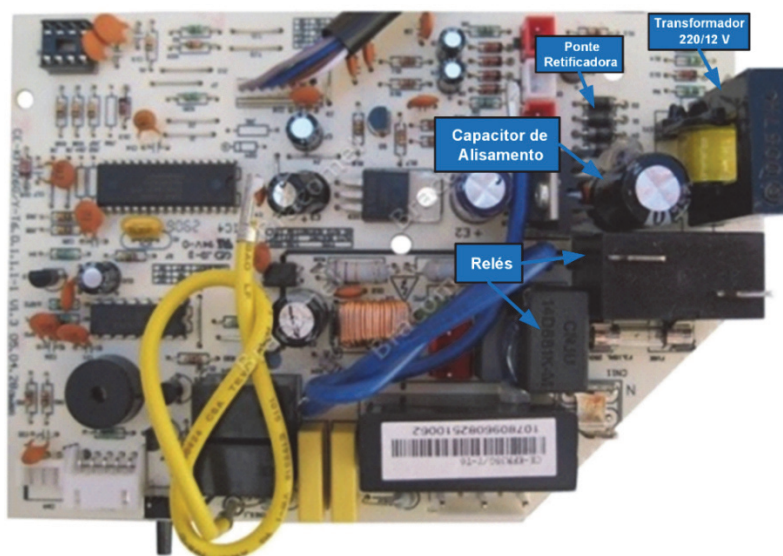


Figura 2.38 Placa eletrônica da evaporadora

A Figura 2.39 mostra o circuito implementado, enquanto que a demais são indicativas dos modelos propostos e validados para a evaporadora e a condensadora.

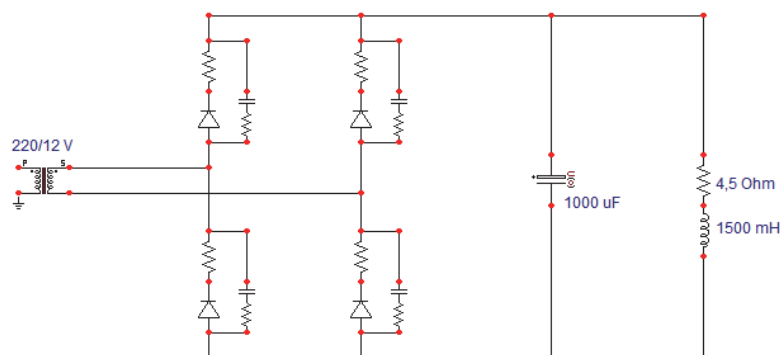


Figura 2.39 Circuito equivalente da placa eletrônica

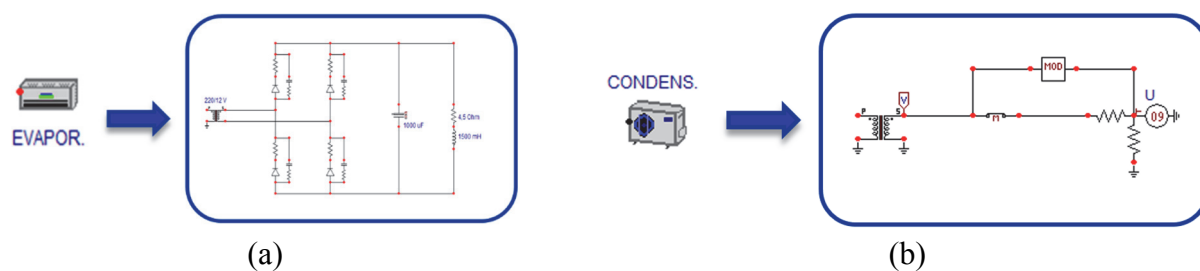


Figura 2.40 Blocos representativos no simulador ATP referente a (a) Evaporadora (b) Condensadora

2.4 Considerações finais

Este capítulo, como identificado ao longo do texto, foi imbuído do objetivo principal de estabelecer uma proposta para a modelagem dos televisores a LED e, a partir de sua implementação computacional, proceder uma estratégia para a validação da mesma. Para tanto, como esclarecido, analisou-se comparativamente o desempenho do equipamento em pauta, contemplando situações operacionais adversas e as respostas oferecidas pelo ATPDraw e correspondentes condições operativas impostas experimentalmente, nos termos estabelecidos nesta tese. De um modo geral, constatou-se uma boa correlação entre os resultados de cunho teórico/computacional com aqueles obtidos dos ensaios, fato este que ratificou, qualitativa e quantitativamente, um bom desempenho do modelo computacional proposto feito.

No que tange aos demais equipamentos explicitados no texto, quais sejam, aqueles denominados por produtos da linha branca, estes foram sintetizados quanto aos seus modelos, visto que tais representações foram, efetivamente, extraídas de trabalhos anteriores conduzidos no âmbito da UFU. A justificativa para a inclusão destes modelos se apoia, fundamentalmente, na inexistência de informações associadas com tais eletrodomésticos, quanto aos seus limites de suportabilidade e sensibilidade às tensões e correntes impostas. Tema este que será explorado em detalhes nas seções subsequentes desta tese e que se apresenta com bases para a sustentação dos processos de análise dos pedidos de indenização por danos elétricos, assunto este que constitui o alicerce desta pesquisa.

CAPÍTULO 3

LIMITES DE SUPORTABILIDADE TÉRMICA

3.1 Considerações iniciais

A fim de avaliar a consistência dos pedidos de ressarcimento por danos nos equipamentos, quando da ocorrência de fenômenos elétricos nas redes de distribuição, a saber daqueles citados na Figura 1.6, a filosofia aqui estabelecida se apoia no princípio da correlação entre causas e efeitos, isto é, na avaliação da intensidade dos distúrbios manifestados nas redes elétricas e respectivo confronto com os padrões dielétricos e térmicos considerados como admissíveis pelos produtos, conforme as referências [77] [82] [83] [84].

Consultas diversas feitas à literatura revelam algumas publicações associadas com resultados de avaliações experimentais sobre a matéria. Não obstante, a utilização de tais bancos de dados, trabalhos complementares conduzidos no âmbito da UFU [77], também forneceram uma base de dados advinda de experimentos laboratoriais voltados para alguns equipamentos e, ao final, houve uma clara constatação de grandes diferenças entre as proposições encontradas nas publicações e aquelas efetivamente obtidas. Isto motivou a busca por meios para a obtenção dos limites ora tratados para cada produto aqui reportado quanto aos aspectos térmicos como dielétricos.

Em consonância com os objetivos postos, este capítulo encontra-se direcionado para o estabelecimento de uma metodologia destinada a obtenção dos limites admissíveis quanto às solicitações de ordem térmica, ficando aqueles vinculadas com as tensões para a sequência dos trabalhos.

No que se refere ao fenômeno ora considerado, a correlação se manifesta na forma de aumentos de corrente, correspondentes aumentos das dissipações térmicas, aquecimentos, e, por fim, os conhecidos danos de natureza física que requerem substituições de peças ou do produto danificado. Diante deste contexto, a proposição de uma metodologia para a determinação dos limites de suportabilidade térmica encontra sustentação na determinação do limite de energia admissível pelo produto em teste. Para tanto, fica evidenciada a necessidade da montagem do arranjo laboratorial que, para cumprir tal propósito, permita a geração e aplicação de níveis controláveis de correntes em proporções significativamente superiores aos seus correspondentes valores nominais.

3.2 Estratégia para a obtenção dos limites de suportabilidade térmica

Os fundamentos físicos utilizados para a obtenção dos limites térmicos encontram-se apoiados no conceito da máxima energia (I^2t) dissipada e admissível pelos componentes que compõem as partes mais sensíveis dos dispositivos avaliados. Uma vez determinada esta grandeza, o processo implementado se apoia no fato que, para qualquer valor de corrente de suprimento, haverá, por conseguinte, uma duração máxima de exposição do equipamento, responsável pela manutenção da constância da denominada energia. Isto posto, segue que a equação 3.1 constitui-se no princípio físico para a obtenção da procurada curva que expressa o limite da suportabilidade térmica aplicável a cada eletrodoméstico, em consonância com a função associada a energia para à dada corrente de suprimento.

$$\int_0^{T_D} [i(t)]^2 \cdot dt = I^2 \cdot T_D = J = cte \quad (3.1)$$

Onde:

$i(t)$: Valor instantâneo da corrente, em ampere (A), responsável pela dissipação da energia térmica máxima admissível pelo equipamento;

T_D : Intervalo de tempo, em segundos, durante o qual o equipamento foi submetido ao esforço de corrente;

J : Energia máxima admitida pelo equipamento.

Uma vez conhecida a energia máxima admissível, grandeza esta representada por J , torna-se factível a obtenção da relação $I=f(t)$, aqui tratada como limite de suportabilidade térmica ou de corrente. Para tanto, basta obter, para cada intervalo de tempo de exposição aos esforços, o correspondente valor de corrente.

Dentro destas premissas, a partir da equação 3.1 pode-se escrever:

$$J = I^2 \cdot T_D \quad (3.2)$$

$$I(t) = \sqrt{\frac{J}{T_D}} \quad (3.3)$$

Em conformidade com os procedimentos descritos, fica evidenciada que a relação representada pela equação 3.3 conduz a uma representação gráfica como ilustra a Figura 3.1.

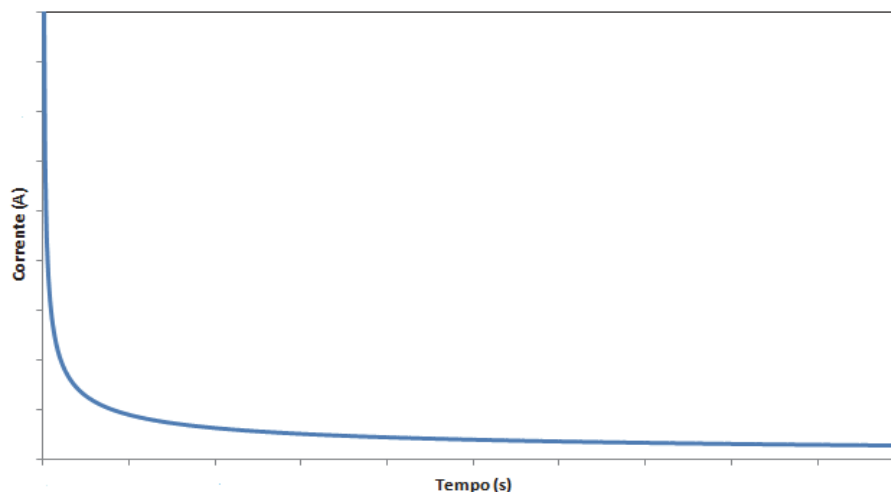


Figura 3.1 Função típica representativa dos limites térmicos admissíveis pelos equipamentos

Dentro da filosofia apresentada, trabalhos realizados em [77] refletem os resultados típicos para alguns produtos lá testados. Visando exemplificar a aplicação desta metodologia, apresenta-se, a seguir, o processo aplicado a microcomputadores, conforme detalhado em [77]. Os níveis admissíveis de energia foram 67,62 e 84,63 A².s obtidos, respectivamente, para uma condição operacional sem a presença de um estabilizador de tensão, e outra, com a inserção deste componente.

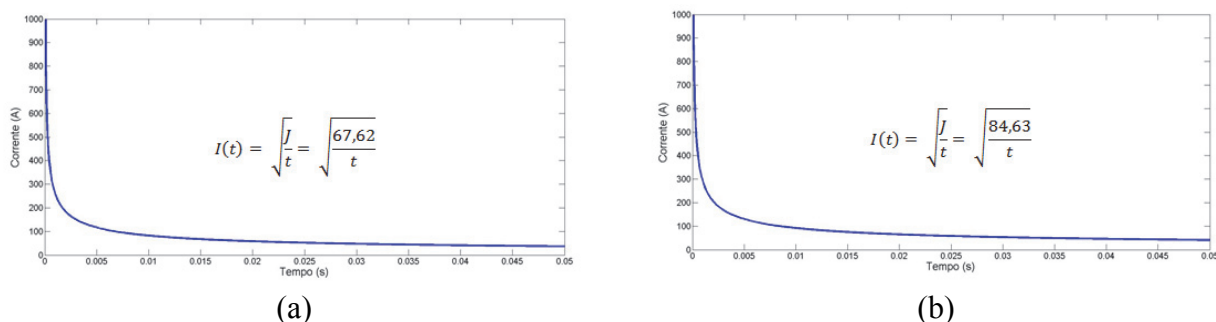


Figura 3.2 Curva UFU-CEMIG: Limites de suportabilidade térmica para microcomputadores: (a) Sem estabilizador
(b) Com estabilizador

3.3 Estrutura laboratorial para a obtenção dos limites de suportabilidade térmica

Tomando-se por base a fundamentação apresentada, a estratégia empregada para a definição da energia máxima admissível pelo equipamento apoiou-se na realização de ensaios destrutivos empregando-se, para tanto, formas de onda de corrente injetadas com características próprias às descargas atmosféricas. Essa adoção se justifica pelas recomendações internacionais estabelecidas em [39] [85] [86] [87]. Todas essas utilizam uma onda de corrente de 8μs por 20μs. O primeiro associado com o tempo de subida da onda e, o segundo, como representativo do intervalo de tempo necessário para que o impulso atinja 50% do respectivo valor de crista. Tal forma de onda é ilustrada na Figura 3.3.

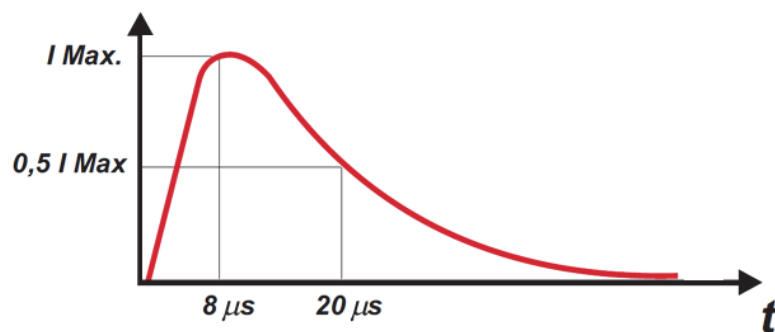


Figura 3.3 Padrão do impulso de corrente para definição do limite de energia admissível pelo equipamento sob teste

Quanto ao arranjo laboratorial, esse consiste em recursos disponibilizados pelo laboratório de alta tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI), através do qual foi utilizado para os testes aqui referidos um gerador de impulso de corrente, com capacidade máxima de 40 kA.

A Figura 3.4 sintetiza o arranjo experimental em pauta e seus principais componentes auxiliares, necessários para aquisição dos dados elétricos.

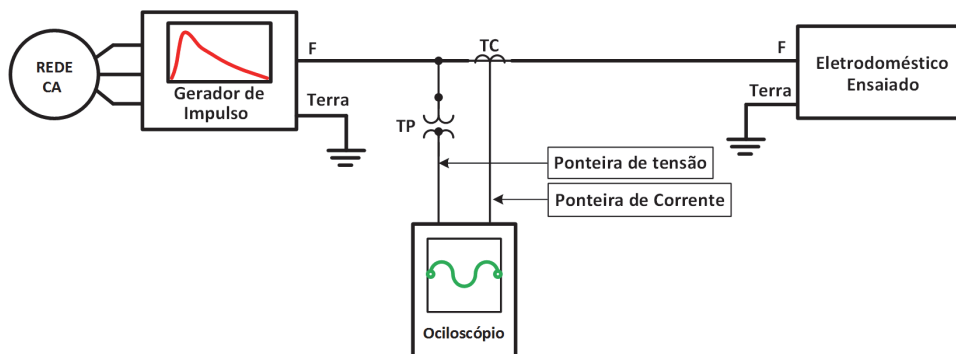


Figura 3.4 Estrutura laboratorial para o levantamento dos limites térmicos dos equipamentos

Algumas fotos de parte do gerador e alguns dos eletrodomésticos submetidos a tais impulsos, podem ser conferidos na Figura 3.5.

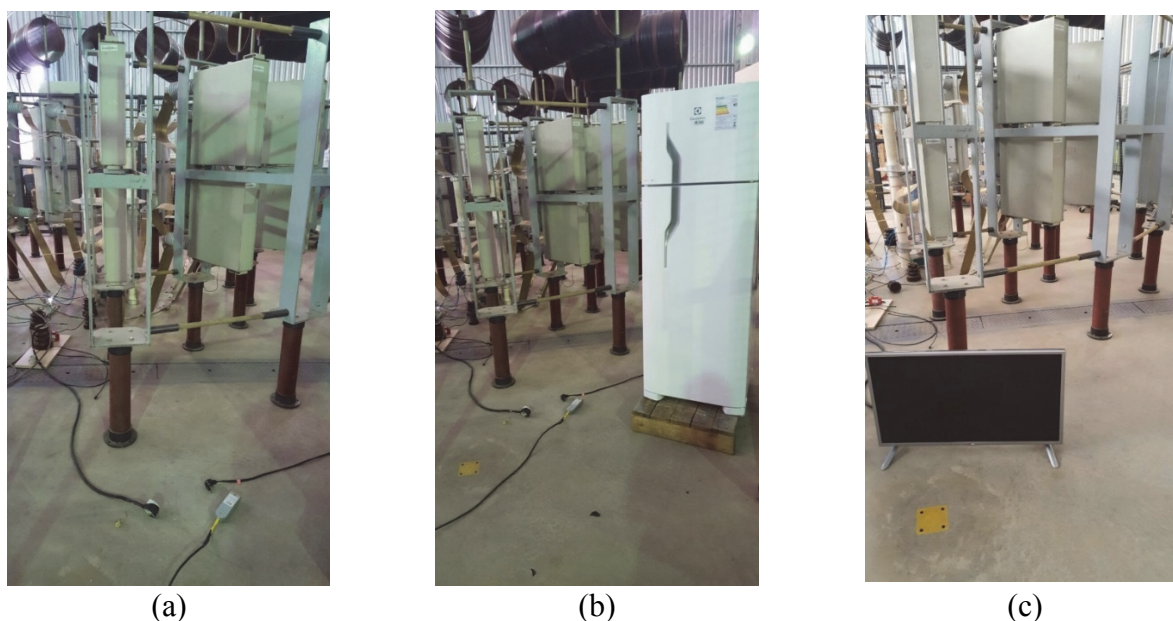


Figura 3.5 Parte da estrutura física do gerador de impulso de corrente, com eletrodomésticos testados.

3.4 Limites de suportabilidade térmica para os produtos testados

Uma vez definidas a estrutura laboratorial, os equipamentos selecionados para os estudos avaliativos focados foram, então, submetidos as mais diversas situações envolvendo a aplicação de impulsos de corrente com as características requeridas pelo ensaio e duração compatível com a identificação dos limites térmicos admissíveis de cada equipamento.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados na sequência.

3.4.1 Televisor a LED

O aparelho televisor a LED submetido ao ensaio descrito anteriormente foi, nos termos apresentados, submetido a uma corrente impulsiva conforme indicada na Figura 3.6. Nesta é possível identificar: as propriedades da corrente empregada; o momento exato em que o televisor foi danificado; o tempo de exposição (Δt) que foi da ordem de 19,15 μs e o nível máximo atingido pela corrente, que foi de 2,72 kA. A detecção do momento onde o equipamento sofre a avaria é percebido pelo comportamento da tensão, logo após tal tempo (Δt) evidencia-se uma queda acentuada em seu valor, saindo do padrão de decaimento anterior a esse ponto.

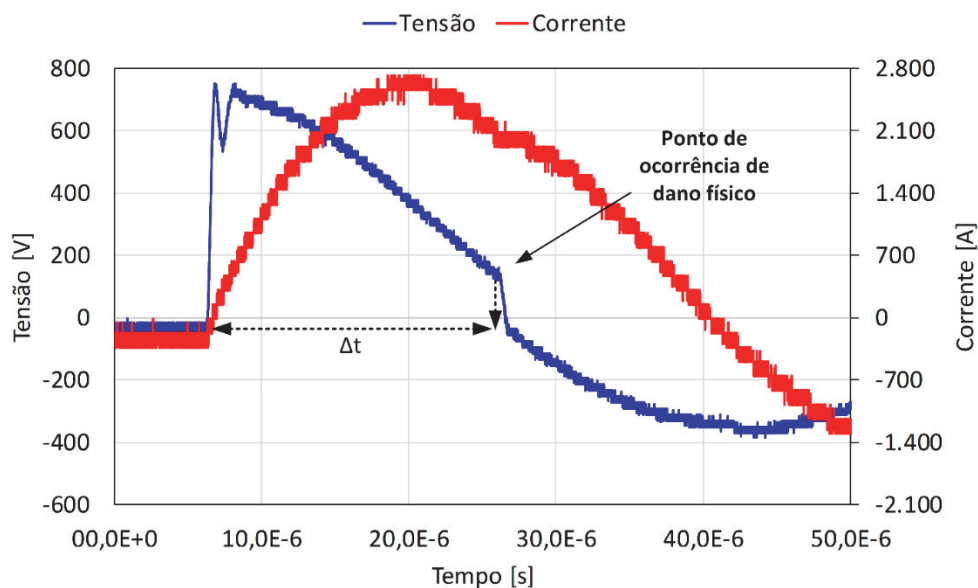


Figura 3.6 Impulso de corrente aplicado ao aparelho televisor a LED

No que tange à máxima energia suportada pelo equipamento, essa pode ser obtida através da integral da área demarcada na curva da corrente ao quadrado, na Figura 3.7. Esta se apresenta como a informação requerida pela equação 3.2, traduzida na forma da energia térmica capaz de danificar o produto. Para o presente caso, o valor obtido foi de 83,08 A^2s , valor esse superior àqueles obtidos pelos televisores com tecnologia a tubo, como evidenciado [77], evidenciando uma maior robustez do ponto de vista térmico.

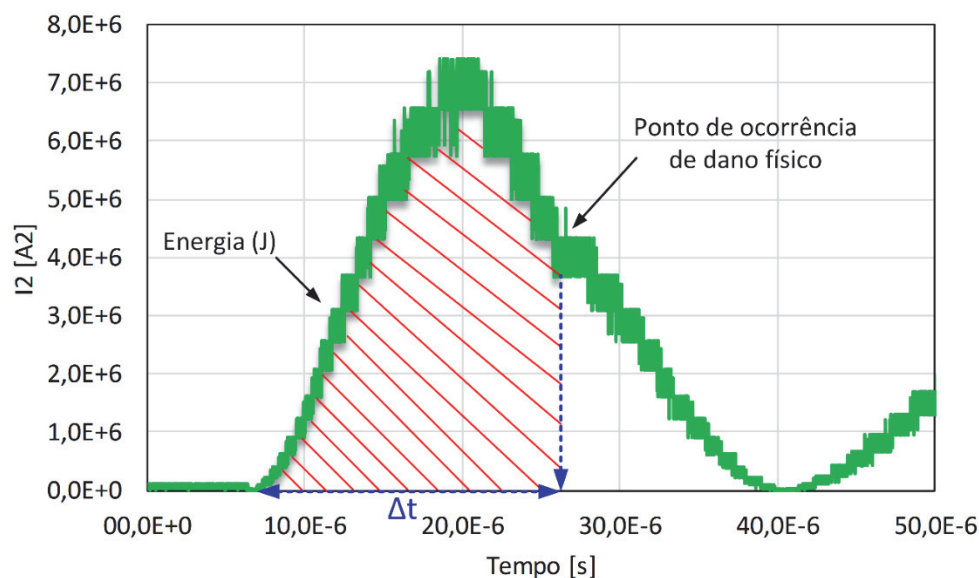


Figura 3.7 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo aparelho televisão a LED

De posse das informações anteriores pode-se, na sequência, obter o respectivo limite térmico do televisão a LED, conforme indicado na equação 3.4 e Figura 3.8.

$$I(t) = \sqrt{\frac{83,08}{t}} \quad (3.4)$$

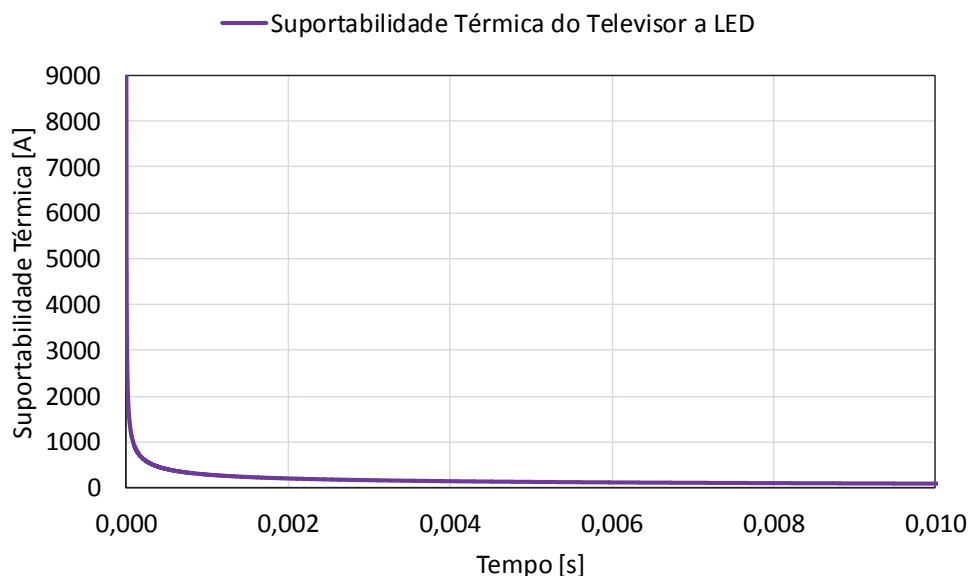


Figura 3.8 Limite de suportabilidade térmica do aparelho televisão a LED

3.4.2 Refrigerador

A Figura 3.9 mostra o oscilograma do impulso de corrente aplicado ao refrigerador. Pode-se observar que o impulso não possui o mesmo formato daquele exposto pela Figura 3.3, uma vez que a característica da impedância do refrigerador, ocasionou um “overshoot” na forma da corrente, fazendo com que a mesma apresentasse uma oscilação em torno de 11,5 kHz. Vale a pena ressaltar

que o refrigerador não foi danificado para os impulsos aplicados, porém, ao ser energizado com tensão nominal pouco tempo depois, foi constatado que o equipamento indicou uma avaria de natureza física. Em assim sendo, foi considerado que o distúrbio responsável pelo dano causado ao equipamento se apresentou com um valor de pico de 14,94 kA com tempo de exposição (Δt) igual a 100 μ s.

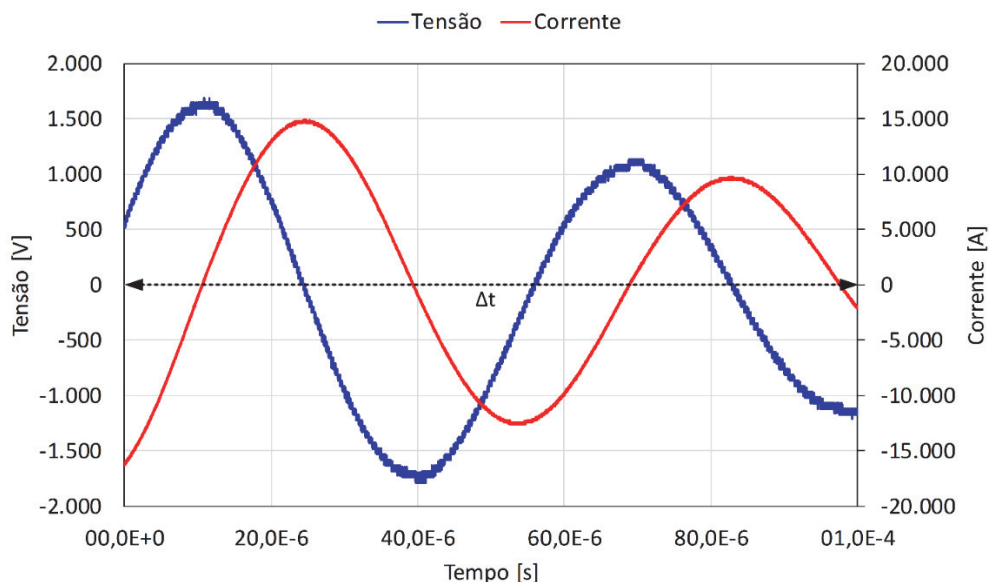


Figura 3.9 Impulso de corrente aplicado ao aparelho refrigerador

No que tange à máxima energia suportada pelo equipamento, essa pode ser visualizada através da área demarcada na Figura 3.10. Desse modo, essa figura fornece a informação requerida pela equação 3.2, traduzida na forma da energia térmica capaz de danificar o produto. Para o presente caso, o valor obtido foi de 7872,79 A²s.

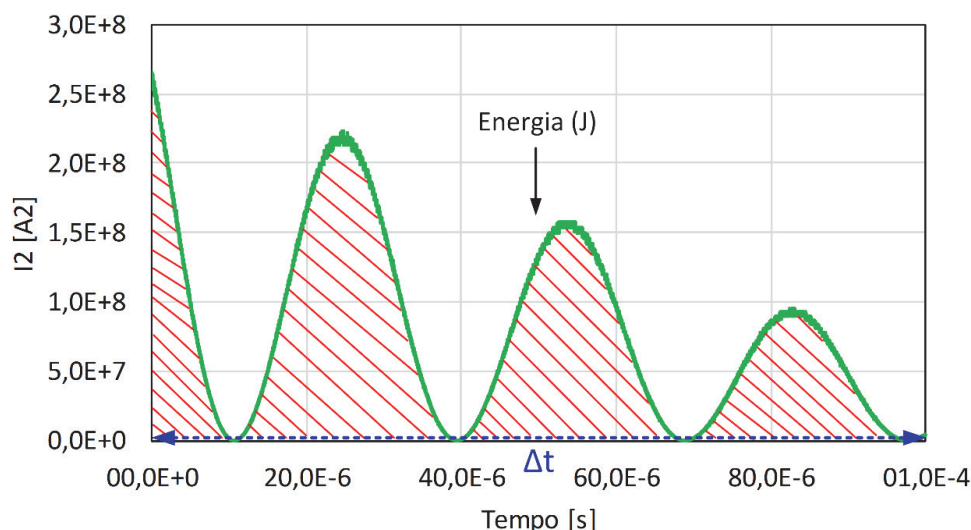


Figura 3.10 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo refrigerador

O respectivo limite térmico se apresenta consonante com a equação 3.4 e está evidenciado pela Figura 3.11.

$$I(t) = \sqrt{\frac{7872,79}{t}} \quad (3.5)$$

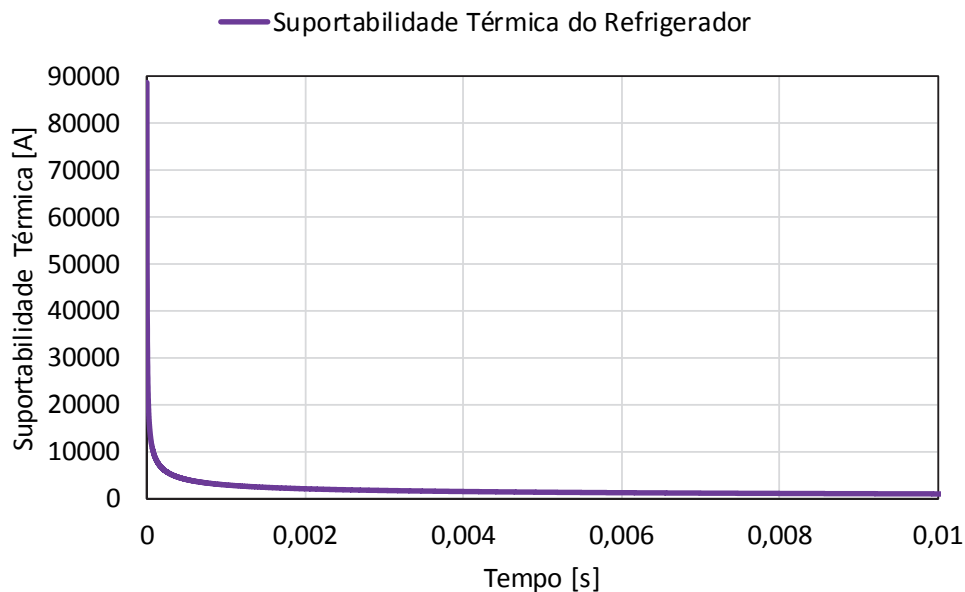


Figura 3.11 Limite de suportabilidade térmica do refrigerador

3.4.3 Freezer

A Figura 3.12 mostra a forma de onda do impulso de corrente aplicada e respectiva tensão. Pode-se observar que o impulso possui um valor de pico de 15,33 kA com um intervalo de exposição (Δt) igual a 6,39 μ s. Após este instante ocorreu a danificação do produto. Como se observa, este tempo foi bastante inferior àquele obtido para o refrigerador.

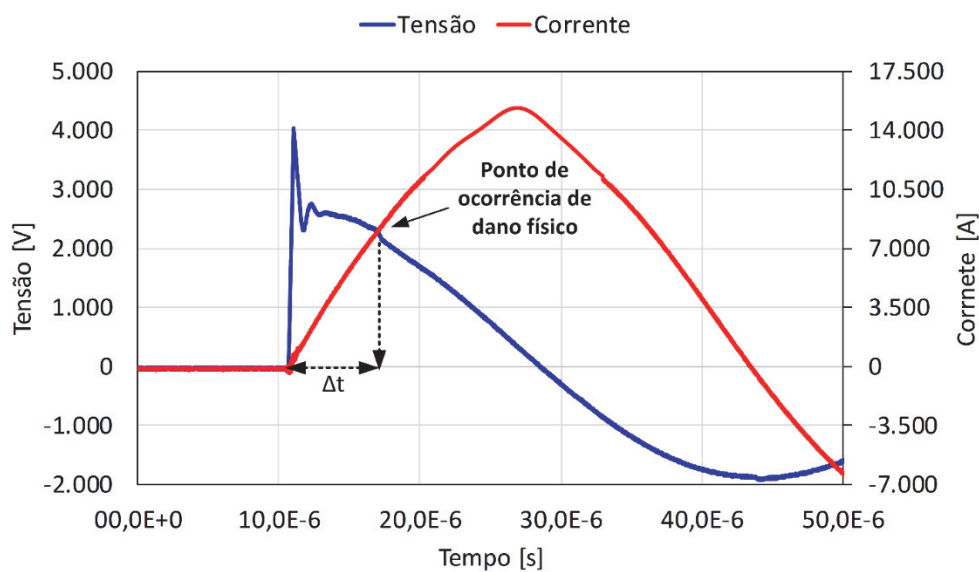


Figura 3.12 Impulso de corrente aplicado ao freezer

A energia térmica máxima admissível para o presente caso foi de 154,5 A²s.

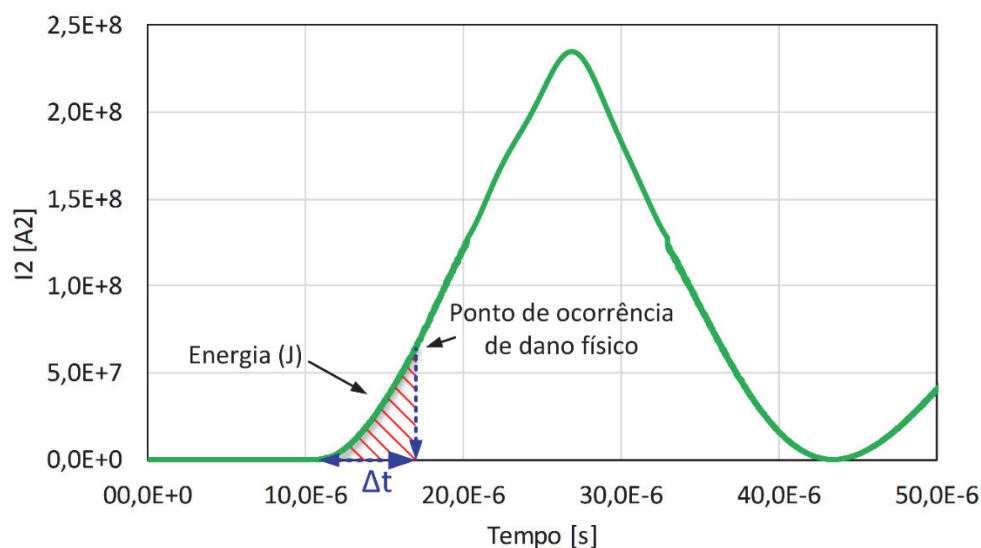


Figura 3.13 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo freezer

A equação 3.5 descreve o comportamento da curva de suportabilidade enquanto que a Figura 3.14 a ilustra.

$$I(t) = \sqrt{\frac{154,50}{t}} \quad (3.6)$$

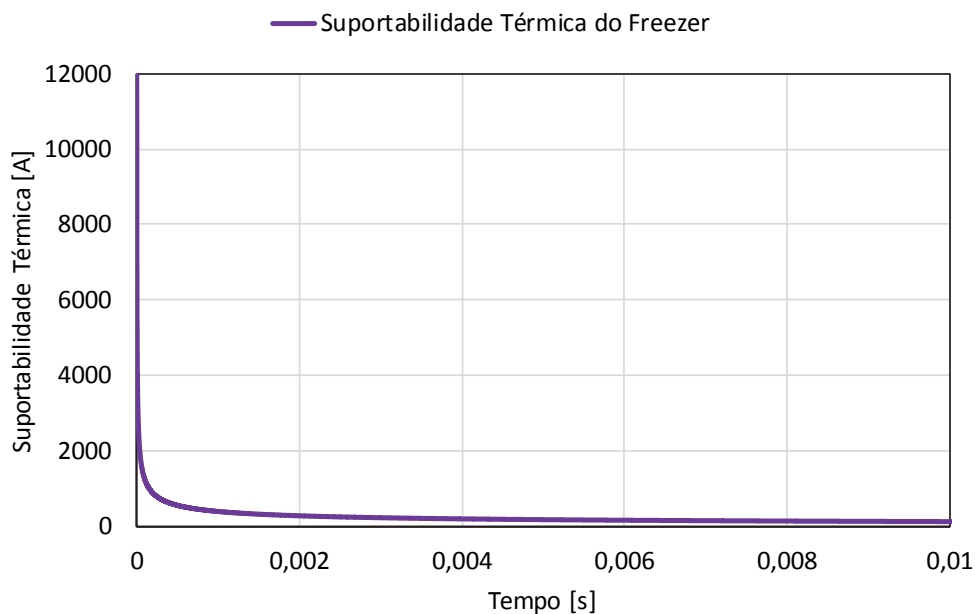


Figura 3.14 Limite de suportabilidade térmica do freezer

3.4.4 Máquina de Lavar Roupas

A Figura 3.15 evidencia o impulso de corrente aplicado, com valor de pico de 2,56 kA, e ainda, o instante para o qual ocorreu a manifestação de danos físicos no equipamento testado, o qual, como se constata, foi manifestado para um tempo de exposição (Δt) igual a 15,63 μ s.

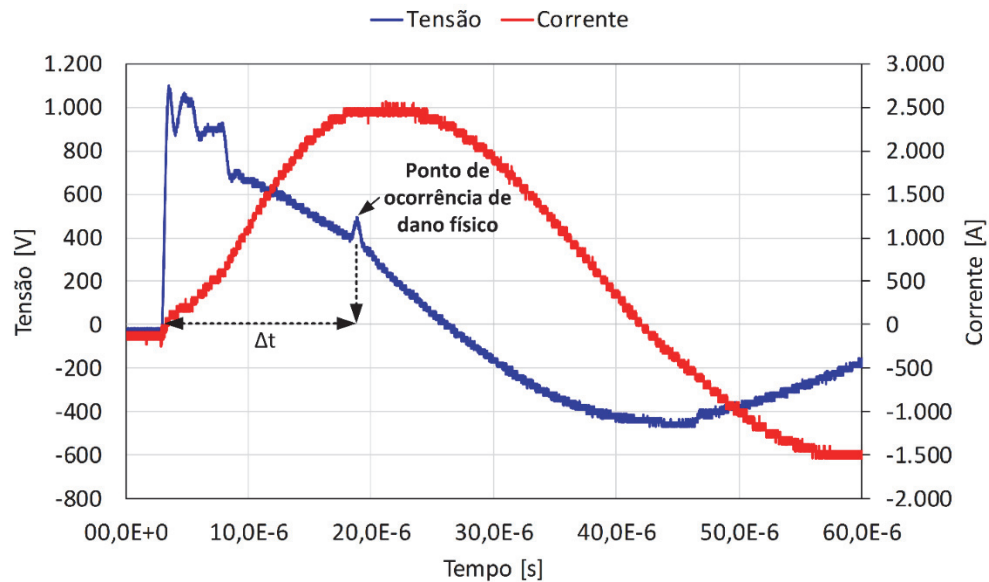


Figura 3.15 Impulso de corrente aplicado a máquina de lavar roupas

Mais uma vez, a área destacada na Figura 3.16 conduz a energia térmica máxima admissível, a qual se apresenta com um valor de 36,96 A²s.

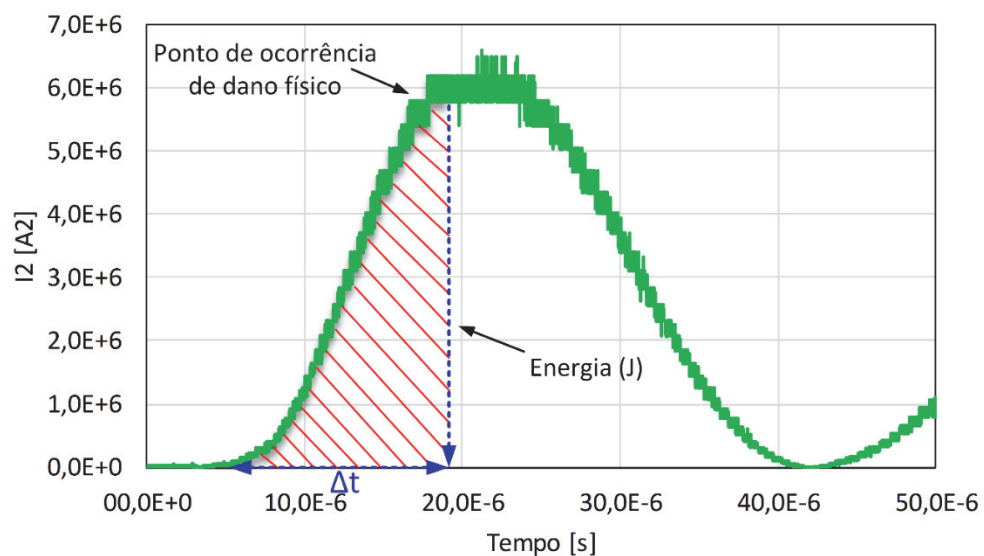


Figura 3.16 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pela máquina de lavar roupas

A curva de suportabilidade térmica é apresentada na Figura 3.17.

$$I(t) = \sqrt{\frac{36,96}{t}} \quad (3.7)$$

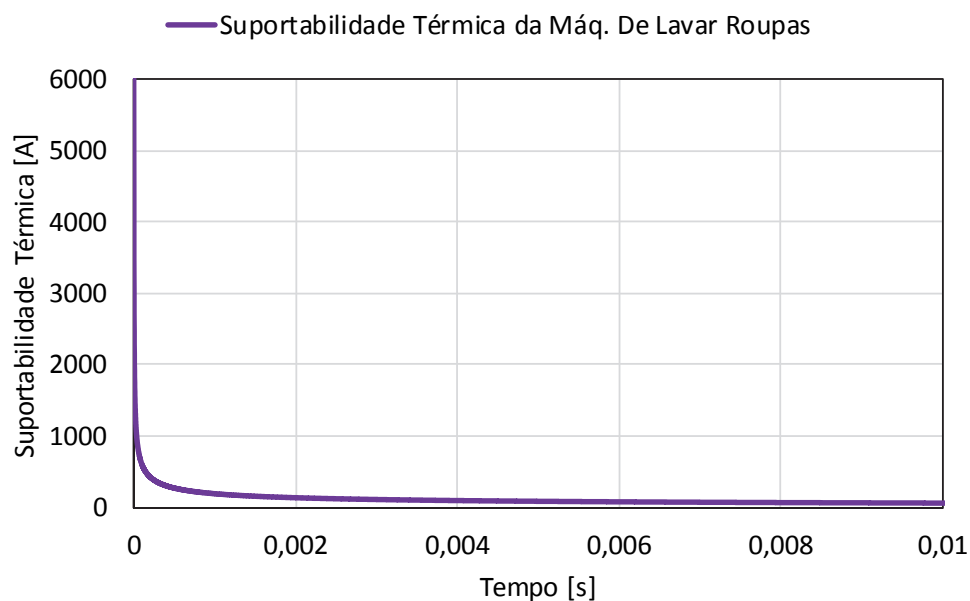


Figura 3.17 Limite de suportabilidade térmica da máquina de lavar roupas

3.4.5 Máquina de Lavar Louças

A Figura 3.18 ilustra os oscilogramas do impulso de corrente aplicado e a correspondente tensão. Nesta é possível observar que o dano físico no equipamento ocorreu para um tempo de exposição de 19,98 μ s, quando a corrente alcançou um valor máximo de 3,37 kA.

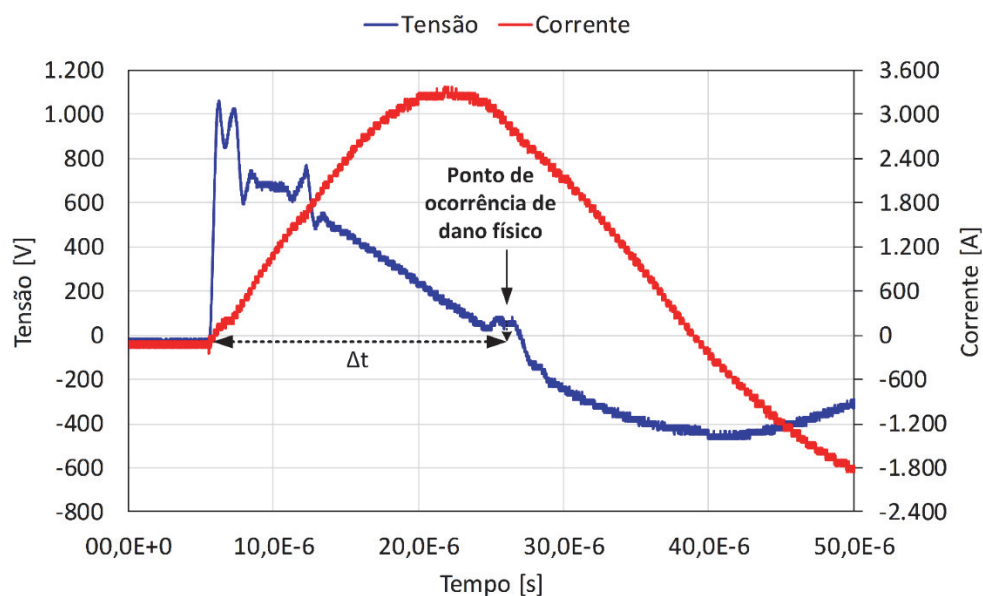


Figura 3.18 Impulso de corrente aplicado a máquina de lavar louças

Observando o valor da energia, verifica-se que a máquina de lavar louças em comparação com a de roupas apresenta uma maior robustez térmica, uma vez que suportou uma energia de 120,50 A²s, como mostra a Figura 3.19.

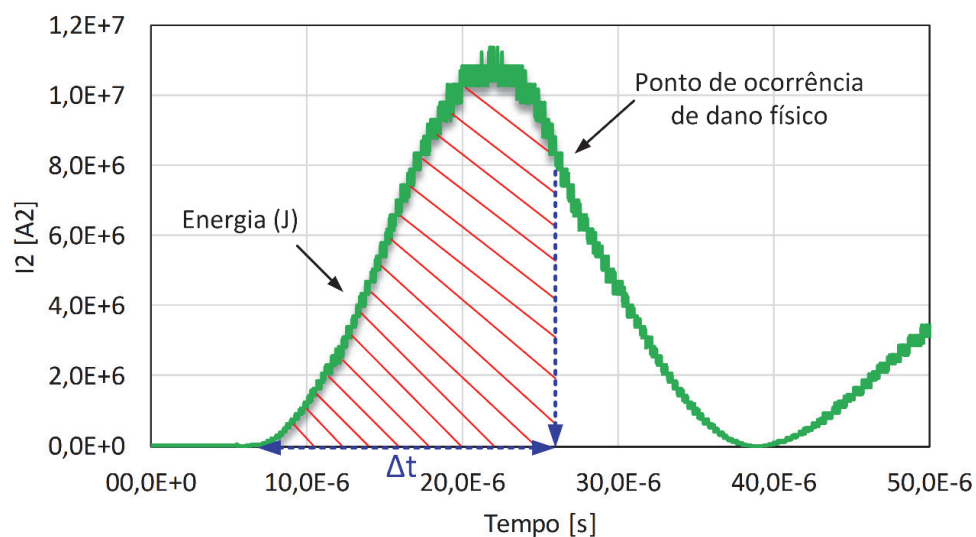


Figura 3.19 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pela máquina de lavar louças

A Figura 3.20 mostra a suportabilidade térmica da máquina de lavar louça testada.

$$I(t) = \sqrt{\frac{120,50}{t}} \quad (3.8)$$

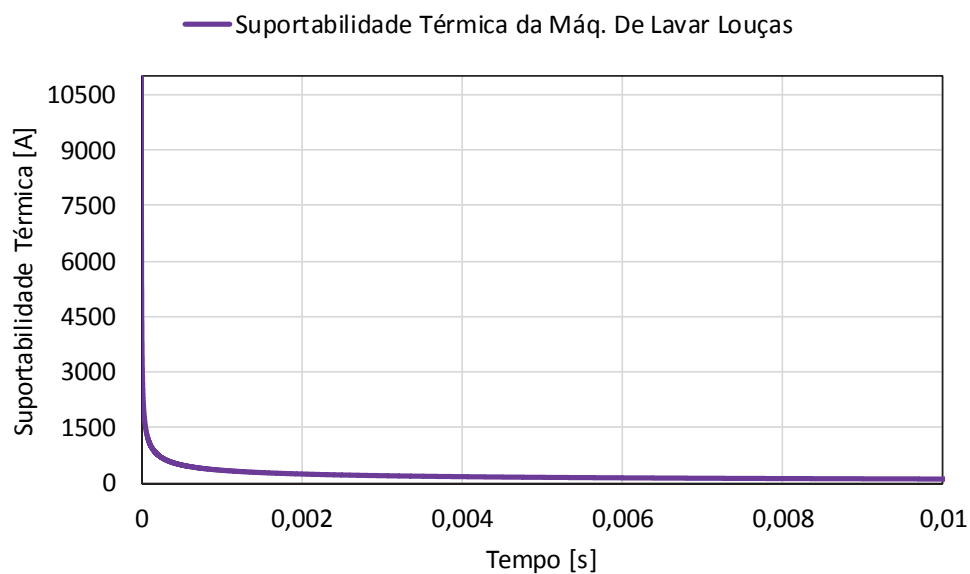


Figura 3.20 Limite de suportabilidade térmica da máquina de lavar louças

3.4.6 Condicionador de Ar Split

A Figura 3.21, de modo similar às anteriores, é indicativa do momento exato onde ocorre o dano físico no equipamento, o qual ocorreu para uma tempo de exposição de 16,0 μ s e com uma corrente máxima a 2,6 kA.

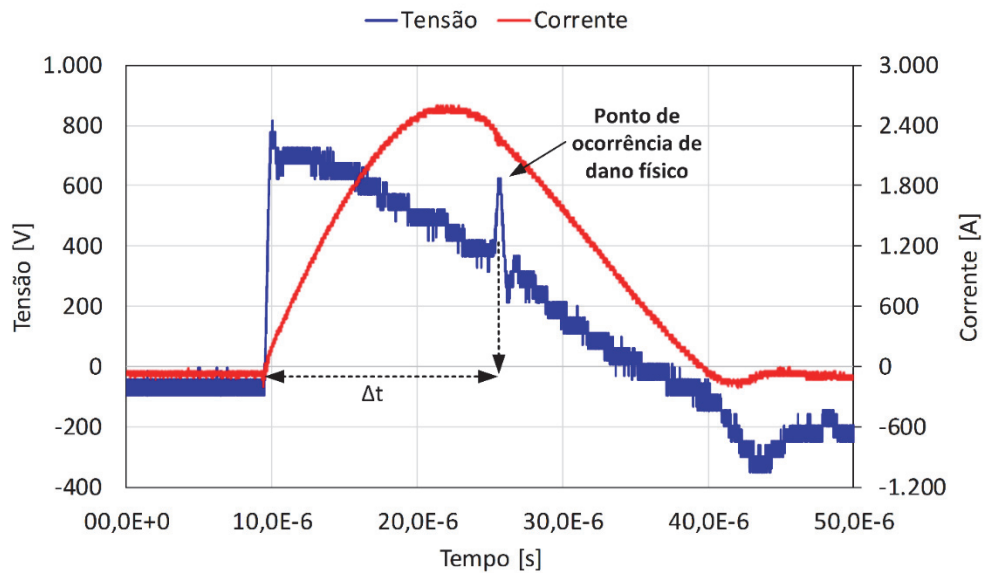


Figura 3.21 Impulso de corrente aplicado ao condicionador de ar Split

A Figura 3.22 mostra a curva da energia dissipada, através da qual é possível verificar que o valor máximo admissível pelo equipamento foi de 64,03 A²s.

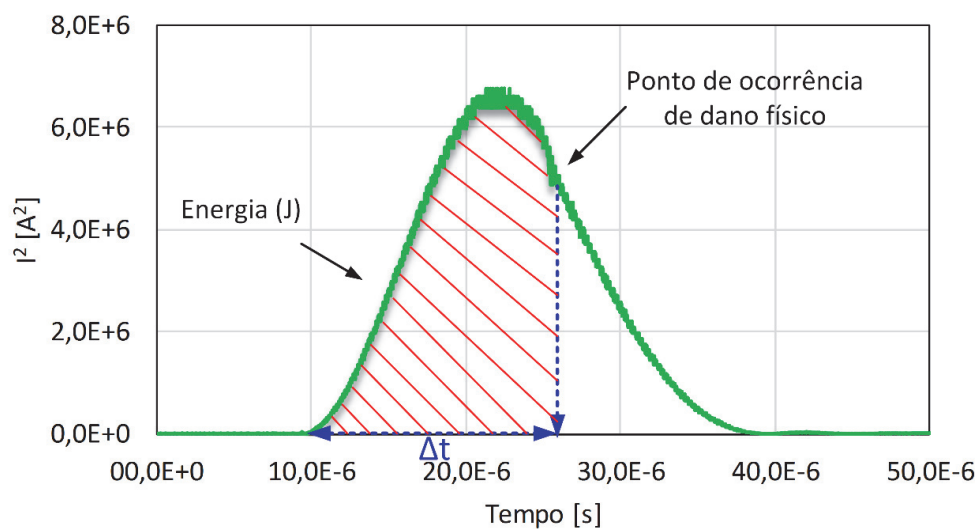


Figura 3.22 Procedimento para a extração da energia máxima (I^2t) admissível pelo condicionador de ar Split

A Figura 3.23 mostra a suportabilidade térmica do condicionador de ar Split, em consonância com a equação 3.8.

$$I(t) = \sqrt{\frac{64,03}{t}} \quad (3.9)$$

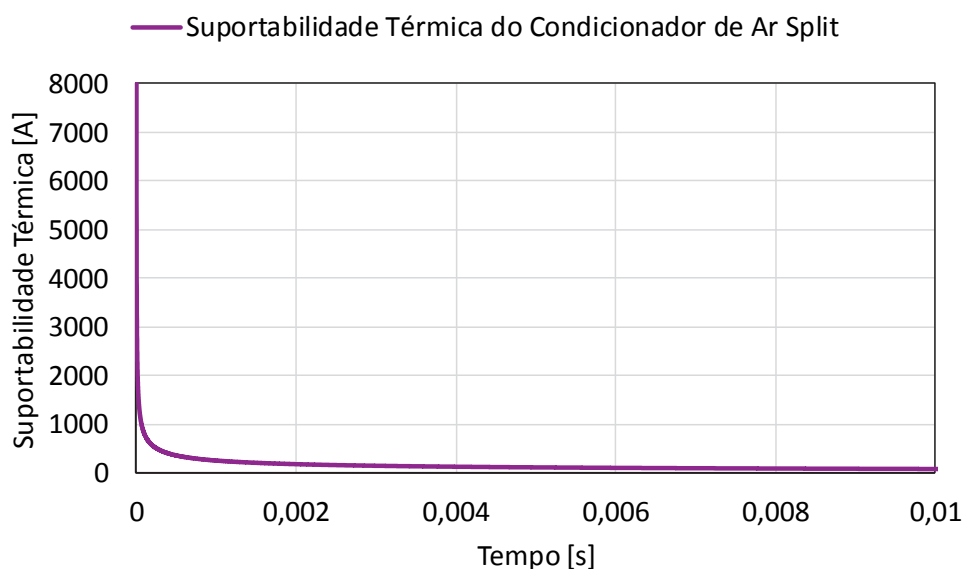


Figura 3.23 Limite de suportabilidade térmica do condicionador de ar Split

3.5 Considerações finais

Tomando por base o objetivo central deste capítulo, é importante ressaltar que o mesmo foi dedicado à obtenção de um conjunto de informações, traduzidas na forma de curvas que expressam os limites de suportabilidade térmica para utilização nos estudos de PIDs, conforme se faz necessário pela metodologia utilizada pelo aplicativo computacional APR.

Em conformidade com os princípios estabelecidos, o *software* de análise deve primar pela correlação entre as causas e os efeitos dos fenômenos eletromagnéticos sobre os equipamentos reclamados pelos consumidores. Neste sentido, torna-se imperativo o conhecimento dos esforços impactantes na forma de tensões e correntes e os padrões de suportabilidade dos produtos testados.

Visando atender a tais premissas, fica, pois, esclarecido que o processo de análise passa pela definição e utilização dos limites para as correntes e tensões presentes na entrada do eletrodoméstico sob avaliação. Estas são denominadas, para fins desta pesquisa, por limites térmicos e dielétricos.

Focando especificamente as informações associadas com as questões de natureza térmica, foram então tecidas considerações acerca do estado da arte sobre a disponibilização de dados aplicáveis à matéria. Assim procedendo foi possível constatar que, aquelas encontradas na literatura apontam para indicadores que se mostram frágeis a uma extensão genérica à gama de produtos frequentemente contemplados nos estudos. De fato, consultas diversas feitas à literatura revelam que há um número relativamente modesto de informações, via de regra particularizadas para um ou outro produto, que delimitam fortemente o cumprimento dos desafios aqui postos.

Reconhecendo tais restrições, fundamentado num procedimento em que pese o princípio da energia necessária para ocasionar danos de natureza física, foi estabelecida uma metodologia matemática, a qual requer, para sua aplicação, dados advindos de experimentos laboratoriais com

potencial para ocasionar danos físicos nos produtos de interesse. Para tanto, num primeiro momento foram definidos os requisitos de teste e a estrutura física laboratorial capaz de atender os objetivos aqui delineados e, através de testes específicos, obter os limites de energia com potencial de ocasionar danos físicos. Para tanto, como esclarecido no texto, foi utilizado um arranjo disponibilizado na UNIFEI, o qual foi utilizado na forma de cortesia visando futuros trabalhos em conjunto com a UFU.

Estabelecido o arranjo e realizada a parametrização necessária, foram então conduzidos testes para os equipamentos focados nesta tese, a saber: TV a LED, refrigerador, freezer, máquina de lavar roupa, máquina de lavar louças e condicionador de ar Split. Como informado, todos foram submetidos a testes de impulsos de corrente até os seus limites de suportabilidade, fato este que ofereceu os meios para o traçado das respectivas curvas de suportabilidade térmica requeridas pela metodologia empregada.

Vale destacar que, muito embora o limite de tempo tenha se apresentado da ordem de alguns ms, as formulações matemáticas utilizadas podem ser prontamente utilizadas para quaisquer outras durações de exposição. O emprego de intervalos de tempo pequenos para as figuras objetivou, tão somente, esclarecer sobre as regiões passíveis das maiores variações das correntes.

De um modo geral, é importante destacar que os resultados obtidos não puderam ser correlacionados com informações correlatas, visto a inexistência de outras propostas nas publicações consultadas. A única ressalva meritória de destaque refere-se aos televisores, visto que trabalhos anteriores feitos por pesquisadores da UFU apresentaram, no passado, limites aplicáveis a aparelhos televisores, de tubo de raios catódicos.

Por fim, destaca-se que as informações aqui obtidas, muito embora se apresentem como informações relevantes e originais, estão atreladas com os produtos específicos testados e, certamente, a extensão dos resultados para outros com características, marcas e modelos distintos, se apresenta como tema para futuras investigações.

CAPÍTULO 4

LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES

4.1 Considerações iniciais

De modo similar aos trabalhos conduzidos no capítulo anterior, esta seção encontra-se direcionada para a obtenção de limites operacionais para os equipamentos, considerando-se, todavia, as questões diretamente afeitas com as tensões presentes na rede de suprimento das unidades consumidoras.

Uma vez definidos os propósitos dos trabalhos desenvolvidos nesta etapa, torna-se essencial, neste momento, destacar que, no que tange às tensões de suprimento dos dispositivos eletrodomésticos e outros, cabe observar que a correlação operacional destes com as tensões de rede pode ser influenciada através de duas vias. Uma delas se apresenta atrelada com os níveis superiores e os esforços dielétricos impostos pelas tensões de alimentação, as quais podem atingir proporções capazes de ocasionar a ruptura dos isolamentos. Estes limites são aqui tratados como níveis máximos de suportabilidade dielétrica. Numa outra dependência estão as questões vinculadas com o funcionamento adequado ou não do produto, sem que haja manifestação de danos físicos, mas tão apenas a perda das propriedades de funcionamento nos termos requeridos para cada um deles. Nesta categoria estão os efeitos aqui denominados por níveis de sensibilidade operacional às tensões.

Visando atender aos objetivos propostos, de modo similar às questões de ordem térmica, é estabelecida uma metodologia para sistematizar, na forma de curvas de suportabilidade e sensibilidade às tensões, a qual deverá ser aplicada individualmente a cada eletrodoméstico considerado. Feita a proposição do processo de definição dos padrões ora postos, é proposta de estrutura física laboratorial para o atendimento aos requisitos necessários, os quais devem contemplar a imposição de níveis e padrões de tensão com potencial para ocasionar danos físicos nos dispositivos sob teste, assim como também os conduzir a situações operacionais tais que os mesmos não mais respondam as funções a eles atribuídas.

Novamente, os trabalhos aqui conduzidos encontram-se aplicados aos produtos: televisor de LED, aparelho refrigerador, freezer, máquina de lavar roupa, máquina de lavar louça e condicionador de ar Split.

4.2 Estratégia para a obtenção dos limites de suportabilidade dielétrica e sensibilidade operacional às tensões

Muito embora se reconheça a existência de procedimentos de testes de aprovação de produtos que apontem para a direção do estabelecimento de curvas de suportabilidade dos mais distintos produtos empregados no mercado, há de se destacar a inexistência de padrões de suportabilidade a serem obedecidos pelos fabricantes de aparelhos eletroeletrônicos [88]. Neste particular, não obstante algumas evidências encontradas na literatura, o tema em pauta constitui-se, ainda, em assunto extremamente embrionário. Estes desafios foram os motivadores para os desenvolvimentos detalhados na sequência, os quais, como será observado, consideram as estratégias para a definição dos limites superiores (suportabilidade dielétrica) e inferiores (sensibilidade à tensão), temas estes que serão tratados de forma individual e para cada equipamento específico.

4.2.1 Metodologia para a caracterização dos limites de suportabilidade dielétrica

A curva representativa dos limites de tensão em função do tempo de exposição, no que se refere aos limites superiores de suportabilidade, nos termos sugeridos pela Figura 4.1 [38], se apresenta na forma de uma correlação entre os níveis de tensão responsáveis pela ruptura do isolamento em função do tempo de exposição do equipamento a um determinado padrão e valor de tensão.

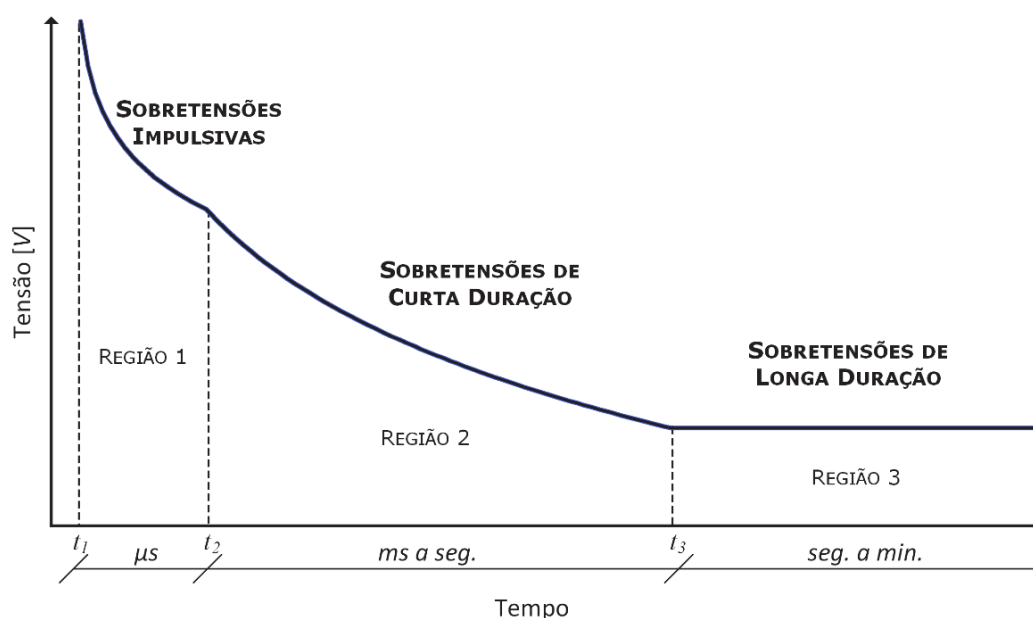


Figura 4.1 Curva típica para os níveis superiores da suportabilidade de tensão

Como indicado, a característica completa compreende três regiões, cada qual aplicável a fenômenos típicos manifestados nas redes elétricas e com características distintas. Uma primeira destinada a representar os fenômenos transitórios impulsivos; outra visando a inserção dos distúrbios de natureza transitória de maior duração (oscilações, elevações temporárias, etc.) e, por fim, uma

terceira, representativa das sobretensões em 60 Hz associada com fenômenos de longa duração ou mesmo regime permanente. Estas caracterizações se destinam a contemplar, respectivamente, fenômenos típicos, a exemplo de: descargas atmosféricas, ação de religadores, chaveamentos de bancos de capacitores, dentre outros, e, por fim, ocorrências atreladas com elevações da tensão nominal por tempos maiores e intensidades moderadas, como ocorre quando há perdas de carga e outros.

À luz do fato que a primeira seção do traçado envolve tempos da ordem de μs e, a última, intervalos de cerca de alguns segundos e minutos, optou-se pela utilização de funções logarítmicas para a representação matemática das curvas de suportabilidade, conforme indicado pela equação 4.1. Vale lembrar que, para cada região assim delimitada, é adotado um comportamento linear entre a tensão admissível e o seu tempo de duração, portanto, a equação corresponde a de uma reta, adotando-se, por conveniência de representação da escala de tempo, a forma de uma função logarítmica.

$$V(t) = \alpha \cdot \log t + \beta \quad (4.1)$$

Onde a função $V(t)$ corresponde ao comportamento variável do valor de tensão eficaz imposto ao suprimento do equipamento, iniciando com maiores níveis e sendo gradualmente reduzidos, em consonância com a natureza do fenômeno anômalo ocorrido. Portanto, esta grandeza não representa formas de onda instantâneas, mas sim, variações do valor eficaz ao longo do processo, conforme o tempo de exposição do produto a esta solicitação dielétrica.

Isto posto fica definido que, uma vez caracterizados os valores da função $V(t)$ para dois instantes distintos, t_1 e t_2 , obtêm-se para os seguintes parâmetros:

$$\alpha = \frac{V(t_2) - V(t_1)}{\log t_2 - \log t_1} \quad (4.2)$$

$$\beta = V(t_1) - \alpha \cdot \log t_1 \quad (4.3)$$

Os demais seguem a mesma particularidade, utilizando-se da equação 4.1 com os seus coeficientes determinados nos termos estabelecidos pelas equações 4.2 e 4.3 anteriormente postas.

4.2.2 Metodologia para a caracterização dos limites a sensibilidade operacional às tensões

Com relação a estratégia para a caracterização dos limites a sensibilidades operacionais dos equipamentos quanto da ocorrência de afundamentos e interrupções da tensão de alimentação, esta foi, basicamente, estabelecida de acordo como orientações contidas no documento IEC 61000-4-11. Este se destina a avaliação de desempenho de equipamentos eletroeletrônicos que não excedam 16 A por fase.

Baseando, pois, nas premissas estabelecidas, foram viabilizados meios para testes de desempenho com os produtos alimentados, num primeiro momento, supridos com tensão nominal. Na sequência foram utilizadas tensões associadas com variações compreendidas entre 90% e 0,0% do valor nominal, com durações de meio a 90 ciclos. Também, vale ressaltar que cada distúrbio foi aplicado três vezes, consecutivamente, em intervalos de aproximadamente 3 (três) minutos entre cada evento. A Tabela 4.1 sintetiza a metodologia ora reportada.

Tabela 4.1 Planilha de desempenho dos equipamentos diante de afundamentos e interrupções de tensão

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO										
1 CICLO										
2 CICLOS										
5 CICLOS										
10 CICLOS										
30 CICLOS										
60 CICLOS										
90 CICLOS										

Uma vez submetidos aos padrões de suprimento contidos na tabela anterior, o funcionamento do produto sob análise pode conduzir a uma das seguintes situações:

- **“Funcionamento Normal (FN)”**: este indica que o afundamento de tensão não foi suficiente em magnitude e/ou duração para provocar algum sintoma anormal no equipamento sob teste;
- **“Apresentação de Ruídos Sonoros (RS)”**: nestas condições, há indicativos que o equipamento apresentou anomalias de pequeno porte, a exemplo de pequenos ruídos sonoros, atípicos ao seu funcionamento normal. Todavia, o produto se manteve em funcionamento sem maiores impactos sobre suas características finais;
- **“Aparelho Desligou e Retornou ao seu Funcionamento sem Intervenção (DL)”**: esta característica operacional é indicativa que, tão logo o afundamento de tensão desapareceu, o equipamento, sem qualquer intervenção, retornou ao seu funcionamento normal;
- **“Aparelho Desligou e Manteve-se nesta Condição (DT)”**: esta última situação implica que o afundamento de tensão ocasionou o desligamento do dispositivo eletroeletrônico, mantendo esta condição mesmo após a restauração da tensão de suprimento. A retomada do funcionamento somente ocorreu através da reativação de mecanismo interno de proteção (exemplo: relé térmico para refrigeradores).

No que se refere a formulação matemática para descrever a sensibilidade do equipamento diante das condições supra postas, foi utilizada uma estratégia baseada na inserção dos resultados numéricos obtidos numa planilha que gerou os limites para a composição através da interpolação gráfica dos pontos assim obtidos. Esta questão será posteriormente esclarecida quando da apresentação dos resultados obtidos para a caracterização dos limites quanto as tensões impostas.

4.2.3 Alguns exemplos de limites de suportabilidade dielétrica e sensibilidade operacional às tensões definidos na literatura

Como guia para os fabricantes de equipamentos na área de informática, os EUA estabeleceram a norma ANSI/IEEE Std. 446 [89], conhecida como curva CBEMA. Esta propõe padrões a serem satisfeitos pelas fontes e dispositivos que alimentam computadores com relação às variações de tensão e respectivas durações suportáveis e envolvem questões associadas com os limites dielétricos e operacionais, como indicado na Figura 4.2.

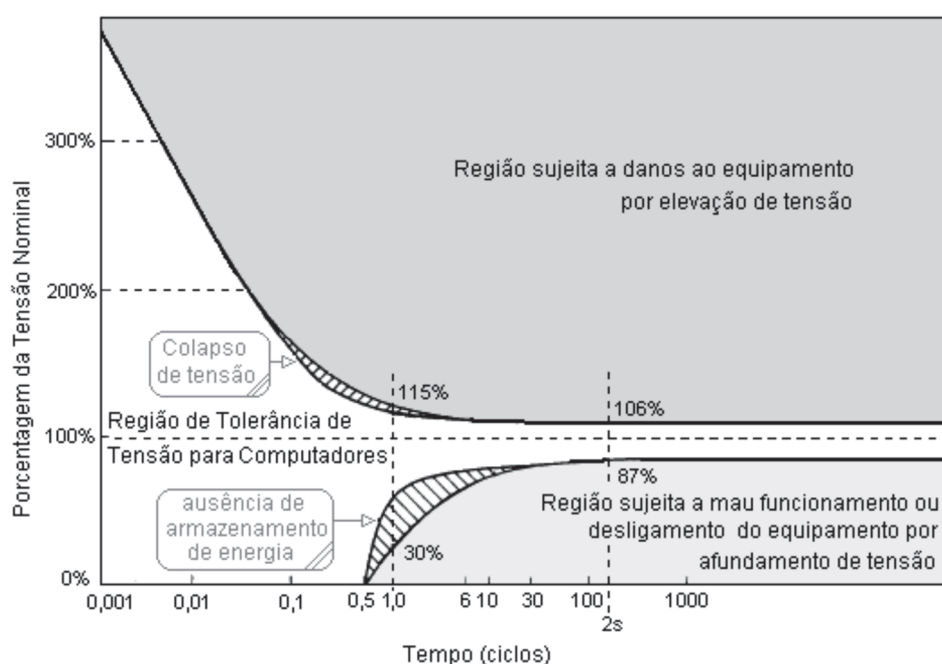


Figura 4.2 Curva CBEMA [89]: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores

Em 1997 foi proposta uma nova versão para os limites anteriormente estabelecidos por [89]. O resultado ficou conhecido como curvas CBEMA/ITIC ou simplesmente ITIC [20] (Information Technology Industry Council). Esta é mostrada na Figura 4.3.

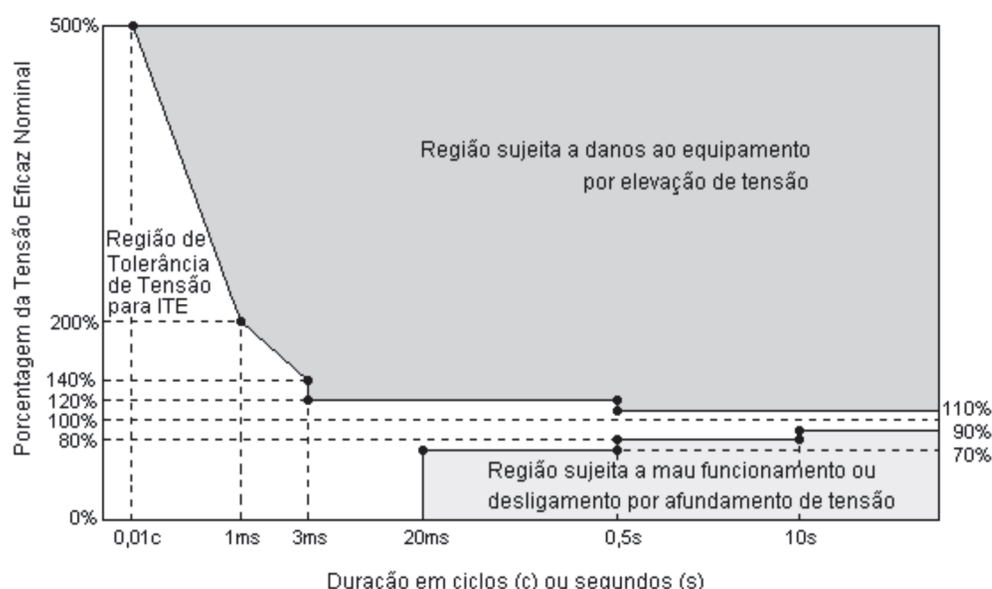


Figura 4.3 Curva ITIC [20]: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores

Embora as curvas anteriores sejam amplamente utilizadas, vale lembrar que, originalmente, as mesmas foram derivadas de ensaios e experiências vinculadas com equipamentos da área de tecnologia da informação. Portanto, sua extensão para outros produtos se mostra totalmente inconsistente, fato este que determina a necessidade da obtenção de modelos específicos para os mais distintos dispositivos comercialmente presentes nas instalações elétricas [20].

Por outro lado, o laboratório de pesquisa LACTEC realizou um conjunto de experimentos relacionados com a tolerância de alguns equipamentos a distintos eventos responsáveis por sobretensões nas redes elétricas, em consonância com as diretrizes estabelecidas nos documentos [39] [90]. Estas investigações compreenderam o emprego de refrigeradores e televisores.

Para os testes em refrigeradores foi adotada uma estratégia baseada no funcionamento deste produto por, pelo menos, 5 minutos antes do início dos ensaios. Esta medida visou, sobretudo, a garantia da estabilização da corrente de alimentação. Na sequência foram realizados os ensaios que levaram aos limites de suportabilidade apresentados na Figura 4.4. Os experimentos foram aplicados a refrigeradores com tensão nominal de 127 V [91].

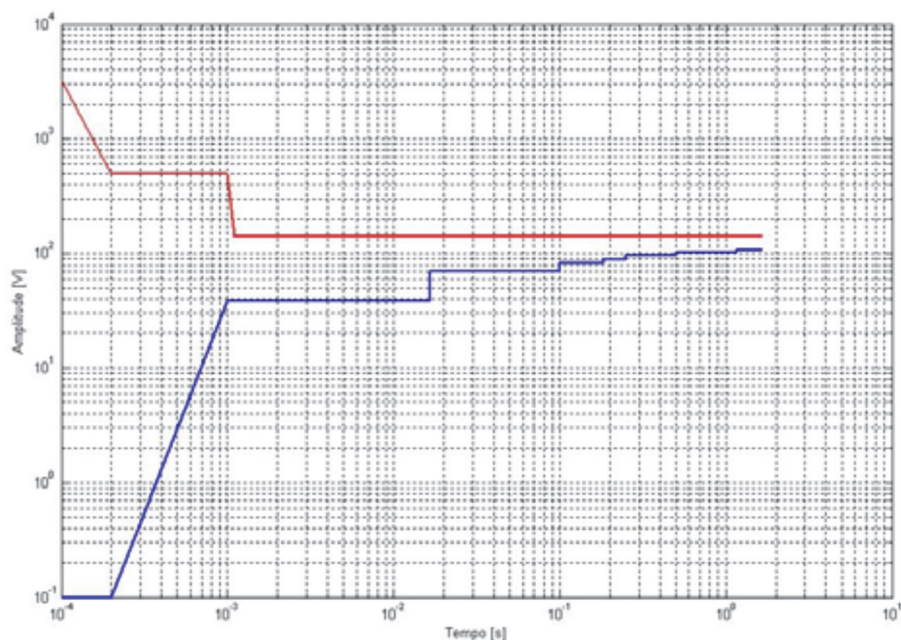


Figura 4.4 Curva LACTEC [5]: Limites de suportabilidade e sensibilidade para refrigeradores

Complementarmente, a Figura 4.5 mostra a correspondente curva obtida para televisores de tubos catódicos.

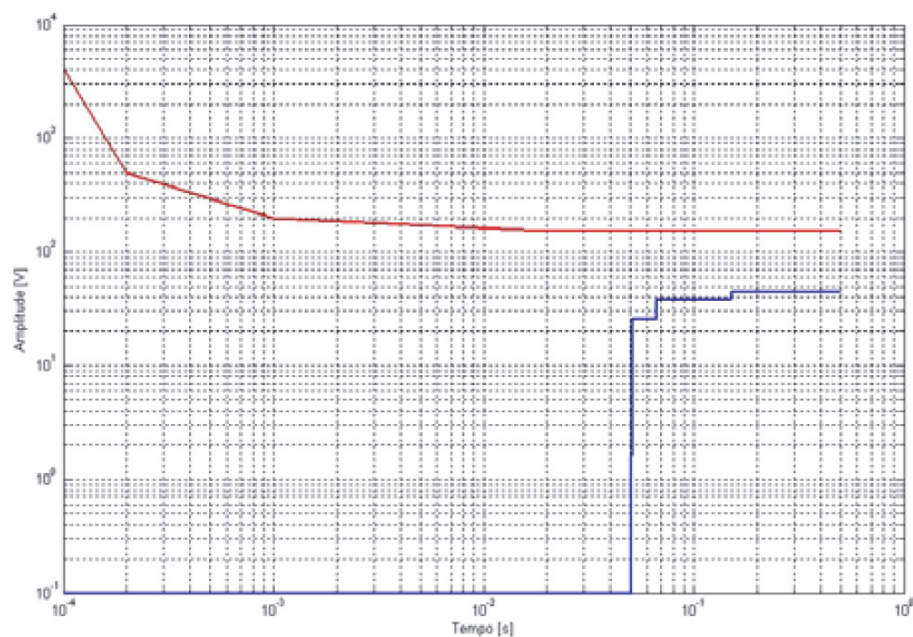


Figura 4.5 Curva LACTEC [5]: Limites de suportabilidade e sensibilidade para televisores a tubo

A empresa distribuidora AES Sul também desenvolveu trabalhos publicados [92] entre parcerias com centros de pesquisas. Os estudos resultaram em limites de suportabilidade para alguns equipamentos eletrodomésticos, como indicado na Figura 4.6. Nesta mesma característica é adicionada, para fins comparativos, os limites estabelecidos pela CBEMA. As indicações em vermelho estão atreladas com televisores novos, enquanto que o resultado em verde expressa equipamentos usados.

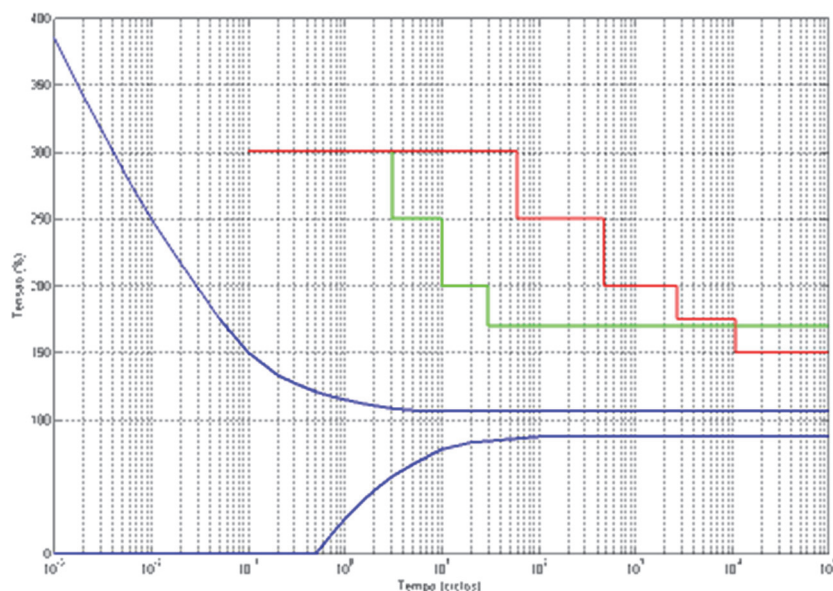


Figura 4.6 Curva AES SUL [92]: Limites de suportabilidade para televisores a tubo – novos e usados

Somado as informações supra postas, outras curvas de sensibilidade e suportabilidade para refrigeradores e fornos microondas encontram-se disponibilizadas em [35]. Porém, os resultados não se mostram distintos dos anteriormente indicados.

Por fim, a Universidade Federal de Uberlândia através de um projeto de P&D com a CEMIG, realizou estudos para a definição dos limites de suportabilidade para os eletrodomésticos que representavam a maior incidência de PIDs para aquela empresa, a saber: televisores de tudo de raios catódicos de 21” e 29”, microcomputadores com e sem estabilizador e ainda aparelhos de som. A Figura 4.7 ilustra os limites de suportabilidade para televisores de 21” e 29”.

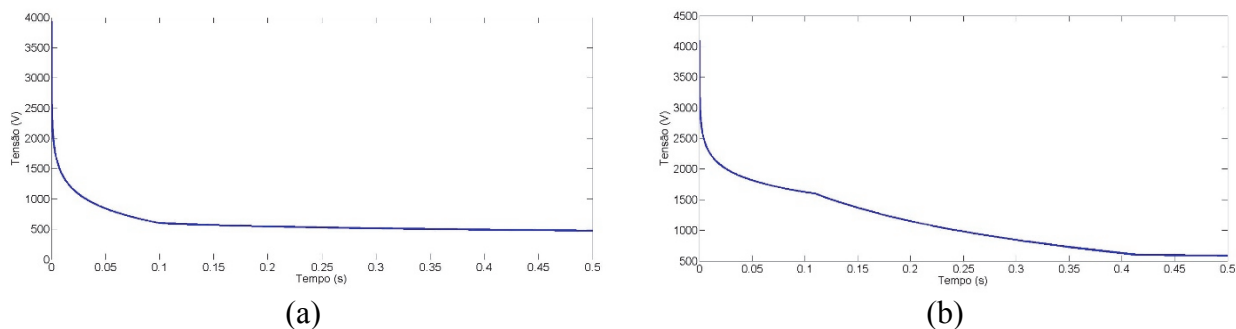


Figura 4.7 Curva UFU-CEMIG [82]: Limites de suportabilidade para televisores de tubos catódicos (a) Televisor 21” (b) Televisor 29”

De modo análogo, a Figura 4.8 é indicativa dos resultados do processo para microcomputadores, sem e com a presença de estabilizadores de tensão.

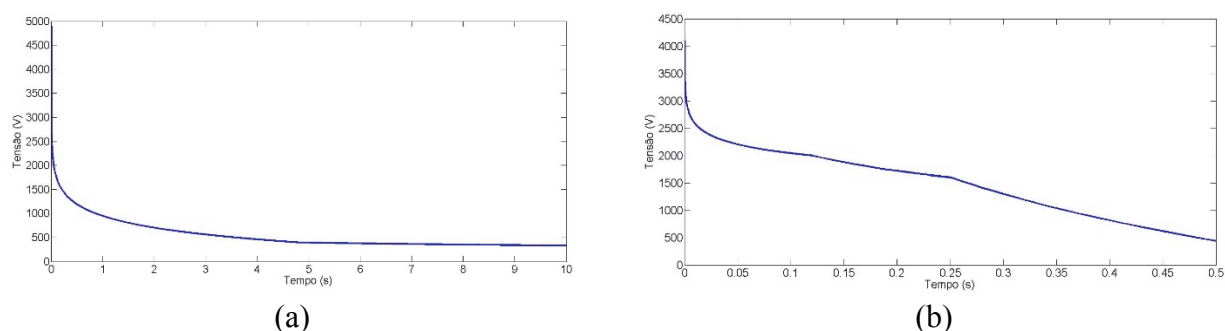


Figura 4.8 Curva UFU-CEMIG [77]: Limites de suportabilidade para microcomputadores: (a) Sem estabilizador (b) Com estabilizador

Por fim, a Figura 4.9 traz os limites de suportabilidade obtidos para aparelhos de som.

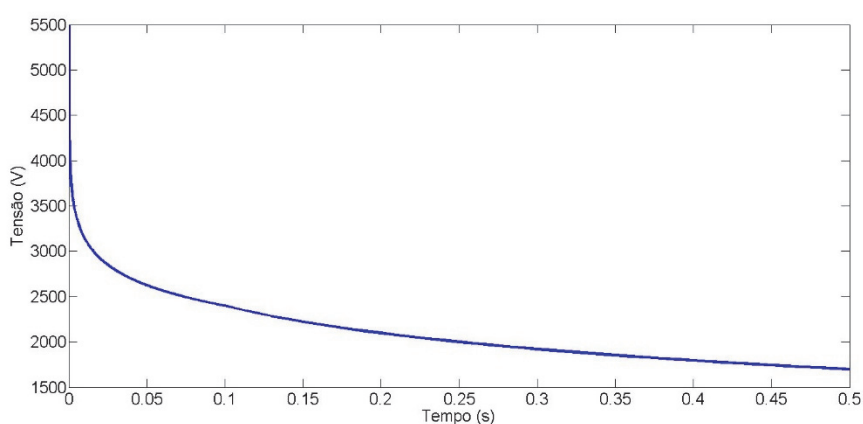


Figura 4.9 Curva UFU-CEMIG [83]: Limites de suportabilidade para aparelhos de som.

À luz do exposto segue que esta tese avança no sentido de realizar trabalhos com objetivos similares aos anteriormente apresentados, considerando, todavia, outros produtos, como detalhado a seguir.

4.2.4 Estrutura laboratorial para a obtenção dos limites de suportabilidade dielétrica

Em consonância com as metas estabelecidas para o levantamento dos limites de suportabilidade quanto as tensões impostas, com destaque ao reconhecimento das características próprias das três regiões já ressaltadas, os recursos laboratoriais adequados para a concretização dos testes, nos termos requeridos para cada uma delas, são considerados a seguir.

a) Região 1

Para o atendimento às necessidades vinculadas com fenômenos equivalentes aos surtos atmosféricos e outros, torna-se necessário a disponibilização de recursos laboratoriais associados com instalações de alta tensão. A Figura 4.10 indica o Laboratório de Alta Tensão da UNIFEI, o mesmo utilizado para realização dos testes do capítulo anterior.



Figura 4.10 Estrutura do laboratório na UNIFEI para os ensaios associados com a região 1

b) Região 2

No que tange a esta região destaca-se que não foi utilizada uma estrutura para tal, visto que tanto no âmbito da UFU como na UNIFEI, não foi possível o atendimento aos requisitos impostos para esta região. Não obstante tal limitação, para fins deste trabalho, foi realizada uma interpolação gráfica entre as duas outras passíveis de testes experimentais.

c) Região 3

Os ensaios experimentais para o atendimento aos requisitos impostos pela região 3 encontram-se alicerçados na estrutura física indicada na Figura 4.11, a qual empregou recursos existentes na própria UFU. A Figura 4.12 ilustra a montagem física correspondente.

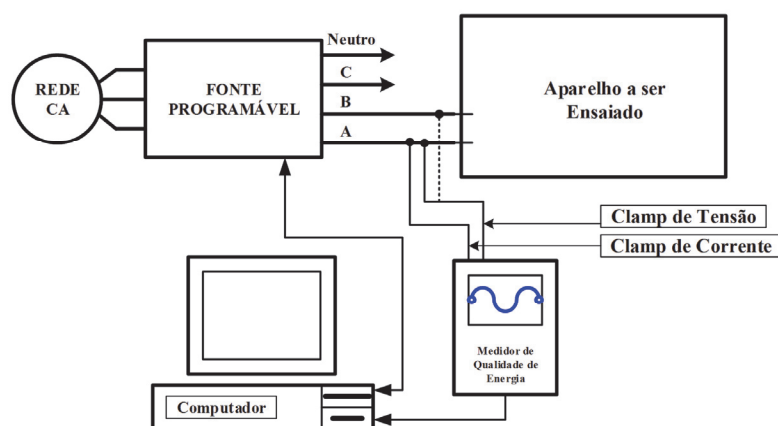


Figura 4.11 Arranjo experimental para os ensaios associados com a região 3

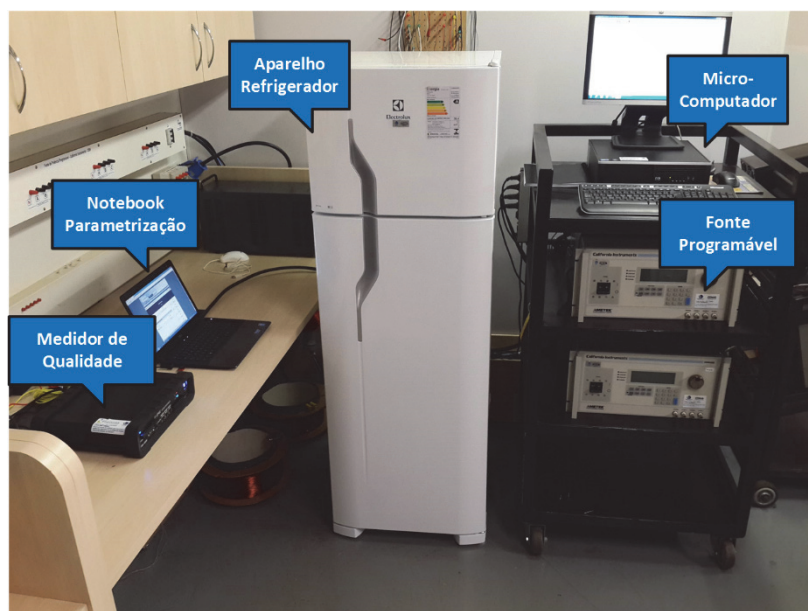


Figura 4.12 Estrutura física para os ensaios laboratoriais da região 3 - UFU

Os principais equipamentos que perfazem a estrutura física são:

- **Fonte programável trifásica:** modelo CSW5550 da California Instruments, com potência nominal de 11 kVA;
- **Medidor de Qualidade da Energia:** modelo G4500 BLACKBOX, da ELSPEC;
- **Micro-Computador:** destinado a programar os fenômenos relacionados associados com distúrbios na tensão e armazenar os resultados da medição.

4.2.5 Estrutura laboratorial para a obtenção dos limites de sensibilidade operacional às tensões

Com a intenção de reproduzir a estratégia descrita na subseção 4.2.2, a qual consiste em aplicar afundamentos e interrupções de tensões em frequência industrial com durações definidas, foi utilizada a mesma estrutura estabelecida para a obtenção dos níveis de suportabilidade dielétrica da “Região 3”, conforme apresentado nas Figura 4.11 e Figura 4.12.

4.3 Resultados para os limites de suportabilidade dielétrica

Uma vez definidas e estabelecidas as estruturas laboratoriais, os equipamentos selecionados para os estudos avaliativos focados nesta proposta de pesquisa foram então submetidos às mais diversas situações envolvendo a aplicação de tensões com as características requeridas pelos ensaios visando a determinação dos limites admissíveis para as regiões 1 e 3.

Como já mencionado, os equipamentos aqui tratados são: televisor de LED, refrigerador, freezer, máquina de lavar roupas, máquina de lavar louças e condicionador de ar Split.

4.3.1 Televisor a LED

O aparelho televisor utilizado, como esclarecido anteriormente, possui tecnologia a LED, tela de 32 polegadas e pode ser suprido por tensões entre 100 e 240 V.

- Sobretensões à Frequência Industrial – Região 3:

Tendo em vista a tensão máxima admissível pelo equipamento, para a execução desse teste a tensão considerada como 1 p.u. foi a de 220 V, grandeza esta que foi incrementada para 2,4 p.u. por 10 segundos.

Conforme mostra a Figura 4.13, o televisor de LED apresentou um comportamento similar a uma impedância constante. Sob a ação desta alimentação, o equipamento sofreu uma avaria permanente próxima aos 5 s. De fato, o esforço impactante foi suficiente para danificar os capacitores da fonte de tensão do televisor de LED. Na mesma figura, encontra-se um *zoom* mostrando o momento em que o equipamento deixou de funcionar. Observe que a corrente somente vai a zero após o fim da sobretensão, mas o primeiro capacitor sofreu avaria próximo dos 5 segundos após o início da sobretensão.

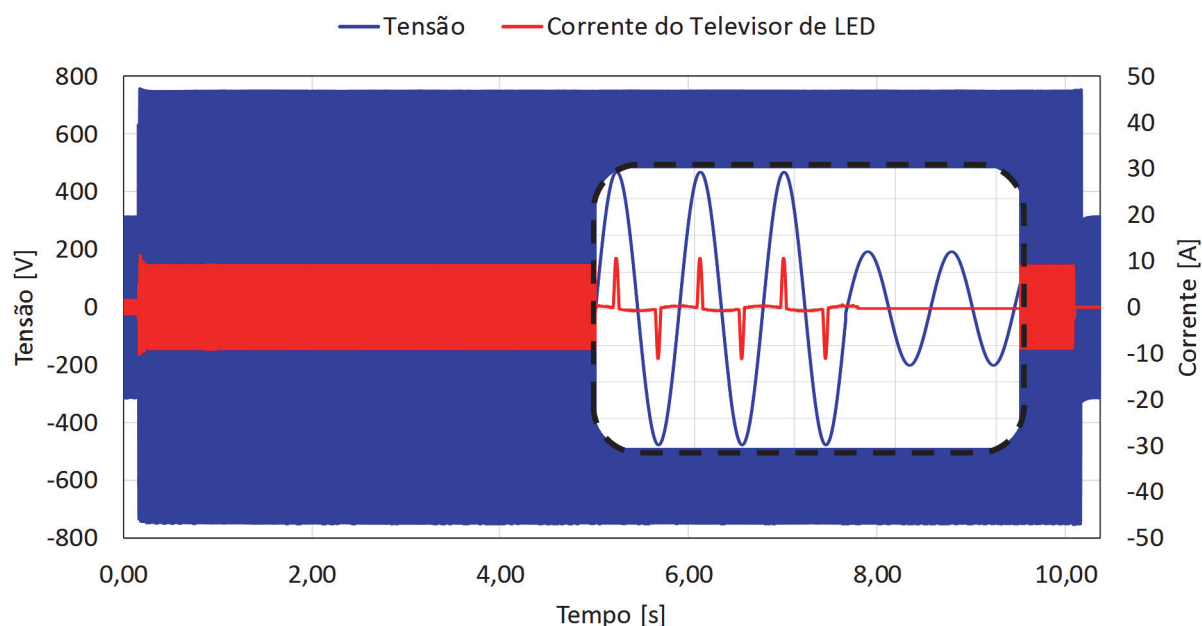


Figura 4.13 Tensão e corrente impostas ao televisor de LED sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

A Figura 4.14 mostra com detalhes os capacitores danificados na placa eletrônica.

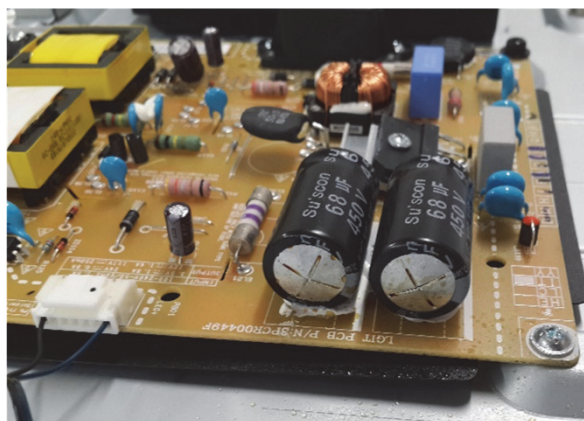


Figura 4.14 Capacitores avariados

- *Sobretensões impulsivas – Região 1:*

Quanto ao valor da tensão máxima admissível na forma de impulso, esta, como ressaltado anteriormente, se apresenta condizente com o emprego da estrutura física indicada na Figura 4.10. Empregando-se este arranjo, distintos impulsos de tensões, nos padrões regulamentados de 1,2x50 μ s, foram aplicados até proporções tais a atingir valores de crista de 5 kV. Não obstante estes níveis de sobretensões, não houve, para qualquer ensaio, danos de natureza física, fato este que evidencia uma expressiva robustez do produto aos fenômenos aqui postos. Diante desta situação, consultas feitas em catálogos de fabricantes esclareceram que os componentes mais frequentemente danificados, quais sejam, os diodos e capacitores, estes são previstos para suportar esforços dielétricos do tipo impulso em até 3 kV, conforme regulamentado em [93]. À luz destes indicativos optou-se, por medida de segurança, que fosse utilizado tais padrões como sendo os valores máximos admitidos pelo televisor, fato este que orientou os fundamentos para a obtenção das informações associadas com a denominada Região 1, ora tratada. Portanto, fica aqui esclarecido que a ação numérica feita se apresenta como medida conservadora para a garantida na integridade do eletrodoméstico em foco.

- *Curva de suportabilidade dielétrica:*

A Tabela 4.2 sintetiza os resultados associados com os limites obtidos para as tensões de suprimento, respeitadas suas naturezas.

Tabela 4.2 Síntese dos resultados experimentais para tensões limites do televisor a LED

	ENSAIO DE IMPULSO	ENSAIO À FREQ. INDUSTRIAL	REGIME PERMANENTE
Tensão [V]	3000	528 (Eficaz)	396 (Eficaz)
Duração [s]	$1,20 \times 10^{-6}$	5	20

A partir dos dados da Tabela 4.2 e com auxílio das equações 4.2 e 4.3 é possível obter as expressões para as regiões 1 e 3, lembrando que a região 2 foi obtida através de interpolação numérica. Os resultados finais encontram-se fornecidos através das equações 4.4 e 4.5.

$$V(t) = -373,42 \cdot \log t + 789,01 \quad 0 < t < 5 \text{ s} \quad (4.4)$$

$$V(t) = -219,24 \cdot \log t + 681,25 \quad 5 < t < 20 \text{ s} \quad (4.5)$$

A Figura 4.15 mostra a curva de suportabilidade dielétrica final obtida para o televisor de LED.

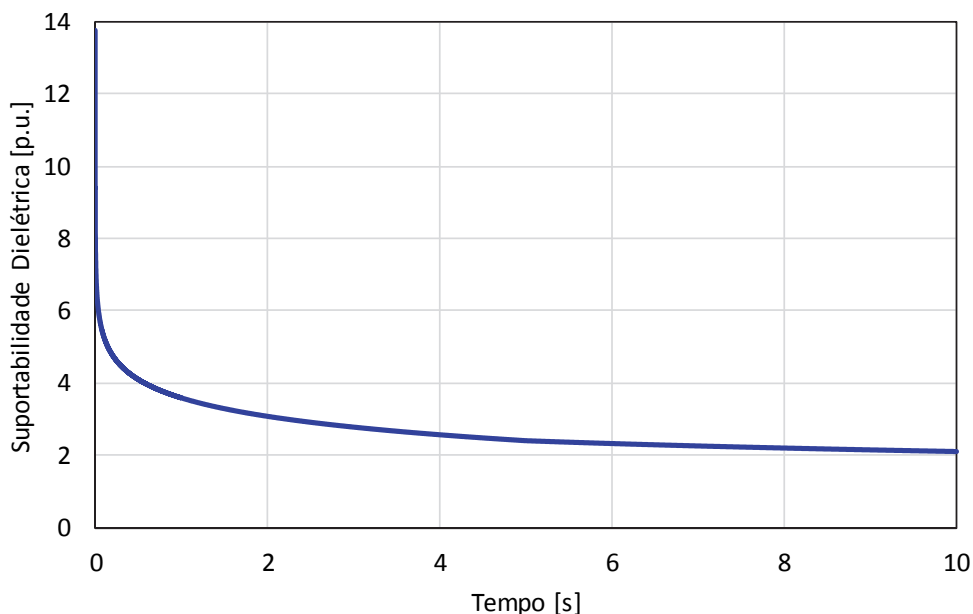


Figura 4.15 Limite de suportabilidade dielétrica do aparelho televisor a LED

4.3.2 Refrigerador

O aparelho refrigerador testado é de uma marca tradicional comercializada no país, com capacidade de 260 litros e tensão nominal de 220 V.

- *Sobretensões à Frequência Industrial – Região 3:*

Os testes aqui reportados, por limitações laboratoriais, foram limitados a fenômenos correspondentes a elevações de tensões em frequência de 60 Hz. Para tanto, o equipamento sob análise foi energizado sob condições nominais, permanecendo nesta situação por 20 minutos. Este procedimento foi empregado para que se atingisse o equilíbrio do sistema de refrigeração e troca de calor. A partir deste intervalo de tempo foi aplicada uma sobretensão de 2,4 p.u. durante 10 segundos. Essa amplitude foi definida em função do limite imposto pela fonte programável utilizada, mas está suficientemente em consonância com o objetivo da proposta. A Figura 4.16 ilustra o resultado da imposição desta condição operativa. Como se constata, logo no início do registro ocorre a mencionada elevação da tensão, a qual retorna ao valor nominal nas imediações dos 10 segundos. Além disso, verifica-se pelo zoom, o momento exato do retorno da tensão e o desligamento do refrigerador.

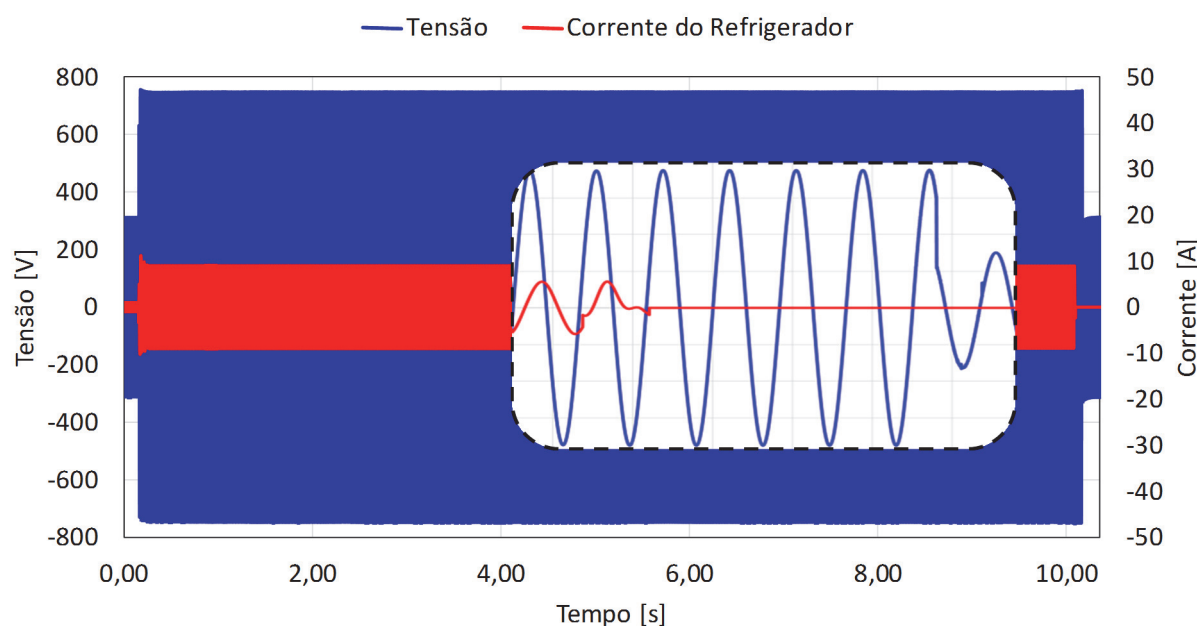


Figura 4.16 Tensão e corrente impostas ao refrigerador sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

Os desempenhos indicados através do oscilograma mostra que, o refrigerador se comporta como uma impedância constante. De fato, a sua correspondente corrente, indicada em vermelho, ratifica esta observação. Ao término do período de aplicação da sobretensão, nas imediações dos 10 segundos, o relé térmico atuou, desconectando o equipamento, **sem que se observasse qualquer dano de natureza física ao mesmo.**

- *Sobretensões impulsivas – Região 1:*

No que tange aos ensaios quanto a aplicação de tensões do tipo impulso, constatações similares àquelas já mencionadas para os televisores a LED puderam ser constatadas. Diante disto, o mesmo critério já esclarecido foi, mais uma vez, utilizado para a definição desta região. Nestes termos, o valor de crista de 3 kV foi empregado como limite superior.

- *Curva de suportabilidade dielétrica:*

É importante ressaltar que diferentemente do televisor, os ensaios que contemplam elevações de tensões à frequência industrial não foram suficientes para provocar danos algum ao refrigerador, devido a ação do protetor térmico, o qual apenas desligava o equipamento por alguns minutos. Logo, os limites a serem apresentados para a região 1 correspondem apenas ao ponto de desligamento e não ao limite máximo admissível por tensão.

A Tabela 4.3 sintetiza os resultados associados com os limites obtidos para as tensões de suprimento, respeitadas suas naturezas.

Tabela 4.3 Síntese dos resultados experimentais para tensões limites do refrigerador

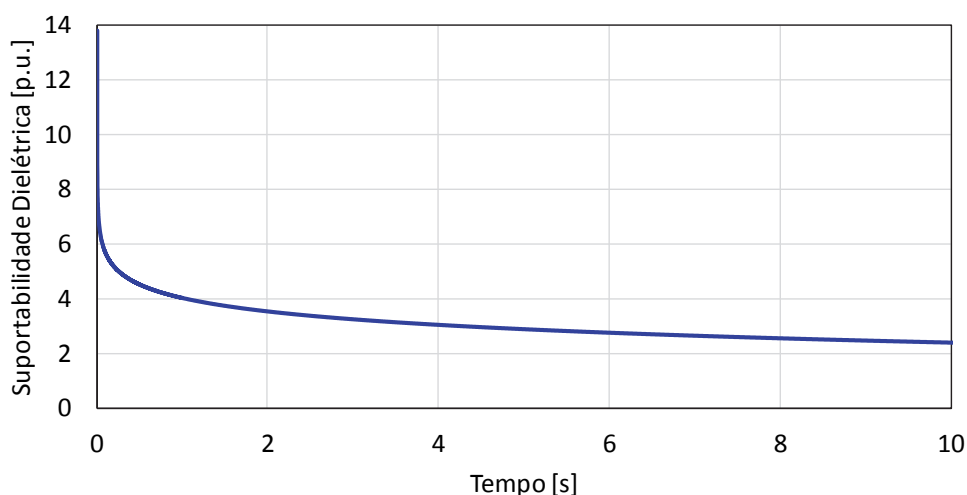
	ENSAIO DE IMPULSO	ENSAIO À FREQ. INDUSTRIAL	REGIME PERMANENTE
Tensão [V]	3000	528 (Eficaz)	396 (Eficaz)
Duração [s]	$1,2 \times 10^{-6}$	9,91	20

A partir dos dados da Tabela 4.3 e com auxílio das equações 4.2 e 4.3 é possível obter as expressões para as regiões 1 e 3, lembrando que a região 2 foi obtida através de interpolação numérica. Os resultados finais encontram-se fornecidos através das equações 4.6 e 4.7.

$$V(t) = -357,18 \cdot \log t + 885,18 \quad 0 < t < 9,91 \text{ s} \quad (4.6)$$

$$V(t) = -438,49 \cdot \log t + 966,49 \quad 9,91 < t < 20 \text{ s} \quad (4.7)$$

A Figura 4.17 mostra a curva de suportabilidade dielétrica obtida para o refrigerador.

*Figura 4.17 Limite de suportabilidade dielétrica do aparelho refrigerador*

4.3.3 Freezer

O freezer ensaiado, também comercialmente encontrado nas lojas revendedoras, possui capacidade de 195 litros e tensão nominal de 220 V.

- Sobretensões à Frequência Industrial – Região 3:

Os ensaios de sobretensão no freezer foram realizados segundo a mesma estratégia anterior. Quanto aos resultados, a Figura 4.18 é indicativa que a limitação de potência da fonte trifásica ocasionou uma queda de tensão no instante que se iniciava a elevação de 1,0 para 2,4 p.u.. Não obstante a esta observação, o equipamento, tal como o refrigerador, também apresentou um desempenho similar ao de uma impedância constante. Na condição de sobretensão foi constatada uma corrente de pico da ordem de 20 A de pico, valor este suficiente para que a proteção térmica atuasse (antes dos 4 segundos). **Por fim, registra-se que o equipamento não foi afetado por qualquer**

dano físico, retornando ao seu funcionamento normal após um curto intervalo de tempo suficiente para restauração da tensão nominal.

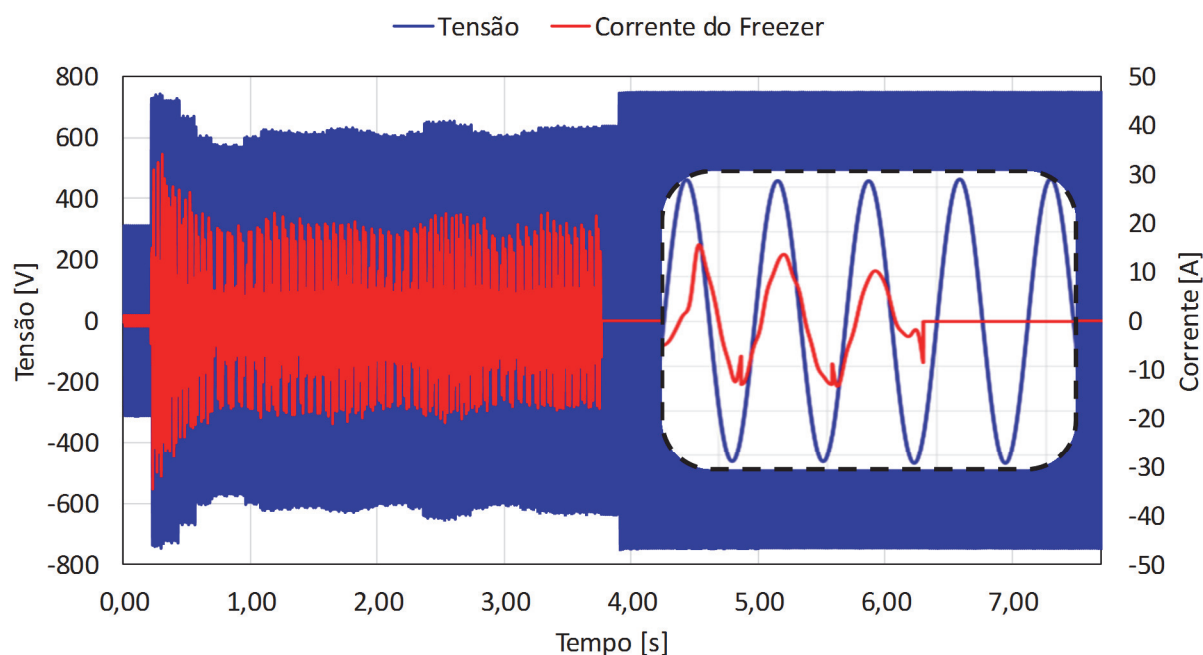


Figura 4.18 Tensão e corrente impostas ao freezer sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

- Sobretensões impulsivas – Região 1:

O mesmo critério já mencionado para os demais equipamentos foi igualmente aplicado para a presente situação.

- Curva de suportabilidade dielétrica:

As mesmas observações feitas para o refrigerador no que se refere aos testes contemplando a frequência industrial são prontamente cabíveis para o freezer também, ressaltando então que os limites a serem apresentados para a região 3 correspondem apenas ao ponto de desligamento e não limite máximo admissível por tensão. Quanto aos aspectos relacionados com a região 1, são feitas as mesmas observações presentes nos eletrodomésticos anteriores discutidos.

A Tabela 4.4 sintetiza os resultados associados com os limites obtidos para as tensões de suprimento, respeitadas suas naturezas.

Tabela 4.4 Síntese dos resultados experimentais para tensões limites do freezer

	ENSAIO DE IMPULSO	ENSAIO À FREQ. INDUSTRIAL	REGIME PERMANENTE
Tensão [V]	3000	528 (Eficaz)	396 (Eficaz)
Duração [s]	$1,2 \times 10^{-6}$	3,83	20

A partir dos dados da Tabela 4.4 e com auxílio das equações 4.2 e 4.3 é possível obter as expressões para as regiões 1 e 3, lembrando que a região 2 foi obtida através de interpolação numérica. Os resultados finais são descritos por meio das equações 4.8 e 4.9.

$$V(t) = -380,07 \cdot \log t + 749,65 \quad 0 < t < 3,83 \text{ s} \quad (4.8)$$

$$V(t) = -316,69 \cdot \log t + 712,69 \quad 3,83 < t < 20 \text{ s} \quad (4.9)$$

A Figura 4.19 mostra a curva de suportabilidade dielétrica final obtida para o freezer.

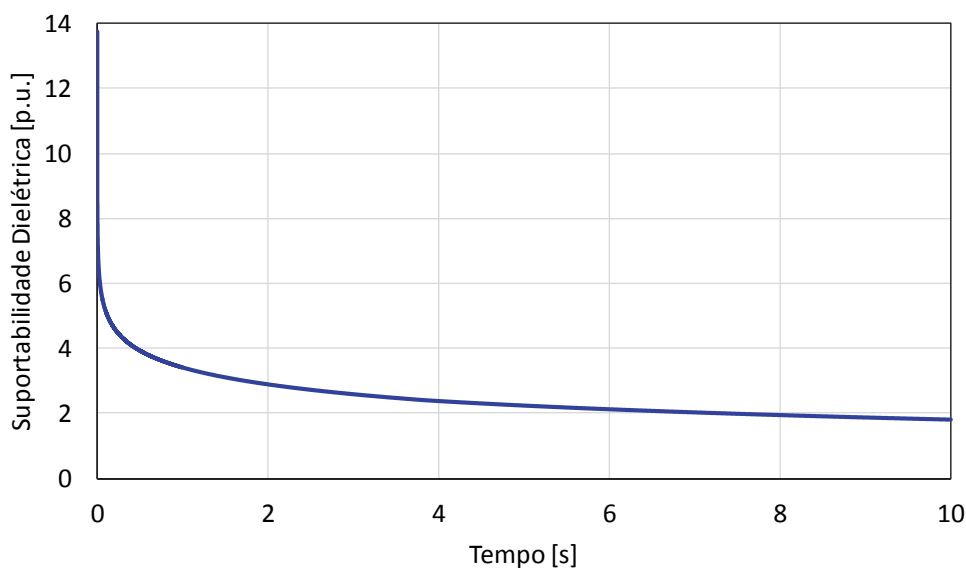


Figura 4.19 Limite de suportabilidade dielétrica do freezer

4.3.4 Máquina de Lavar Roupas

A máquina de lavar roupas ensaiada, também comercial, apresenta capacidade para 6 kg de roupas e opera com tensão nominal de 127 V.

- Sobretensões à Frequência Industrial – Região 3:

Em atenção aos mesmos procedimentos já utilizados, o tema aqui tratado encontra-se centrado no desempenho da máquina de lavar roupas quando sujeita a fenômenos atrelados com sobretensões a 60 Hz. Os trabalhos, como detalhado na sequência, foram conduzidos para duas situações distintas representativas do estado operacional do equipamento. Uma associada com a condição conhecida por “processo de lavagem”, e, outra na sequência, ao “processo de centrifugação”.

A Figura 4.20 ilustra o desempenho quando a tensão de suprimento atinge 2,4 p.u do valor nominal por 10 segundos. Nesta, é possível verificar que o “processo de lavagem” foi interrompido durante a permanência da sobretensão, resultando em cinco tentativas de partidas malsucedidas.

Uma vez restaurada a tensão nominal, o equipamento prontamente retornou ao funcionamento normal, **sem que se observasse qualquer avaria física.**

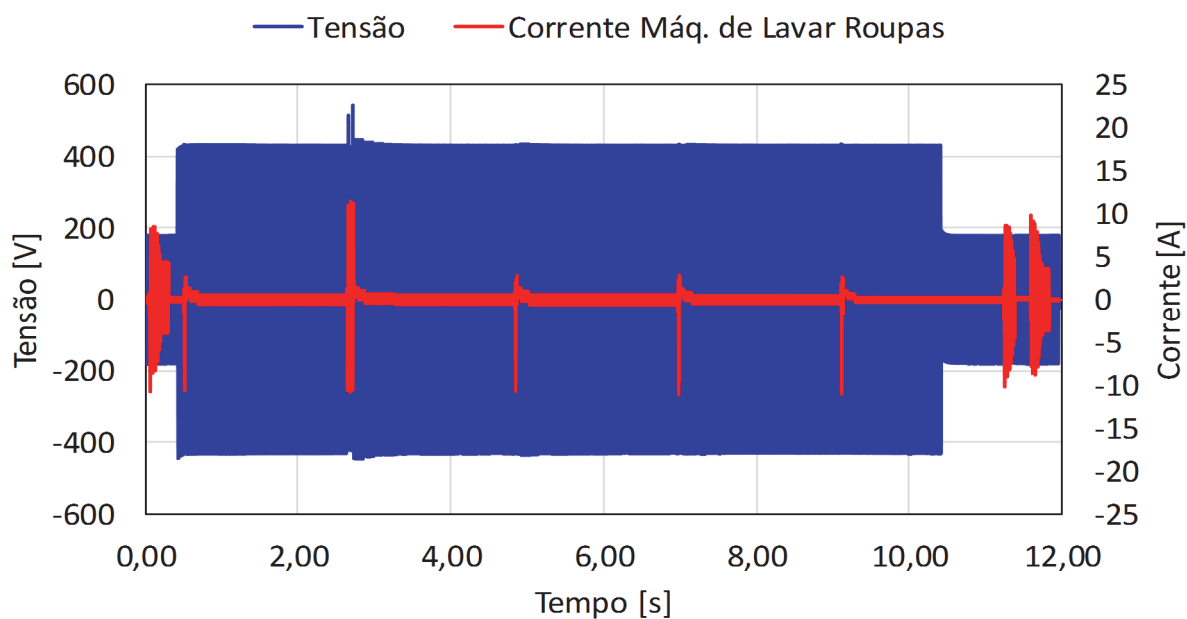


Figura 4.20 Tensão e corrente impostas à máquina de lavar roupas sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial – “processo de lavagem”

A Figura 4.21 representa um *zoom* feito logo após o restabelecimento nominal da tensão. Nesta pode-se observar o processo típico da partida e reversão de velocidade do motor manifestado imediatamente após o retorno da tensão normal. Os oscilogramas são condizentes com o “processo de lavagem”. Vale aqui ressaltar que o mesmo ensaio foi realizado com uma sobretensão inferior à 2,0 p.u. e, nessas circunstâncias, o equipamento funcionou normalmente durante todo o período analisado.

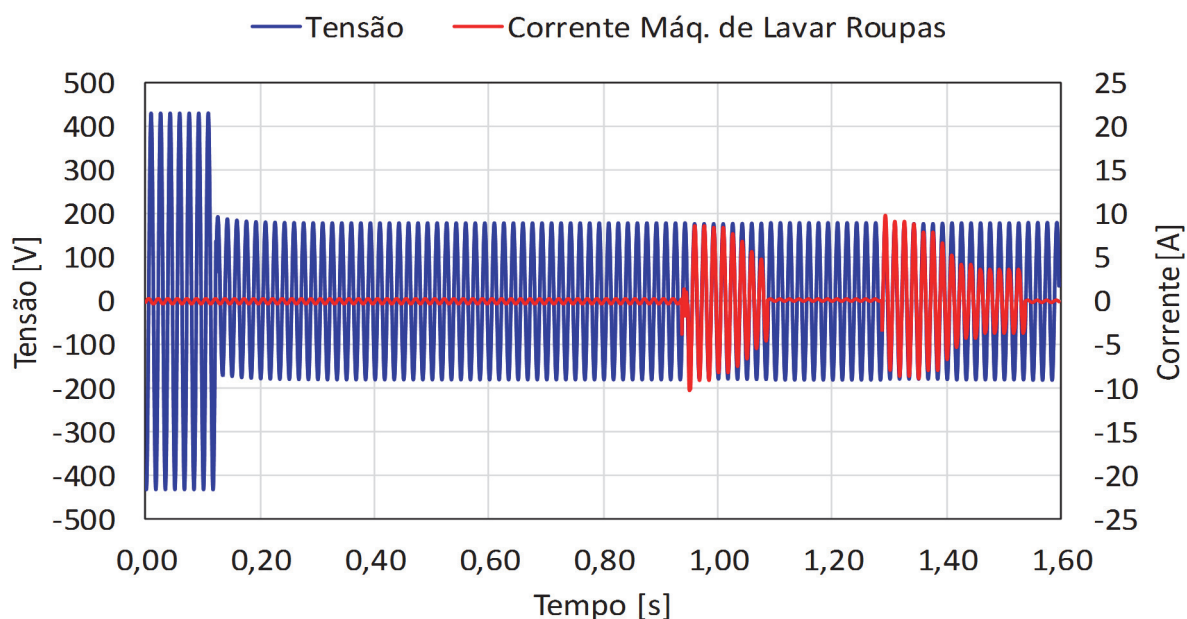


Figura 4.21 Zoom da tensão e corrente impostas à máquina de lavar roupas após a manifestação da sobretensão à frequência industrial de 2.4 p.u – “processo de lavagem”

Visando complementar o processo investigativo do desempenho da máquina de lavar roupas, testes similares foram realizados durante o “processo de centrifugação”. Nessas condições, o equipamento não interrompeu seu funcionamento quando da aplicação de uma sobretensão de 2,4 p.u.. Dentro destas condições, sua corrente de pico chegou a 13 A. Uma vez recuperada a tensão nominal constatou-se que, decorridos cerca de 22 segundos de funcionamento, houve a manifestação de um defeito de natureza física na bomba de sucção de água.

A Figura 4.22 ilustra a tensão e a corrente em uma janela de tempo suficiente para acompanhar todo o processo, o qual compreende momentos desde a imposição da sobretensão até a falha no equipamento (por volta de 32 segundos). A mesma figura ainda apresenta um detalhe da corrente no momento em que o equipamento é danificado.

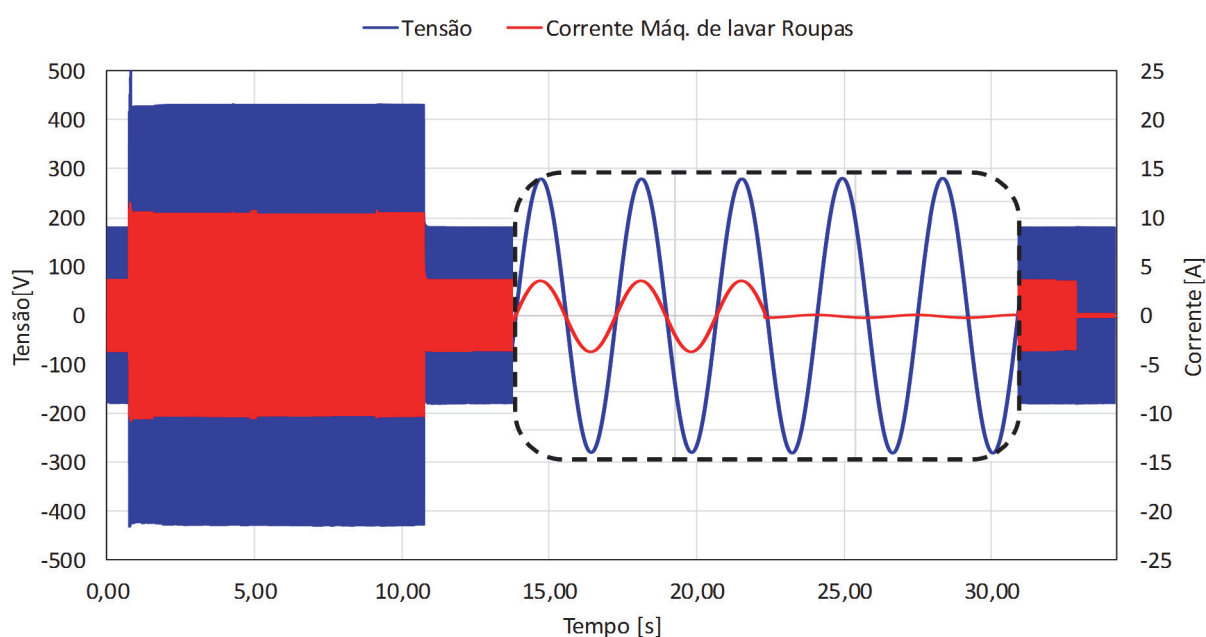


Figura 4.22 Tensão e corrente impostas à máquina de lavar roupas sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial – “processo de centrifugação”

A Figura 4.23 mostra a peça avariada.

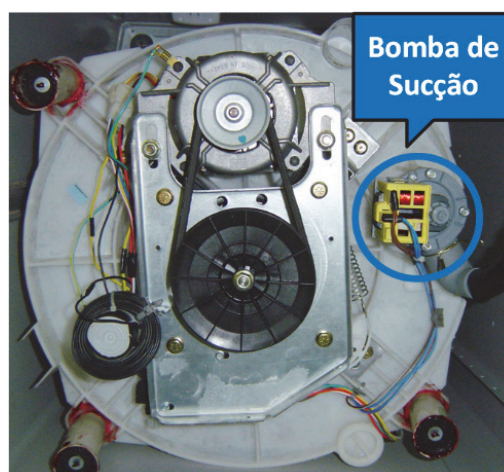


Figura 4.23 Bomba de sucção avariada

- Sobretensões impulsivas – Região 1:

O limite superior para o eletrodoméstico aqui focado se apresenta em consonância com a estratégia já esclarecida. Neste caso particular destaca-se o fato que o produto possui componentes eletrônicos que se mostram com propriedades operacionais similares aos já informados.

- Curva de suportabilidade dielétrica:

A Tabela 4.8 sintetiza os resultados associados com os limites obtidos para as tensões de suprimento, respeitadas suas naturezas.

Tabela 4.5 Síntese dos resultados experimentais para tensões limites da máquina de lavar roupas

	ENSAIO DE IMPULSO	ENSAIO À FREQ. INDUSTRIAL	REGIME PERMANENTE
Tensão [V]	3000	304,8 (Eficaz)	228,6 (Eficaz)
Duração [s]	$1,20 \times 10^{-6}$	10	20

A partir dos dados da Tabela 4.5 e com auxílio das equações 4.2 e 4.3, é possível obter as expressões para as regiões 1 e 3, lembrando que a região 2 foi obtida através de interpolação numérica. Os resultados finais são descritos por meio das equações 4.10 e 4.11.

$$V(t) = -389,43 \cdot \log t + 694,23 \quad 0 < t < 10 \text{ s} \quad (4.10)$$

$$V(t) = -253,13 \cdot \log t + 557,93 \quad 10 < t < 20 \text{ s} \quad (4.11)$$

A Figura 4.24 mostra a curva de suportabilidade dielétrica obtida para a máquina de lavar roupas.

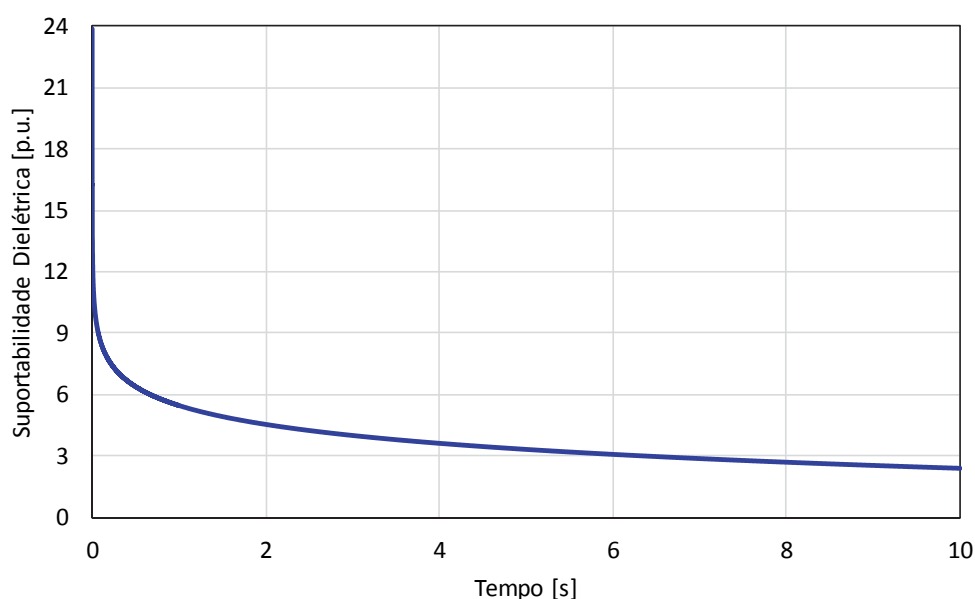


Figura 4.24 Limite de suportabilidade dielétrica da máquina de lavar roupas

4.3.5 Máquina de Lavar Louças

A máquina de lavar louças testada possui 25 litros, tensão de alimentação de 220 V e também é de uma marca tradicional no mercado.

- Sobretensões na Frequência Industrial– Região 1:

Os ensaios de sobretensão na máquina de lavar louças foram realizados segundo a mesma estratégia adotada anteriormente, observando, entretanto, uma limitação da potência da fonte trifásica, como indicado na Figura 4.25. De fato, por questões vinculadas com quedas de tensão internas à fonte, o maior patamar de tensão disponibilizado para os testes foi de 1,75 p.u.. Para esta tensão de suprimento foi constatada uma corrente de pico da ordem de 12,5 A, a qual representa cerca de 125% do valor em condições nominais de suprimento. Também, o fenômeno ora aplicado **não foi capaz de provocar nenhuma anomalia operacional para o equipamento em questão.**

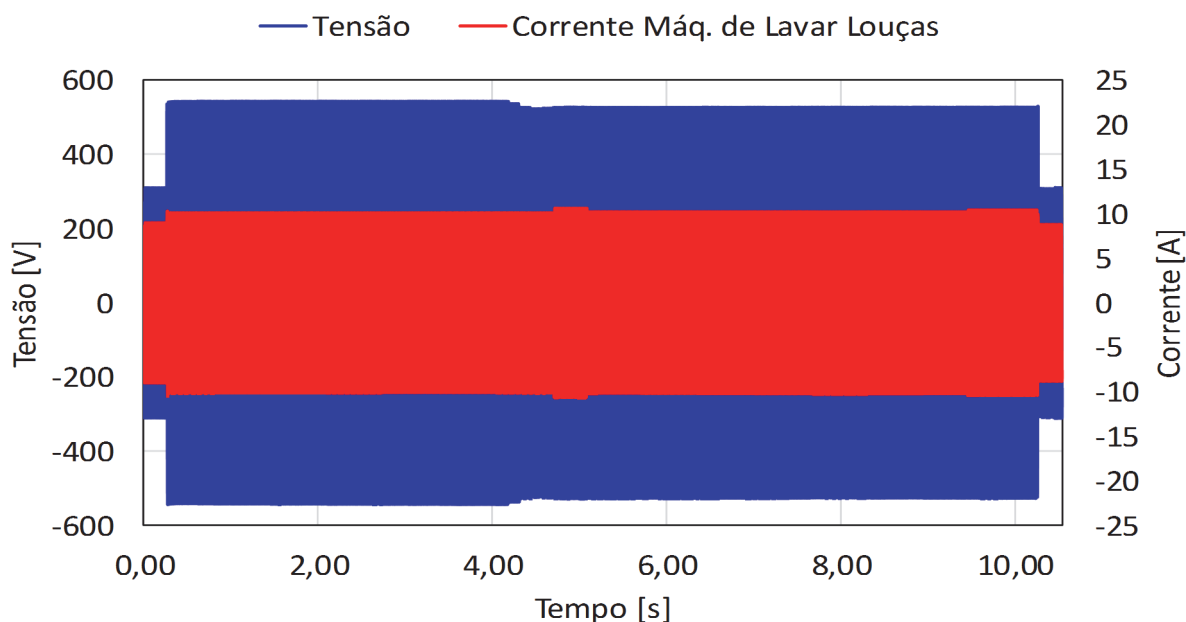


Figura 4.25 Tensão e corrente impostas à máquina de lavar louças sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

A Figura 4.26 ilustra, de uma maneira mais detalhada, a situação reportada anteriormente.

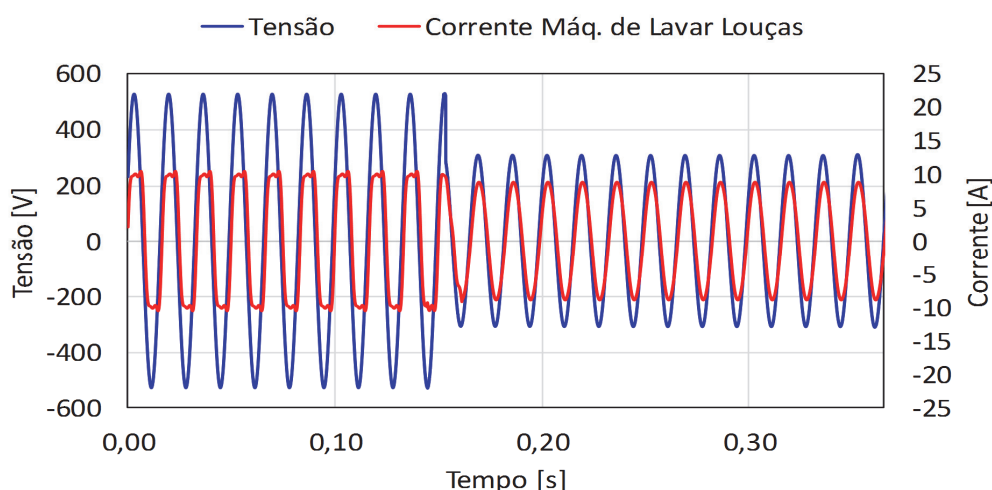


Figura 4.26 Detalhes da tensão e da corrente impostas à máquina de lavar louças sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

Na tentativa de se conseguir um nível de tensão superior ao fornecido pela fonte programável, foi então utilizada uma estrutura mais simples, menos controlada, onde se aplicou nos terminais do equipamento uma tensão eficaz igual a 702 V com auxílio de um varivolt por 5 segundos. Nessas circunstâncias, houve um dano físico na bomba de sucção de água.

- Sobretensões impulsivas – Região 1:

Mais uma vez, considerações similares àquelas já ressaltadas para os demais equipamentos se mostram aplicáveis ao dispositivo sob análise.

- Curva de suportabilidade dielétrica:

A Tabela 4.9 sintetiza os resultados associados com os limites obtidos para as tensões de suprimento, respeitadas suas naturezas.

Tabela 4.6 Síntese dos resultados experimentais para tensões limites da máquina de lavar louças

	ENSAIO DE IMPULSO	ENSAIO À FREQ. INDUSTRIAL	REGIME PERMANENTE
Tensão [V]	3000	702 (Eficaz)	396 (Eficaz)
Duração [s]	$1,20 \times 10^{-6}$	5	20

A partir dos dados da Tabela 4.6 e com auxílio das equações 4.2 e 4.3 é possível obter as expressões para as regiões 1 e 3, lembrando que a região 2 foi obtida através de interpolação numérica. Os resultados finais são descritos por meio das equações 4.12 e 4.13.

$$V(t) = -347,14 \cdot \log t + 944,64 \quad 0 < t < 5 \text{ s} \quad (4.12)$$

$$V(t) = -508,25 \cdot \log t + 1057,25 \quad 5 < t < 20 \text{ s} \quad (4.13)$$

A Figura 4.27 mostra a curva de suportabilidade dielétrica final obtida para a máquina de lavar louças.

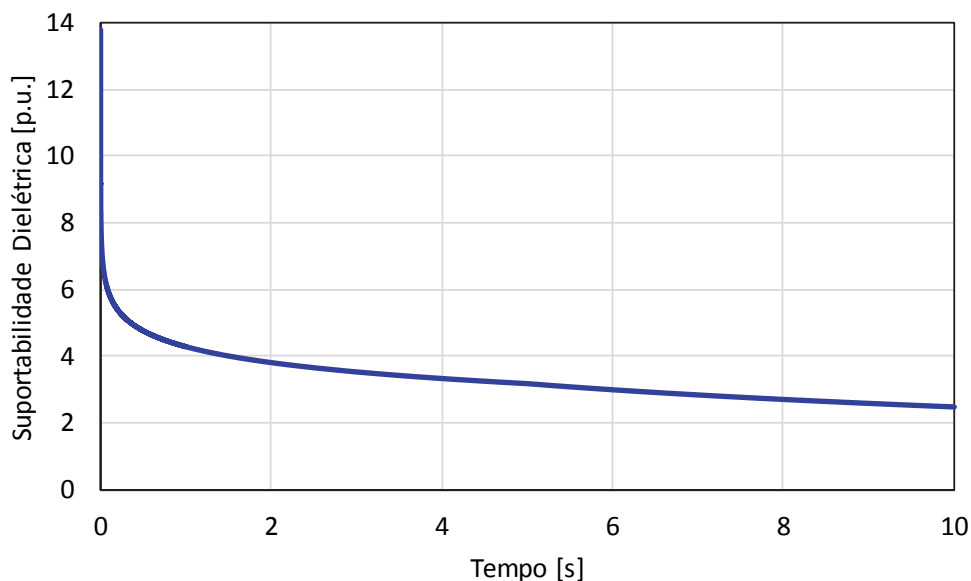


Figura 4.27 Limite de suportabilidade dielétrica da máquina de lavar louças

4.3.6 Condicionador de Ar Split

O aparelho condicionador de ar Split, como já mencionado anteriormente, possui capacidade de refrigeração de 7.500 BTU/h e tensão de alimentação de 220 V.

- *Sobretensões na Frequência Industrial – Região 1:*

Mais uma vez, devido a limitações impostas pela fonte, a máxima sobretensão obtida para os testes em pauta foi de 1,75 p.u.. Quanto ao desempenho do condicionador de ar em questão, este foi condizente com as demais apresentadas até o momento. Na condição de sobretensão foi constatada uma corrente de pico da ordem de 10,5 A que representa cerca de 200% do valor em condições nominais de suprimento. Mesmo assim, o fenômeno aplicado **não foi capaz de interromper ou causar qualquer dano ao funcionamento do equipamento, como indicado na Figura 4.28.**

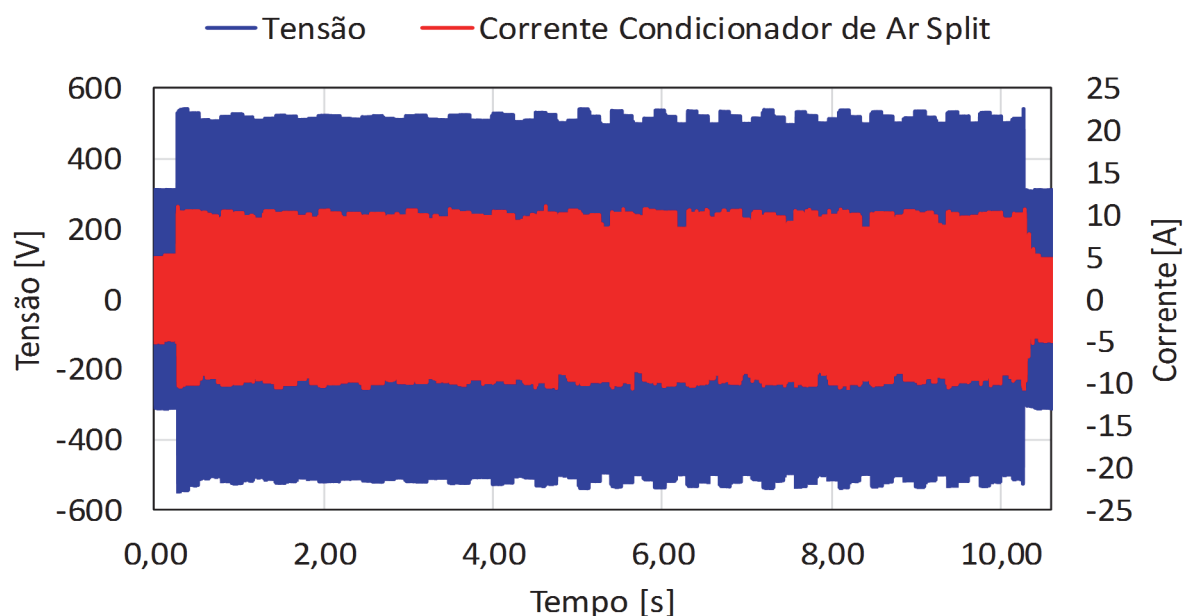


Figura 4.28 Tensão e corrente impostas ao condicionador de ar Split sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

A Figura 4.29 oferece um zoom do comportamento elétrico do dispositivo tão logo a tensão retorna aos padrões nominais.

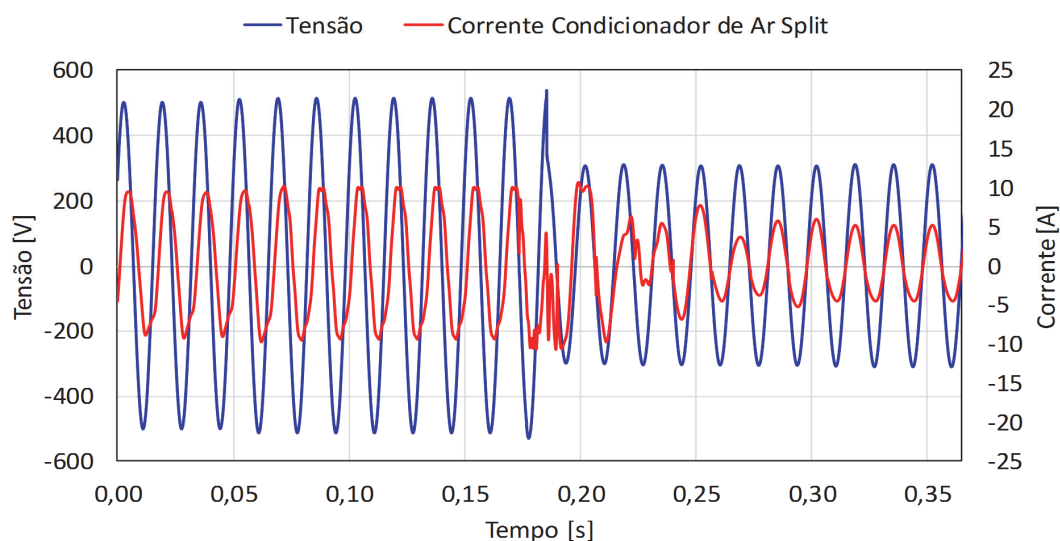


Figura 4.29 Detalhe da tensão e corrente impostas ao condicionador de ar Split sob a ação de uma sobretensão à frequência industrial

- Sobretensões impulsivas – Região 1:

Considerações similares àquelas já feitas para os demais produtos podem ser prontamente utilizadas para o caso em questão, até porque, o mesmo se apresenta constituído de componentes eletrônicos com níveis de suportabilidade semelhantes aos já referidos.

- Curva de suportabilidade dielétrica:

As mesmas observações feitas para o refrigerador e freezer no que se refere aos testes contemplando a frequência industrial, são prontamente cabíveis para o condicionador de ar Split também, ressaltando então que os limites a serem apresentados para a região 1 correspondem apenas ao ponto de desligamento e não ao limite máximo admissível por tensão.

A Tabela 4.10 sintetiza os resultados associados com os limites obtidos para as tensões de suprimento, respeitadas suas naturezas.

Tabela 4.7 Síntese dos resultados experimentais para tensões limites do condicionador de ar Split

	ENSAIO DE IMPULSO	ENSAIO À FREQ. INDUSTRIAL	REGIME PERMANENTE
Tensão [V]	3000	385 (Eficaz)	330 (Eficaz)
Duração [s]	$1,20 \times 10^{-6}$	10	20

A partir dos dados da Tabela 4.6 e com auxílio das equações 4.2 e 4.3 é possível obter as expressões para as regiões 1 e 3, lembrando que a região 2 foi obtida através de interpolação numérica. Os resultados finais são descritos por meio das equações 4.14 e 4.15.

$$V(t) = -377,84 \cdot \log t + 762,84 \quad 0 < t < 10 \text{ s} \quad (4.14)$$

$$V(t) = -182,70 \cdot \log t + 567,70 \quad 10 < t < 20 \text{ s} \quad (4.15)$$

A Figura 4.30 mostra a curva de suportabilidade dielétrica final obtida para o condicionador de ar Split.

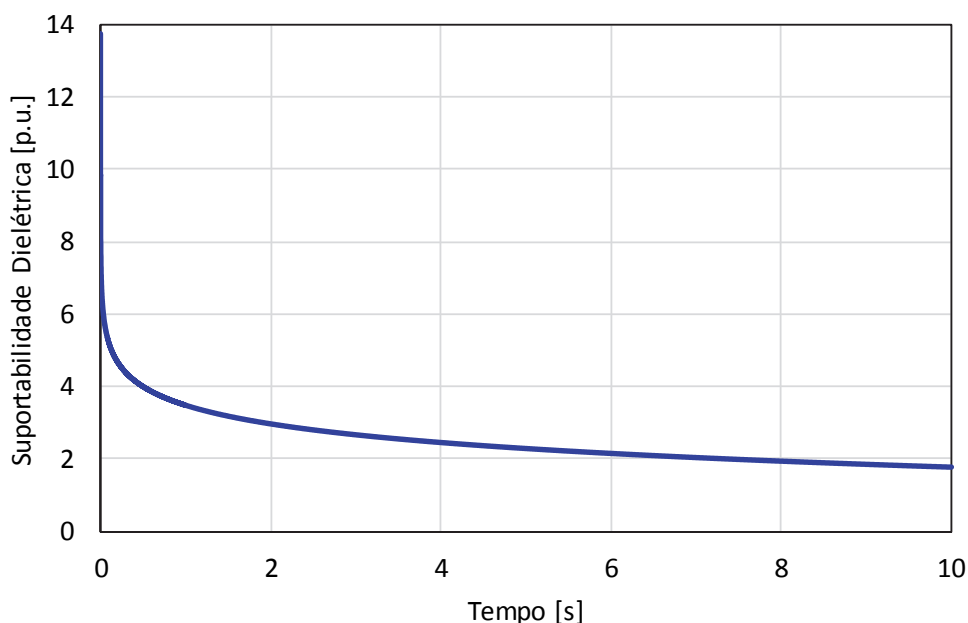


Figura 4.30 Limite de suportabilidade dielétrica do condicionador de ar Split

4.4 Análise comparativa das curvas de suportabilidade dielétrica

Uma vez estabelecidos os limites de suportabilidade dos dispositivos tratados, nos termos esclarecidos, procede-se, nesta seção, a uma análise comparativa entre os resultados obtidos e sua correlação com propostas originalmente disponibilizadas na literatura.

Dentro desta lógica, a Figura 4.31 correlaciona as novas curvas de suportabilidade dielétrica para aparelhos televisores a LED com aquelas encontradas e destacadas na seção 4.2.3.

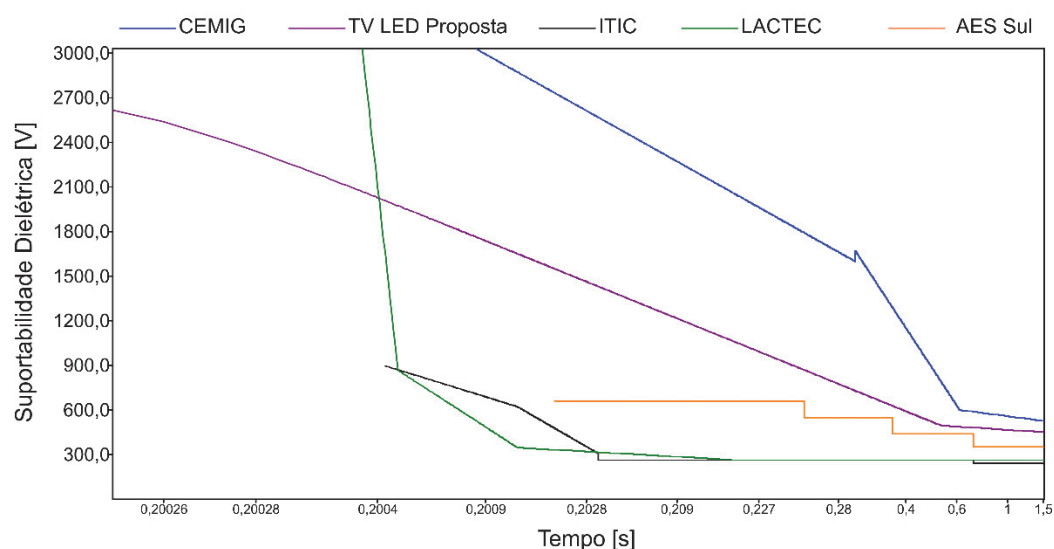


Figura 4.31 Limites de suportabilidades dielétricas para o aparelho televisor a LED – análise comparativa entre o limite proposto e os tradicionais da literatura

A Figura 4.32, de modo similar, correlaciona as curvas de suportabilidade dielétrica para refrigeradores. Como se observa, os limites propostos se apresentam com tolerâncias bastantes superiores àqueles até então conhecidos.

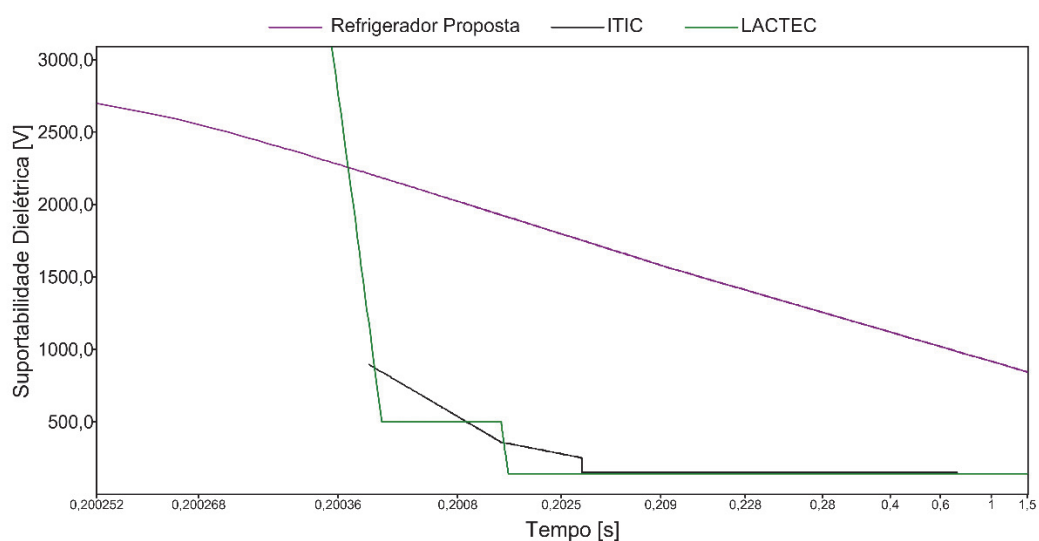


Figura 4.32 Limites de suportabilidades dielétricas para o refrigerador – análise comparativa entre o limite proposto e os tradicionais da literatura

Quanto aos demais eletrodomésticos, a inexistência de informações prévias sobre os limites de suportabilidade às tensões não permitiu uma correlação entre os resultados obtidos com outras proposições.

4.5 Limites de sensibilidade operacional às tensões

Essa etapa dos trabalhos se apresentou com foco no processo avaliativo da operação dos eletrodomésticos abordados ao longo desse trabalho, em que pese suas propriedades funcionais adequadas aos propósitos a que se destina, quanto da manifestação de afundamentos temporários de tensão (menores que 3 minutos), subtensões (maiores que 3 minutos) e interrupções, em consonância com a metodologia discutida na subseção 4.2.2. Tal como mencionado para os limites associados com as correntes, é importante destacar que, muito embora o limite de tempo empregado a seguir para a composição das figuras se apresente da ordem de alguns *ms*, as formulações matemáticas utilizadas podem ser prontamente utilizadas para quaisquer outras durações de exposição.

4.5.1 Televisores a LED

A Tabela 4.8 mostra os resultados operacionais obtidos sob a ação de distintos afundamentos e interrupções do suprimento. Tendo em vista que a tensão de entrada pode variar dentro da faixa explicitada (100 a 240 V), adotou-se, para fins deste trabalho, uma tensão nominal de 127 V.

Tabela 4.8 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – televisor de LED

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
1 CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
2 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
5 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	DT	DT	DT
10 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	DT	DT	DT
30 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	DT	DT	DT
60 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	DT	DT	DT
90 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	DT	DT	DT

Quanto ao funcionamento do produto, não foram registrados fatos anômalos meritórios de destaque. Em nenhum momento, outros que os indicados, houve desligamentos e o televisor se mostrou extremamente robusto sob a ação das variações de tensão impostas.

Os resultados obtidos permitiram, por fim, estabelecer os limites de sensibilidade sintetizados na Figura 4.33.

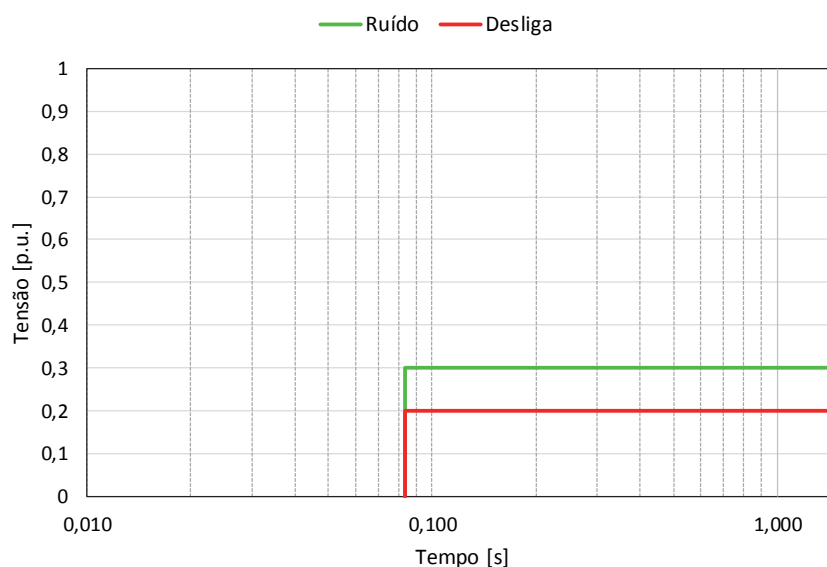


Figura 4.33 Limites de sensibilidades operacional de televisores a LED sob a ação de afundamentos e interrupções de tensão

4.5.2 Refrigeradores

Seguindo a filosofia dos testes apresentada na seção anterior, a Tabela 4.9 fornece os resultados de desempenho do refrigerador submetido aos fenômenos de afundamento e interrupção das tensões.

Tabela 4.9 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão - refrigerador

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
1 CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
2 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	RS
5 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	DL	DL
10 CICLOS	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS	DL	DL	DT
30 CICLOS	FN	FN	FN	FN	RS	DL	DT	DT	DT	DT
60 CICLOS	FN	FN	FN	FN	DL	DT	DT	DT	DT	DT
90 CICLOS	FN	FN	FN	FN	DL	DT	DT	DT	DT	DT

A partir dos desempenhos obtidos e classificados conforme critério apresentado, é possível traçar as curvas de sensibilidades indicadas na Figura 4.34. Como pode ser constatado, o traçado utilizou uma escala logarítmica para a grandeza tempo de exposição. Ressalta-se que apenas a característica indicada em vermelho representa uma parada temporária no funcionamento do equipamento em análise.

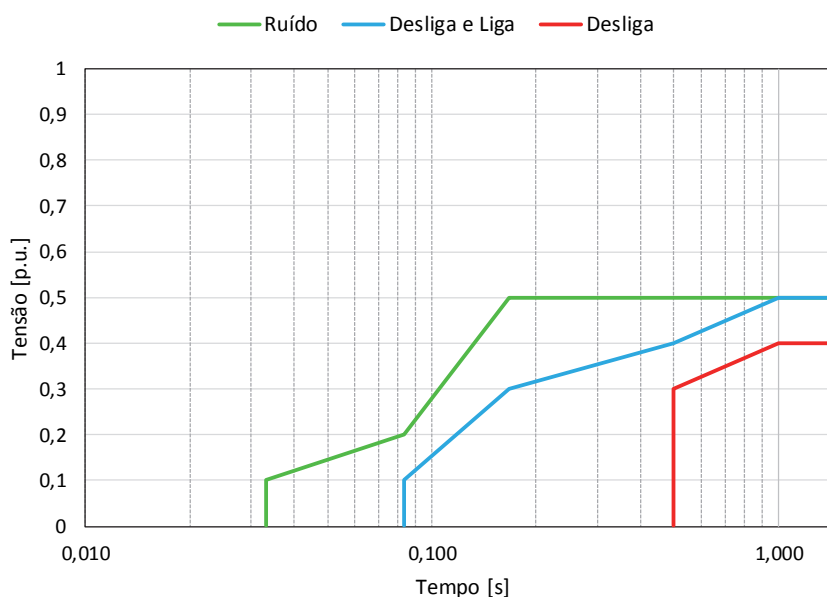


Figura 4.34 Limites de sensibilidades operacional de refrigeradores sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão

Nota-se que para afundamentos menores que 50%, não há evidências de qualquer anomalia operativa, portanto, os refrigeradores, quanto a sua respectiva tensão de suprimento, se mostram imunes a tais distúrbios.

4.5.3 Freezers

Os correspondentes resultados obtidos para o produto em foco são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão - freezer

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS
1 CICLO	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS
2 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS	RS
5 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS	RS
10 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	DL	DL	DL
30 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	RS	DL	DL	DL	DL
60 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	DL	DL	DL	DL	DL
90 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	DL	DT	DT	DT	DT

A Figura 4.35 sintetiza os níveis de sensibilidade experimentados pelo eletrodoméstico em pauta. As observações aplicáveis à figura são as mesmas já comentadas para o refrigerador. Um aspecto meritório de destaque está no fato que o freezer se mostra mais robusto que o refrigerador,

interrompendo seu funcionamento apenas quando a tensão chega a 0,3 p.u. para durações superiores a 1 segundo.

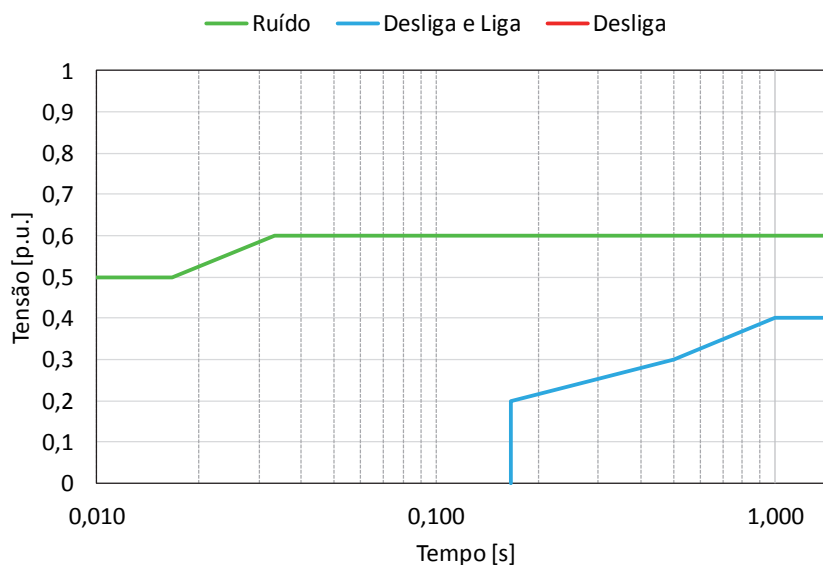


Figura 4.35 Limites de sensibilidades operacional de freezers sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão

4.5.4 Máquinas de Lavar Roupas

A Tabela 4.11 apresenta os resultados que expressam o desempenho do produto ora analisado diante das diversas condições impostas quanto as variações de tensão de curta-duração.

Tabela 4.11 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – máquina de lavar roupas

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
1 CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	DL
2 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	DL	DL	DL
5 CICLOS	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS	DL	DL	DL
10 CICLOS	FN	RS	RS	RS	RS	DL	DL	DL	DL	DL
30 CICLOS	FN	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL
60 CICLOS	FN	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DT	DT
90 CICLOS	FN	DL	DL	DL	DL	DL	DL	DT	DT	DT

A partir das informações obtidas experimentalmente, estas conduzem às curvas de sensibilidade para a máquina de lavar roupas, apresentadas na Figura 4.36. No que tange a estratégia para o estabelecimento dos limites traçados, estes são consonantes com os mesmos procedimentos já estabelecidos para os demais produtos já considerados.

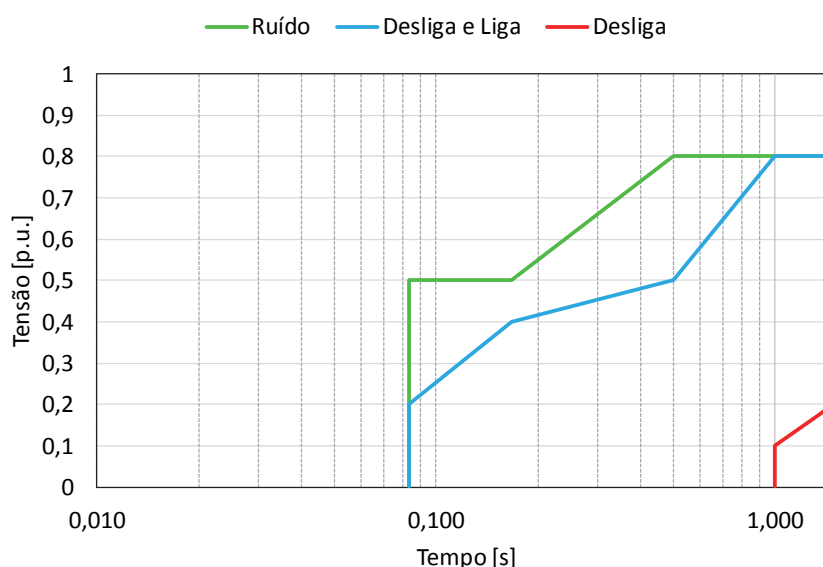


Figura 4.36 Limites de sensibilidades operacional de máquinas de lavar roupas sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão

Nota-se, claramente, que o equipamento apresenta dependências operacionais a partir das variações de tensão associadas com afundamentos de tensão que levam a 80% da tensão nominal. No entanto, o produto perde sua funcionabilidade temporária apenas quando as variações de tensão conduzem a patamares finais da ordem de 20% do valor nominal. Assim, constata-se que a máquina de lavar roupas se mostra mais robusta que o refrigerador e o freezer submetidos aos mesmos fenômenos ora tratados.

4.5.5 Máquinas de Lavar Louças

Repetindo os procedimentos já discutidos anteriormente obtêm-se os resultados da correlação entre a sensibilidade do produto diante de fenômenos atrelados com afundamentos e interrupções da tensão, como indicado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – máquina de lavar louças

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
1 CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
2 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
5 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS
10 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS	DL	DL
30 CICLOS	FN	FN	RS	RS	RS	DL	DL	DL	DL	DL
60 CICLOS	FN	FN	RS	RS	DL	DL	DL	DL	DT	DT
90 CICLOS	FN	FN	RS	RS	DL	DL	DT	DT	DT	DT

Baseado nas informações da Figura 4.37 obtêm-se as curvas de sensibilidade aplicáveis ao produto em questão. Os resultados se mostram totalmente condizentes com aqueles já apresentados para outros produtos. Vale, todavia, observar que quando comparada com a máquina de lavar roupas, essa se mostra mais robusta quanto a emissão de ruídos, desligamento e religamento instantâneo.

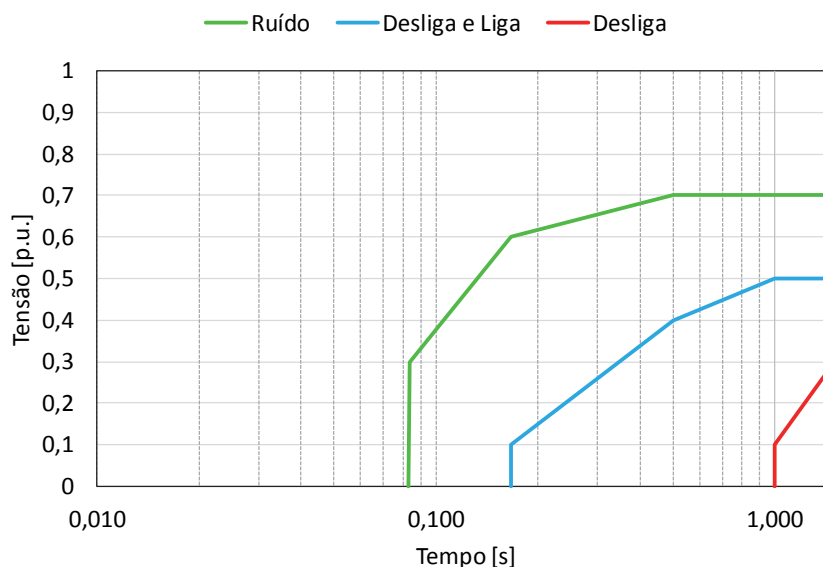


Figura 4.37 Limites de sensibilidades operacional de máquinas de lavar louças sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão

4.5.6 Condicionadores de Ar Split

A Tabela 4.13 é indicativa do resultado de desempenho obtido para os respectivos fenômenos identificados e representativos de afundamentos e interrupções temporários de tensão.

Tabela 4.13 Resultados obtidos para os ensaios de afundamentos e interrupções de tensão – condicionador de ar Split

DURAÇÃO	0,9 U _N	0,8 U _N	0,7 U _N	0,6 U _N	0,5 U _N	0,4 U _N	0,3 U _N	0,2 U _N	0,1 U _N	0,0 U _N
½ CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
1 CICLO	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN
2 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS
5 CICLOS	FN	FN	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS
10 CICLOS	FN	FN	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS	RS
30 CICLOS	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS	RS	DT	DT
60 CICLOS	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS	DT	DT	DT
90 CICLOS	FN	RS	RS	RS	RS	RS	RS	DT	DT	DT

À luz dos resultados obtidos, é possível delimitar as regiões de sensibilidade do equipamento, como indicado na Figura 4.38. Diferentemente dos outros equipamentos testados, o condicionador de

ar não sofreu desligamentos e religamento, anteriormente manifestados e representados pela curva correspondente. Para o presente caso houve ruídos e desligamentos, sem qualquer outro efeito meritório de destaque.

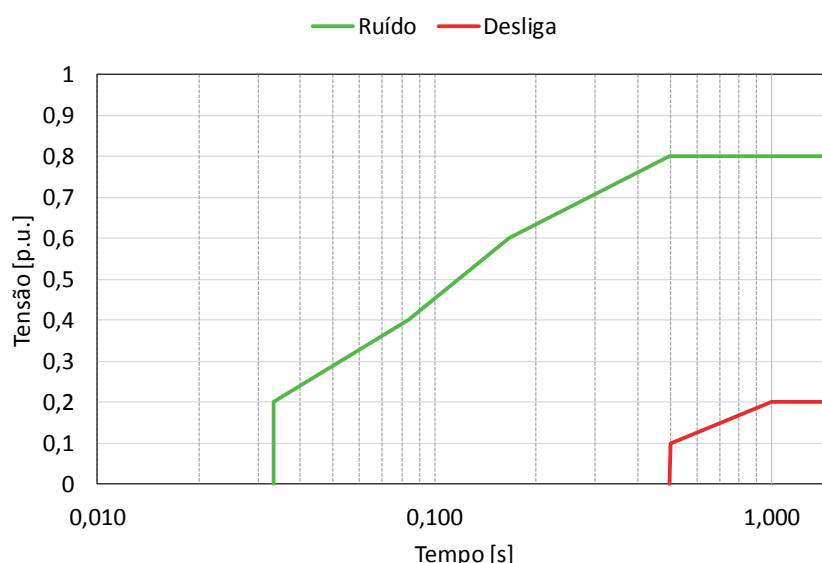


Figura 4.38 Limites de sensibilidades operacional de condicionadores de ar Split sob a ação de afundamentos e interrupções da tensão

4.6 Considerações finais

O presente capítulo sintetizou os procedimentos relacionados à obtenção de limites de suportabilidade dielétrica e de sensibilidade operacional às tensões para os equipamentos eletroeletrônicos contemplados nesta tese. Dentro deste escopo, as atividades desenvolvidas constituíram-se em ações voltadas, num primeiro momento, para o estabelecimento de uma metodologia empregada para obter limites de suportabilidade de tensão, os quais podem resultar em danos físicos para o produto, e, complementarmente, a caracterização dos limites inferiores admissíveis para as tensões de suprimento que garantam a normalidade operacional dos equipamentos.

Com vistas aos estudos relacionados com os limites de suportabilidade das tensões, este desempenho foi considerado na forma da composição de três regiões distintas, cada qual associada com fenômenos típicos manifestados nas redes elétricas. Uma primeira envolvendo maiores níveis de tensão, porém com pequenas durações, como é o caso das descargas atmosféricas. Uma segunda atrelada com fenômenos oscilatórios, acompanhados de tensões em proporções inferiores à primeira, todavia, com duração de tempo superior. Por fim, uma terceira região é estabelecida, desta feita destinada a avaliação do desempenho dos produtos diante de sobretensões típicas à 60 Hz.

Os procedimentos empregados para realização dos testes destinados a obter os limites de sensibilidade operacional, por sua vez, foram realizados em consonância com recursos e metodologia

esclarecidos no texto. Fundamentalmente, os ensaios foram conduzidos através de reduções pré-definidas para as tensões eficazes, por períodos de tempo pré-definidos, e avaliados os efeitos sobre a operação dos eletrodomésticos ensaiados. Os resultados assim obtidos permitiram o estabelecimento das curvas de sensibilidade, nos termos postos no capítulo.

Uma vez estabelecidas as metodologias e os meios experimentais para a concretização dos trabalhos, foram então realizados ensaios para os seis produtos considerados nesta pesquisa. Individualmente, estes foram submetidos a uma bateria de testes que levaram, por fim, aos seus respectivos limites de suportabilidade e sensibilidade.

Respeitadas as considerações já esclarecidas sobre a questão dos limites de suportabilidade quanto às descargas atmosféricas, chegou-se a um conjunto de indicativos, expressos nas formas matemática e gráfica, que passaram a oferecer um banco de dados com informações importantes ao processo de análise dos PIDs, conforme estabelecido como metas para esta tese. Dentro do possível, os resultados obtidos foram correlacionados com curvas similares advindas da literatura e, de modo geral, foi possível constatar que, para aquelas disponibilizadas, os desempenhos aqui obtidos e que servirão como balizadores aos processos da análise nonexo causal se mostraram mais conservadoras.

CAPÍTULO 5

TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

5.1 Considerações iniciais

Uma vez contemplados os aspectos relacionados com a obtenção dos limites de suportabilidade às tensões e correntes impostas aos equipamentos, visando melhor consubstanciar o processo sistematizado de análise dos PIDs, a presente tese, através deste capítulo, se reveste do objetivo de contribuir para a melhoria do processo avaliativo, quando da manifestação de fenômenos anômalos nas redes quando da incidência de descargas atmosféricas indiretas.

De fato, ao se considerar os efeitos atrelados com a ocorrência das descargas atmosféricas, há de se considerar que seus impactos sobre as unidades consumidoras e seus produtos podem ocorrer através de duas vias. Uma compreende a incidência e propagação direta sobre os condutores que suprem os consumidores, tema este já explorado em trabalhos anteriores e, outro, via fenômenos associados com induções eletromagnéticas proporcionados pelas descargas incidentes em pontos físicos localizados nas imediações das instalações e seus equipamentos.

Tomando por base este último foco, os desenvolvimentos realizados neste capítulo se apresentam imbuídos dos seguintes propósitos:

- Estabelecimento dos conceitos físicos associados com o tema;
- Apresentação e síntese das metodologias de cálculo para a determinação das tensões induzidas nas linhas aéreas;
- Definição da estratégia a ser empregada aos objetivos supra delineados;
- Análise comparativa dos resultados das solicitações dielétricas produzidas pelas metodologias.

À luz destes aspectos, quanto a questão das induções eletromagnéticas, são sintetizadas as principais formulações já existentes e aplicáveis à correlação entre a incidências das descargas atmosféricas indiretas e os fenômenos em pauta visando os estudos de PIDs nos termos contemplados nesta tese.

5.2 Fundamentação física sobre as descargas atmosféricas

Uma descarga atmosférica é um fenômeno impulsivo, que produz correntes elevadas causadas por uma descarga do campo elétrico associado às cargas e advindas da ruptura elétrica do ar [65]. Os efeitos destas em sistemas elétricos podem se manifestar através de quatro diferentes mecanismos, como ilustra a Figura 5.1

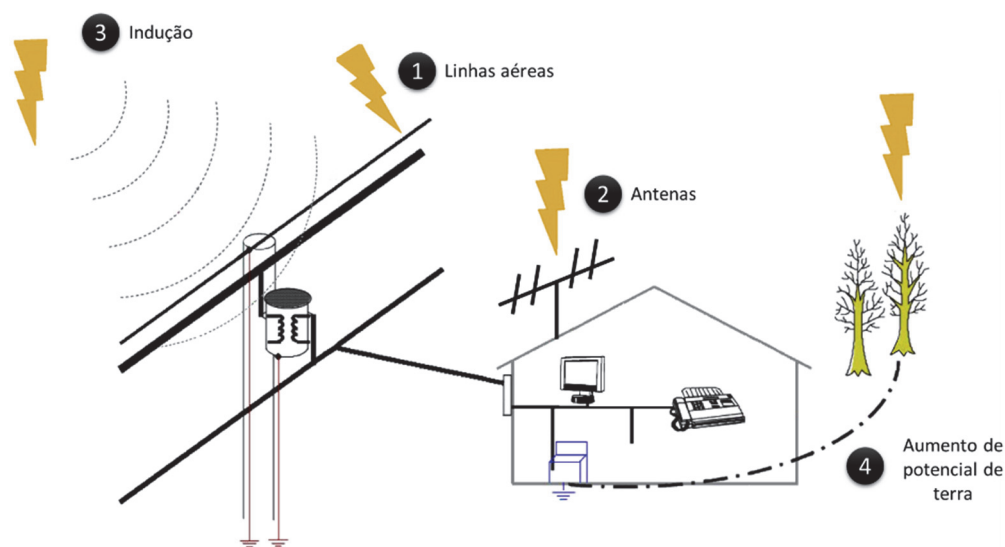


Figura 5.1 Mecanismos através dos quais as descargas atmosféricas podem atingir um consumidor

De fato, como indicado, as incidências podem ocorrer de acordo com:

- Incidência direta sobre a linha de transmissão e/ou distribuição;
- Incidência em antenas de telecomunicações ou pontos altos de atração, próximas ou na própria unidade consumidora;
- Propagação dos efeitos advindos de descargas via indução eletromagnética;
- Incidência em estruturas metálicas, árvores, cercas, etc. e propagada via terra.

A incidência direta é caracterizada pela injeção de uma corrente de elevada intensidade diretamente sobre os condutores fase ou neutro. As demais são conhecidas como incidências indiretas, visto que o fenômeno se manifesta através dos campos eletromagnéticos gerados pela corrente no canal de descarga.

Omitindo-se conceitos básicos associados com a formação das descargas, as etapas de formação deste fenômeno ocorrem como sintetizado a seguir:

- **Estrutura típica das cargas em uma nuvem**

A formação básica de distribuição de cargas dentro da nuvem consiste numa concentração de cargas negativas em seu centro e positivas no topo da nuvem.

- **Ruptura preliminar entre as regiões positivas e negativas**

Nesta etapa, ocorre a ruptura preliminar entre as regiões positivas e negativas na base da nuvem. Quando isto ocorre percebe-se pequenos efeitos luminosos devido o movimento inicial descendente de cargas negativas do centro da nuvem para o solo (neste caso, carregado positivamente).

- **Formação da descarga líder (“*Stepped Leader*”)**

Prosseguindo, a base da nuvem torna-se carregada negativamente e quando o gradiente elétrico da concentração de cargas excede a rigidez dielétrica do ar, dá-se a descarga atmosférica, a qual é caracterizada pelo movimento de cargas em direção à terra por um caminho tortuoso e em passos (líder passo a passo). A diferença de potencial existente entre a ponta do líder e o solo atinge valores que podem chegar a 100 milhões de volts, quando o mesmo se encontra algumas dezenas de metros acima do solo. O campo elétrico originado na ponta do líder é muito alto, criando condições para que saia um ou mais líderes ascendentes do solo, denominados líderes conectantes. O processo de conexão inicia-se quando os líderes conectantes encontra-se com o líder passo a passo.

- **Processo de conexão**

Os líderes conectantes ascendentes, buscam o caminho mais fácil para a formação de um canal de propagação de cargas para o solo, dessa forma, normalmente esses se formam a partir de árvores, prédios, torres ou até mesmo pessoas em locais abertos.

Quando os dois líderes se encontram, conectando o líder passo a passo ao potencial de terra, origina-se o início da etapa da corrente de retorno, que é a mais importante para os estudos elétricos.

- **Primeira corrente de retorno (“*Return Stroke*”)**

Nesta fase, uma onda ionizante descarrega o canal previamente carregado pelo líder passo a passo, essa etapa é chamada de corrente de retorno. Essa corrente costuma atingir valores de pico de cerca de 40 kA ao nível do solo, com um tempo de frente de onda de poucos microssegundos e tempo de meia-cauda em torno de 50 μ s. Adicionalmente, as altas temperaturas aliadas com um aumento abrupto de pressão, causa uma expansão do ar próximo ao canal de descarga, resultando uma onda sonora denominada trovão.

Devido à alta intensidade da corrente de retorno aliada com altas taxas de crescimento, essa etapa se constitui uma das mais importantes para cálculos de tensão induzida, visto que podem provocar variações de campo, induzindo elevados valores de tensão sobre os sistemas elétricos e equipamentos.

A descarga atmosférica pode terminar nesse ponto, mas em muitos casos a nuvem não descarrega totalmente, propiciando nova movimentação de cargas, e que utilizam o canal de descarga já ionizado para se transferirem para o solo.

- **Líder contínuo**

A etapa do líder contínuo é caracterizada pela movimentação de cargas através do canal previamente ionizado pela corrente de retorno, só que geralmente não possui ramificações.

Em alguns casos o processo pode acabar nesse ponto, porém o líder contínuo geralmente é seguido por correntes de retorno subsequentes ou se modificar para um novo líder passo a passo.

- **Corrente de retorno subsequente**

Essa corrente possui velocidade de propagação mais elevada, frente de onda mais rápida, pico em tempos menores e normalmente menores intensidades que as correntes de retorno [74] [94].

Ressalta-se, mais uma vez que o mecanismo descrito refere-se a descargas negativas, isto é, as cargas negativas da nuvem são canalizadas até a terra. O efeito é como se a corrente de retorno levasse até a nuvem as cargas positivas do solo, neutralizando as cargas negativas depositadas no canal pelo líder passo a passo.

5.3 Modelagem da Descarga Atmosférica – Teoria de Rusck

Na seção 1.3.6 desse trabalho apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos envolvendo o tema em discussão. Dentre esses, destaca-se a teoria de Sune Rusck [58], apresentada por 1958, cuja proposta foi alvo, nos últimos anos, a vários questionamentos e contraprovas. No entanto, em decorrência de várias outras investigações, a exemplo de [65] [67] [68] [95], estudos complementares acabaram por constatar que os princípios estabelecidos por Sune Rusck, efetivamente, se mostraram mais apropriados aos fins aqui postos. Diante disto, a opção feita por esta pesquisa recaiu sobre o emprego desta estratégia de modelagem para os estudos subsequentes.

Em consonância com os fundamentos estabelecidos, adota-se como ponto de partida a modelagem da corrente de retorno imposta pela descarga atmosférica no momento da incidência e, a partir deste princípio, procede-se ao cálculo do potencial escalar induzido em uma linha polifásica. Vale destacar que o procedimento está alicerçado em duas componentes associadas com o potencial escalar manifestado nas linhas. Uma primeira corresponde ao resultado das cargas previamente existente no canal de descarga e, uma segunda, atrelada com as cargas induzidas na linha durante a etapa em que se manifesta o “líder passo a passo” (etapa da descarga atmosférica anterior a formação da corrente de retorno).

Quando da elaboração de sua teoria, Rusck valeu-se de um sistema de três condutores, posicionados horizontalmente, a certa altura acima do nível do solo, representando uma linha de transmissão trifásica, e um canal de descarga por onde flui a corrente de retorno no sentido do solo para a nuvem.

Visando simplificar o estudo, foram realizadas considerações pontuais, as quais não impactaram significativamente nos resultados esperados. Algumas delas são listadas a seguir [58] [96] [70] [97].

- A descarga incide perpendicularmente ao solo, ou seja, através de um canal de descarga retilíneo e vertical na direção do eixo z do plano cartesiano. Apesar de possuir ramificações, essas não são levadas em consideração nos estudos;
- Apesar da distribuição das cargas elétricas no canal de descarga não ser uniforme, devido à variação da capacitância de acordo com a proximidade do solo, em altitudes menos elevadas (algumas centenas de metros), elas variam pouco, fato este determinante para a adoção de uma distribuição uniforme de cargas pelo canal de descarga;
- O modelo considera o canal inicialmente carregado com uma carga negativa distribuída uniformemente, a qual é anulada por uma corrente em forma de degrau positivo;
- Como consequência das premissas anteriores, a forma de onda da corrente de retorno é considerada do tipo “degrau” que se propaga ao longo do canal;
- O canal comporta-se como uma rota de condução ideal, que não inclui qualquer tipo de atenuação;
- Outra hipótese utilizada encontra-se balizada no fato que o solo é tratado como um condutor ideal. Desse modo, a resistividade só começa a ser significativa para distâncias elevadas entre o canal de descarga e a linha de transmissão, permitindo assim o emprego do método das imagens para o cálculo dos campos eletromagnéticos envolvido;
- Por fim, a linha de transmissão ou distribuição na região circunvizinha ao do ponto de incidência e que será alvo das tensões induzidas, é admitida como infinita e sem descontinuidades.

Diante dessas considerações, num primeiro momento, a propagação do “líder passo a passo”, se dá com uma velocidade insuficiente para provocar uma taxa de variação do campo no tempo e, por conseguinte, provocar tensões induzidas em proporções significativas [58] [63]. Na sequência, quanto da consideração da “corrente de retorno”, tal etapa se apresenta com taxas de variação no tempo capazes de produzir tensões induzidas com amplitudes significativas nas linhas de transmissão ou distribuição próximas ao do ponto de incidência. Esse campo pode ser expresso em função do potencial escalar V_i e do potencial vetor \vec{A}_i , de acordo com a equação 5.1.

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{ei} + \vec{E}_{mi} = -\nabla V_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (5.1)$$

Onde:

\vec{E}_i : Campo elétrico no solo, perpendicular à superfície, associado ao canal da descarga atmosférica;

\vec{E}_{ei} : Componente eletrostática do campo elétrico;

\vec{E}_{mi} : Componente magnética do campo elétrico;

V_i : Potencial Escalar criado pelas cargas do canal de descarga;

\vec{A}_i : Potencial Vetor magnético criado pela corrente que circula pelo canal de descarga.

Para a determinação das componentes eletrostática (\vec{E}_{ei}) e magnéticas (\vec{E}_{mi}) do campo elétrico associado ao canal da descarga atmosférica, bem como todas as hipóteses admitidas para os cálculos, a Figura 5.2 apresenta uma visão física do arranjo do que foi anteriormente exposto.

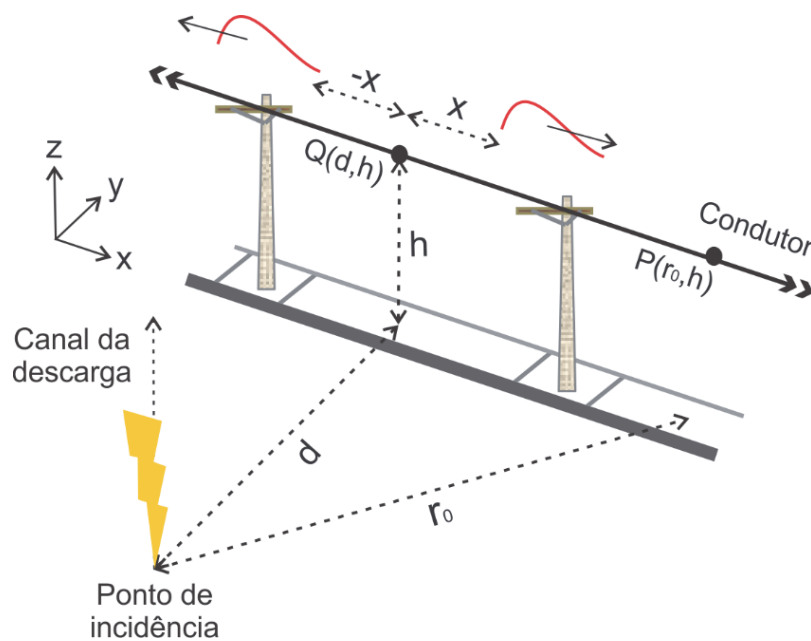


Figura 5.2 Posição geométrica do ponto de incidência com relação a rede elétrica

Na figura anterior:

$P(r_0, h)$: Ponto da linha para o qual será determinada a tensão induzida;

$Q(d, h)$: Ponto da linha mais próximo ao local de incidência da descarga;

x : Distância entre os pontos $P(r_0, h)$ e $Q(d, h)$, no sentido positivo da coordenada x ;

d : Distância entre a linha e o ponto físico de incidência da descarga;

r_0 : Distância entre o ponto $P(r_0, h)$ e o de incidência, no plano xy ;

h : Altura da rede elétrica, em relação ao solo, na direção do eixo z .

Tendo em mente as hipóteses postas, o canal estará carregado negativamente de modo uniforme e, após um intervalo de tempo, essas cargas são neutralizadas pela corrente I_0 , que representa a amplitude da corrente degrau. Portanto, sendo v a velocidade de propagação da corrente I_0 , a seguinte relação pode ser estabelecida entre a corrente e as cargas envolvidas no canal:

$$I_0 = \frac{dq}{dt} = q_0 \cdot \frac{ds}{dt} = q_0 \cdot v \quad (5.2)$$

Definindo b como a relação entre a velocidade de propagação no canal e a velocidade da luz no vácuo (c), tem-se:

$$v = b \cdot c \quad (5.3)$$

Manipulando as equações anteriores, tem-se:

$$I_0 = q_0 \cdot b \cdot c \quad (5.4)$$

Neste ponto é interessante ressaltar, para fins práticos, que pode-se contar com informações advindas de *softwares* do tipo GIS, a exemplo do denominado por NetRaios 2.0 [98]. Este corresponde a uma plataforma georeferenciada que utiliza dados de descargas atmosféricas obtidos em tempo real da Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosférica – BrasilDat [99].

5.3.1 Componente Eletrostática

Em virtude da simetria radial existente na Figura 5.2, a parcela do campo elétrico total associada a distribuição de cargas no canal é dada pela equação 5.5.

$$\vec{E}_{ei} = -\nabla V_i = -\nabla_z V_i - \nabla_{r_0} V_i = \vec{E}_{ei_v} + \vec{E}_{ei_h} \quad (5.5)$$

As componentes \vec{E}_{ei_v} e \vec{E}_{ei_h} são as parcelas do campo elétrico paralelas aos planos vertical e horizontal, respectivamente, as quais serão consideradas na sequência.

- **Componente vertical**

A componente vertical da parcela eletrostática do campo elétrico total (\vec{E}_{ei_v}) pode ser obtida a partir da equação:

$$\vec{E}_{ei_v} = -\nabla_z V_i = -\frac{\partial V_i}{\partial z} \vec{z} \quad (5.6)$$

Reportando à Figura 5.2 e com o auxílio do método das imagens, sabendo que q_0 é a densidade linear de cargas do líder, pode-se definir o potencial escalar no ponto (r_0, z) devido às cargas do canal como:

$$V_{i(r_0, z, t)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{-hn}^{+hn} \frac{q_0(s(t) - \frac{r}{c})}{r} ds \quad (5.7)$$

Onde:

$s(t)$: Altura do canal correspondente à posição da frente de onda da corrente I_0 no instante t .

$$r = \sqrt{(s - h)^2 + r_0^2} \quad (5.8)$$

A equação 5.8 fornece a distância do elemento ds do canal ao ponto x da linha, na Figura 5.2.

Ressalta-se que os desenvolvimentos matemáticos mais detalhados sobre a matéria aqui explorada podem ser encontrados em [58] [69] e serão, por tal motivo, aqui omitidos.

Por fim, a equação 5.9 permite a determinação da parcela vertical do campo elétrico para $t \geq t_{0z}$.

$$\vec{E}_{ei_v} = \frac{Z_0 \cdot I_0}{b} \left[\frac{1}{\sqrt{(b \cdot c \cdot t - h)^2 + r_0^2(1 - b^2)}} + \frac{1}{\sqrt{(b \cdot c \cdot t + h)^2 + r_0^2(1 - b^2)}} - \frac{1}{\sqrt{(hn - h)^2 + r_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{(hn + h)^2 + r_0^2}} \right] \quad (5.9)$$

Onde:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (5.10)$$

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30 \Omega \quad (5.11)$$

$$t_{0z} = \frac{\sqrt{r_0^2 + h^2}}{c} \quad (5.12)$$

As figuras na sequência indicam o comportamento do campo elétrico vertical (\vec{E}_{ei_v}) em função do tempo, para duas situações distintas. Uma primeira relacionada com a influência da distância entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição e, uma segunda, envolvendo a variação do valor da amplitude da corrente de descarga mantendo o valor da distância fixa. Para essas situações, foram adotados alguns valores típicos para variáveis presentes nas equações postas, a saber:

o comprimento do canal da descarga hn possui valor de 3 km; a altura da rede de distribuição h possui 12 metros; a razão entre a velocidade de propagação da descarga com a velocidade da luz no vácuo b é de 0,3 e; por fim, a distância no eixo x é considerada como zero.

A Figura 5.3, representa os valores do campo elétrico vertical (\vec{E}_{ei_v}) para a primeira situação, para a amplitude da corrente de retorno de 40 kA. As distâncias envolvidas estão indicadas na legenda da figura.

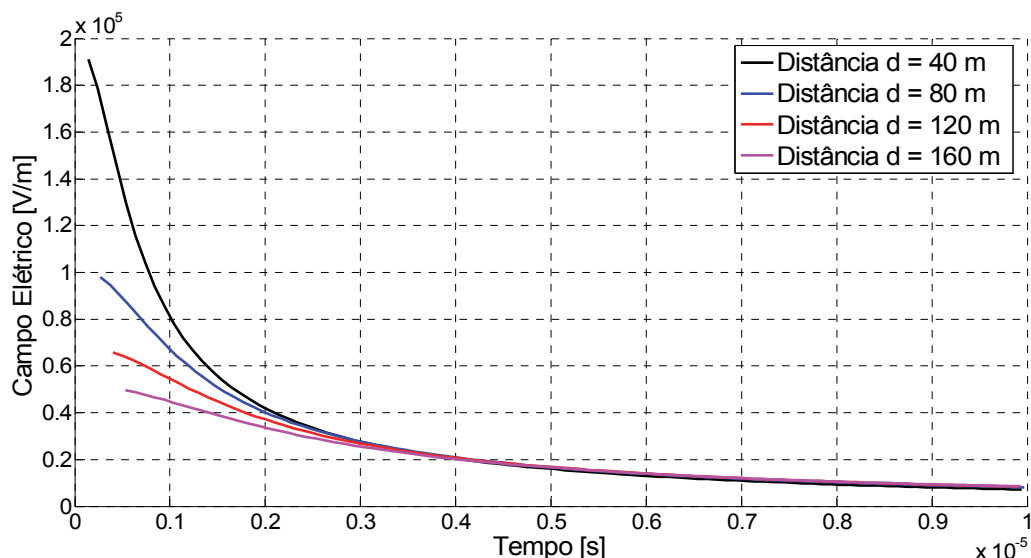


Figura 5.3 Variação do campo elétrico vertical (\vec{E}_{ei_v}) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição

Já a Figura 5.4 representa o campo elétrico vertical nas condições impostas pela segunda situação, onde foi fixada uma distância de 50 metros entre a linha de distribuição e o ponto de incidência da descarga. Os valores das amplitudes das correntes foram variados e são indicados na legenda da própria figura.

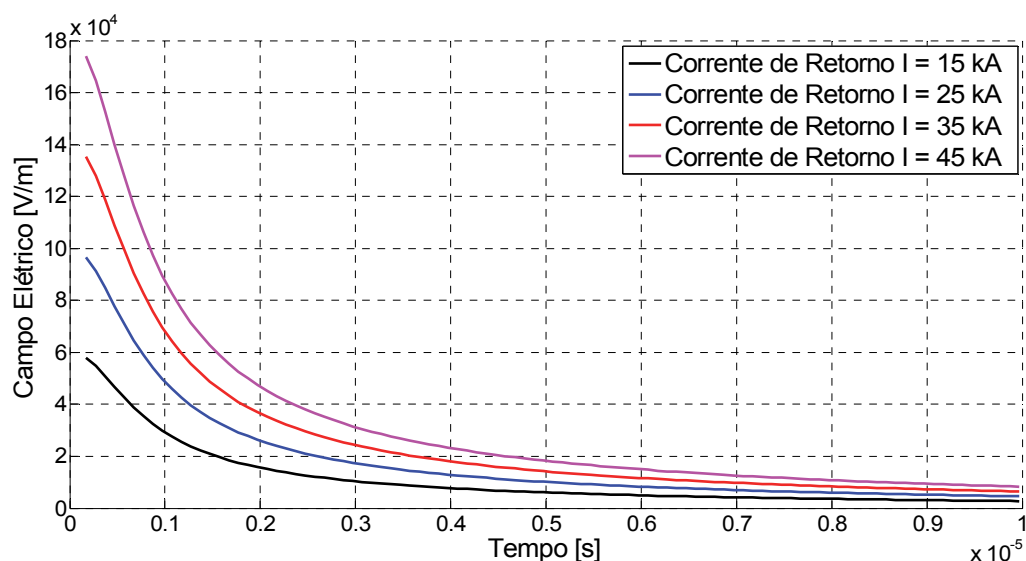


Figura 5.4 Variação do campo elétrico vertical (\vec{E}_{ei_v}) para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição

Os resultados indicam que, como esperado, quanto maior a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha para a qual se deseja determinar a tensão induzida, o efeito se torna menos pronunciado. Todavia, no que tange ao campo elétrico vertical, este é diretamente proporcional ao aumento da amplitude de corrente de retorno.

- **Componente horizontal**

A componente horizontal da parcela eletrostática do campo elétrico total (\vec{E}_{ei_h}) é obtida tomando-se o gradiente do potencial escalar V_i na direção radial:

$$\vec{E}_{ei_h} = -\nabla_{r_0} V_i = -\frac{\partial V_i}{\partial r_0} \vec{r}_0 \quad (5.13)$$

Por sua vez, \vec{E}_{ei_h} pode ser decomposta nas parcelas $\vec{E}_{ei_h} x$ e $\vec{E}_{ei_h} d$. A componente $\vec{E}_{ei_h} d$, por ser perpendicular ao plano vertical no qual está contida a linha, não induz nenhuma tensão em relação ao solo. Em assim sendo, apenas a componente na direção axial do condutor da linha aérea ($\vec{E}_{ei_h} x$), provoca diferença de potencial entre os pontos da mesma.

A equação 5.14 estabelece as relações trigonométricas necessárias para decomposição do campo na direção axial.

$$\vec{E}_{ei_h} x = E_{ei_h} x \cdot \cos \alpha \vec{x} = -\frac{\partial V_i}{\partial r_0} \cdot \frac{x}{r_0} \vec{x} \quad (5.14)$$

Partindo da equação 5.7 e lembrando que o potencial escalar devido à aplicação do método da imagem é obtido substituindo-se os sinais de h e q_0 , obtém-se:

$$\vec{E}_{ei_h} x = \frac{Z_0 \cdot I_0 \cdot x}{b} \cdot (\Psi + \Psi' + \Gamma + \Gamma') \quad (5.15)$$

Onde:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{(hn - h)^2 + r_0^2} \cdot [hn - h + \sqrt{(hn - h)^2 + r_0^2}]} \quad (5.16)$$

$$\Gamma = \frac{-(1 - b^2)}{\sqrt{r_0^2(1 - b^2) + (b \cdot c \cdot t - h)^2}} \cdot \left[\frac{1}{b \cdot c \cdot t - h + \sqrt{r_0^2(1 - b^2) + (b \cdot c \cdot t - h)^2}} \right] \quad (5.17)$$

$$\Psi' = -\Psi|_{h \rightarrow -h} \quad (5.18)$$

$$\Gamma' = -\Gamma|_{h \rightarrow -h} \quad (5.19)$$

Conforme descrito para a componente vertical, a parcela horizontal também sofre influências em seu valor para as diferentes situações aplicadas anteriormente. Isto pode ser ratificado através da Figura 5.5, a qual ilustra os valores do campo elétrico horizontal na direção axial ($\vec{E}_{ei_h}x$) para a primeira situação, para a qual o valor da amplitude da corrente já foi estabelecido anteriormente. Quanto às distâncias envolvidas, estas estão indicadas na legenda da figura.

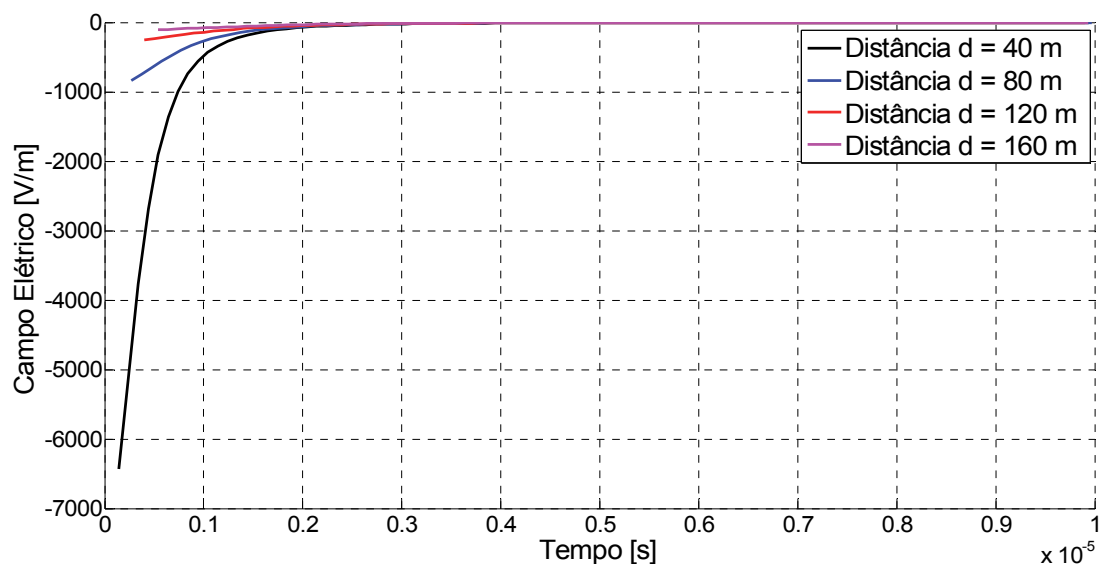


Figura 5.5 Variação do campo elétrico horizontal na direção axial ($\vec{E}_{ei_h}x$) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição

A Figura 5.6 é indicativa da parcela axial do campo elétrico horizontal, para as condições impostas pela segunda situação. Vale destacar que foi fixada uma distância de 50 metros entre a linha de distribuição e o ponto de incidência da descarga. Os valores das amplitudes das correntes foram variados de acordo com a indicação feita na própria figura.

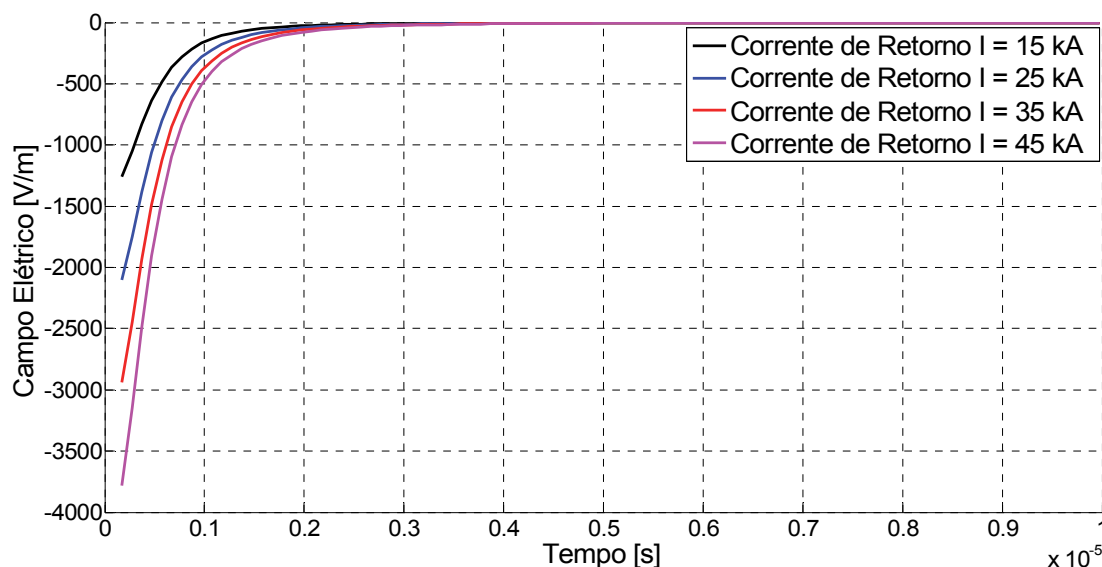


Figura 5.6 Variação do campo elétrico horizontal na direção axial ($\vec{E}_{ei_h}x$) para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição

Por fim, ressalta-se que, além de apresentar valores negativos para o campo elétrico horizontal na direção axial, esses são, ainda, bem inferiores quando comparados com as componentes verticais já consideradas.

5.3.2 Componente Magnética

A equação 5.20 representa uma parcela do campo elétrico total, referente à corrente no canal:

$$\vec{E}_{mi} = -\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (5.20)$$

A parcela do campo elétrico \vec{E}_{mi} está orientado verticalmente, (na direção do eixo z) pois o canal da descarga foi assumido como perpendicular ao plano horizontal e sem ramificações. Dessa forma, o potencial vetor no ponto (r_0, z) , originado pela corrente do canal, pode ser escrito como:

$$Ai'_{(r_0, z, t)} = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{4\pi} \left\{ \ln \left[b \cdot c \cdot t - h + \sqrt{(b \cdot c \cdot t - h)^2 + r_0^2(1 - b^2)} \right] - \ln(1 + b) - \ln \left(-h + \sqrt{r_0^2 + h^2} \right) \right\} \quad (5.21)$$

Derivando $Ai'_{(r_0, z, t)}$ em relação ao tempo, obtém-se para $t \geq t_{0z}$:

$$\frac{\partial Ai'_{(r_0, z, t)}}{\partial t} = \frac{\mu_0 \cdot I_0 \cdot b \cdot c}{4\pi} \frac{1}{\sqrt{(b \cdot c \cdot t - h)^2 + r_0^2(1 - b^2)}} \quad (5.22)$$

A derivada em relação ao tempo do potencial vetor devido à corrente negativa é obtida a partir da equação 5.21, invertendo o sinal de h , assim:

$$\vec{E}_{mi(r_0, z, t)} = \vec{E}_{mi(r_0, z, t)} \cdot \vec{z} = - \left(\frac{\partial Ai'_{(r_0, z, t)}}{\partial t} + \frac{\partial Ai''_{(r_0, z, t)}}{\partial t} \right) \cdot \vec{z} \quad (5.23)$$

Realizada as devidas substituições e simplificações, a expressão final para a parcela do campo elétrico na direção vertical (eixo z) corresponde a 5.24.

$$\vec{E}_{mi} = -\frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} = -Z_0 \cdot I_0 \cdot b \left(\frac{1}{\sqrt{(b \cdot c \cdot t - h)^2 + r_0^2(1 - b^2)}} + \frac{1}{\sqrt{(b \cdot c \cdot t + h)^2 + r_0^2(1 - b^2)}} \right) \quad (5.24)$$

A Figura 5.7 mostra o resultado do campo elétrico parcial em função do tempo, tomando como parâmetro variável a primeira situação discutida anteriormente, ou seja, variação da distância d , mantendo as demais variáveis com os mesmos valores já declarados.

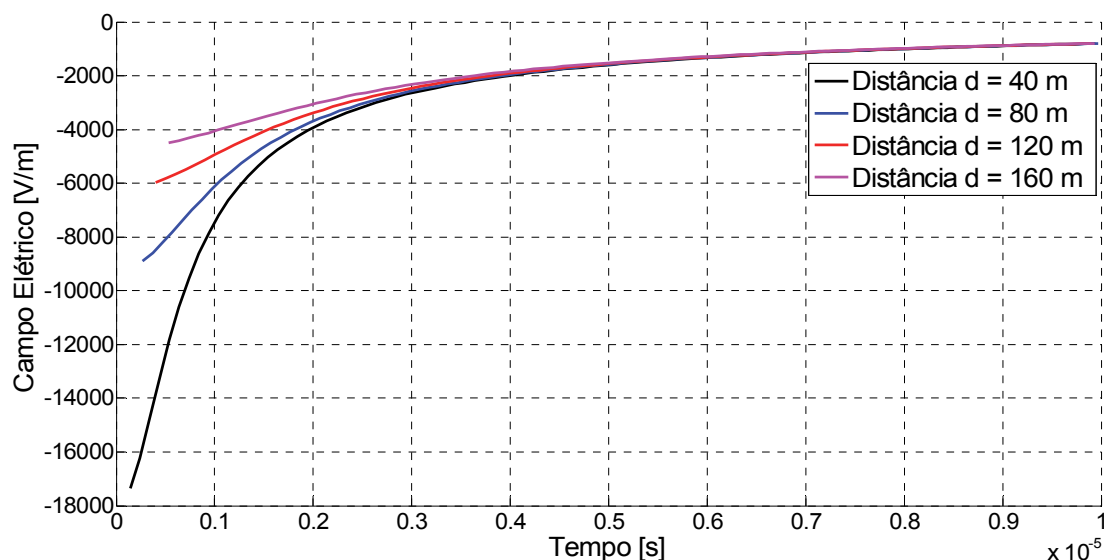


Figura 5.7 Variação do campo elétrico (\vec{E}_{mi}) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição

Considerando a segunda situação para o campo elétrico, a Figura 5.8 é indicativa do comportamento desta grandeza, em função do tempo, para diferentes valores de amplitudes de correntes.

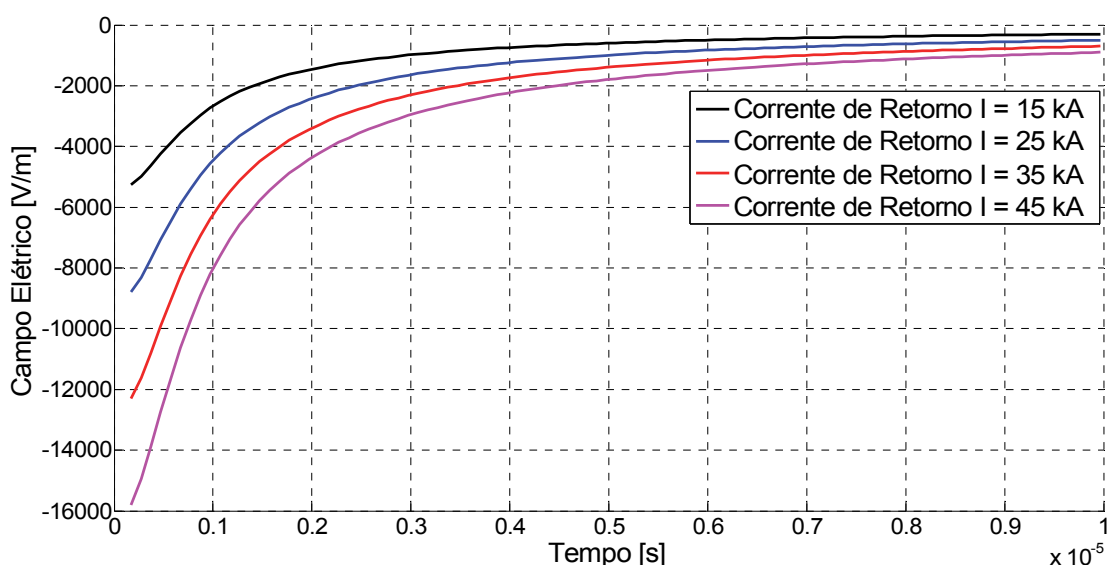


Figura 5.8 Variação do campo elétrico (\vec{E}_{mi}) para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição

De maneira semelhante aos resultados anteriores, a influência da distância d no campo elétrico é mais pronunciada nos instantes iniciais. Já quando analisada a influência da amplitude da corrente de descarga, essa se apresenta diretamente proporcional, distinguindo os valores para maiores valores de tempo de análise, conforme apresentado na Figura 5.8.

5.3.3 Campo Elétrico Total

O campo elétrico total, interessa de forma mais direta, os objetivos aqui delineados quanto a determinação das tensões induzidas nas linhas de distribuição circunvizinhas. O resultado deste efeito conjunto se encontra sintetizado na equação 5.25, para $t \geq t_{0z}$:

$$\vec{E}_i = (\vec{E}_{ei_v} + \vec{E}_{mi}) \cdot \vec{z} + (\vec{E}_{ei_h}) \cdot \vec{x} \quad (5.25)$$

Tendo em vista que a componente vertical do campo elétrico (\vec{E}_{ei_v}) é muito maior que a componente horizontal na direção axial ($\vec{E}_{ei_h}x$), isto resulta em, para alturas padrões de linhas de distribuição inferiores a 15 metros, a componente $\vec{E}_{ei_h}x$ pode ser desprezada. Isto conduz a equação 5.26.

$$\vec{E}_i = \vec{E}_i \cdot \vec{z} = (\vec{E}_{ei_v} + \vec{E}_{mi}) \cdot \vec{z} \quad (5.26)$$

As Figura 5.9 e Figura 5.10 permitem constatar a influência de cada componente da equação 5.26 para o processo final. É evidente que a parcela eletrostática do campo elétrico é bem mais pronunciada do que a magnética para ambas as situações apresentadas.

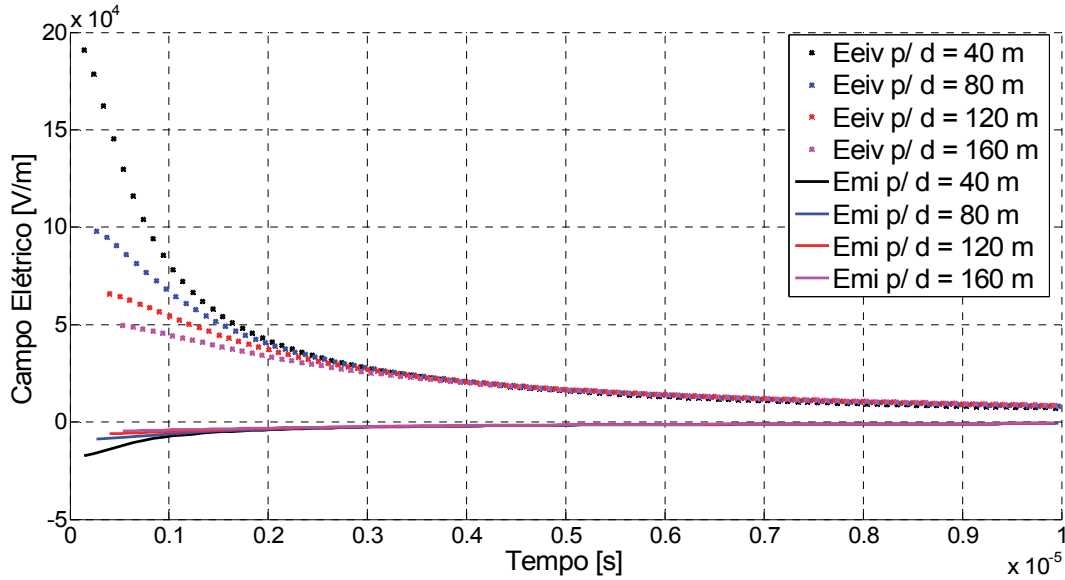


Figura 5.9 Componentes eletrostáticas (\vec{E}_{ei_v}) e magnéticas (\vec{E}_{mi}) do campo elétrico (\vec{E}_i) para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição

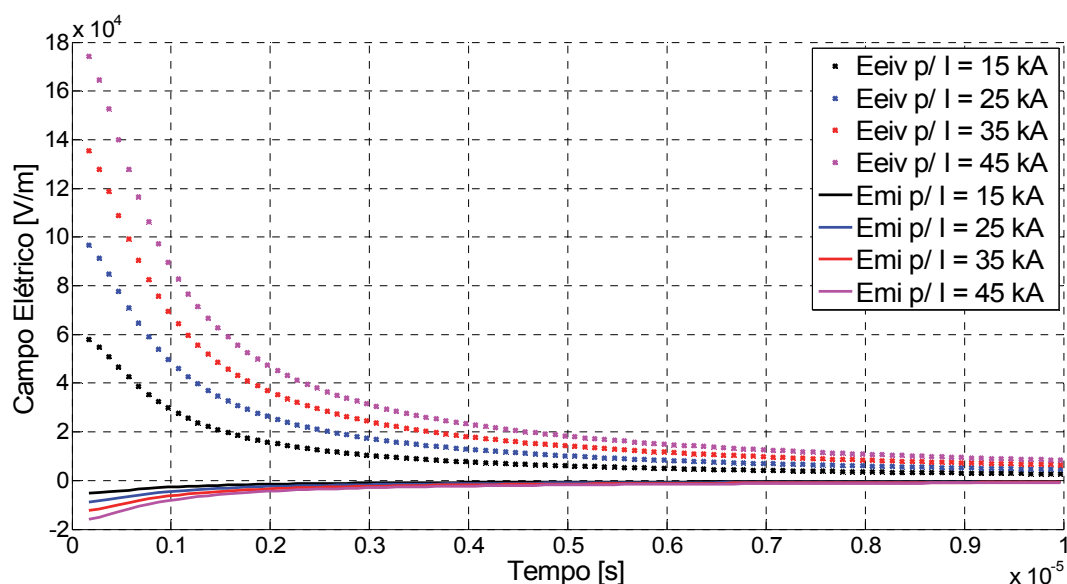


Figura 5.10 Componentes eletrostáticas (\vec{E}_{eiv}) e magnéticas (\vec{E}_{mi}) do campo elétrico (\vec{E}_i) para diferentes amplitudes da corrente para a descarga atmosférica incidindo a 50 metros da rede de distribuição

Por fim, as Figura 5.11 e Figura 5.12 ilustra o comportamento resultante para o campo elétrico total, originado pela soma das duas parcelas mostradas nas figuras anteriores.

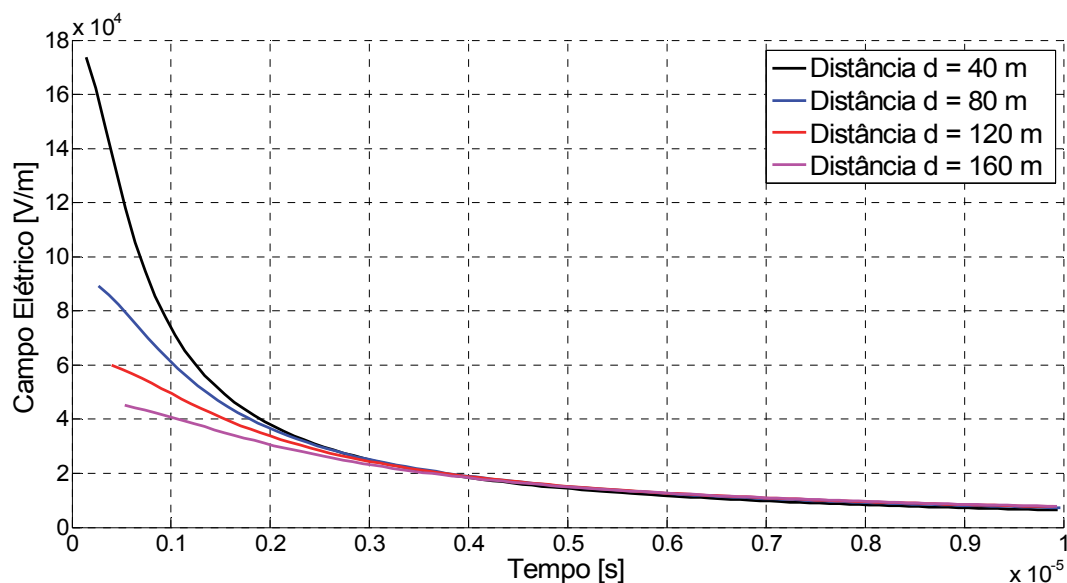


Figura 5.11 Campo elétrico (\vec{E}_i) total para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição

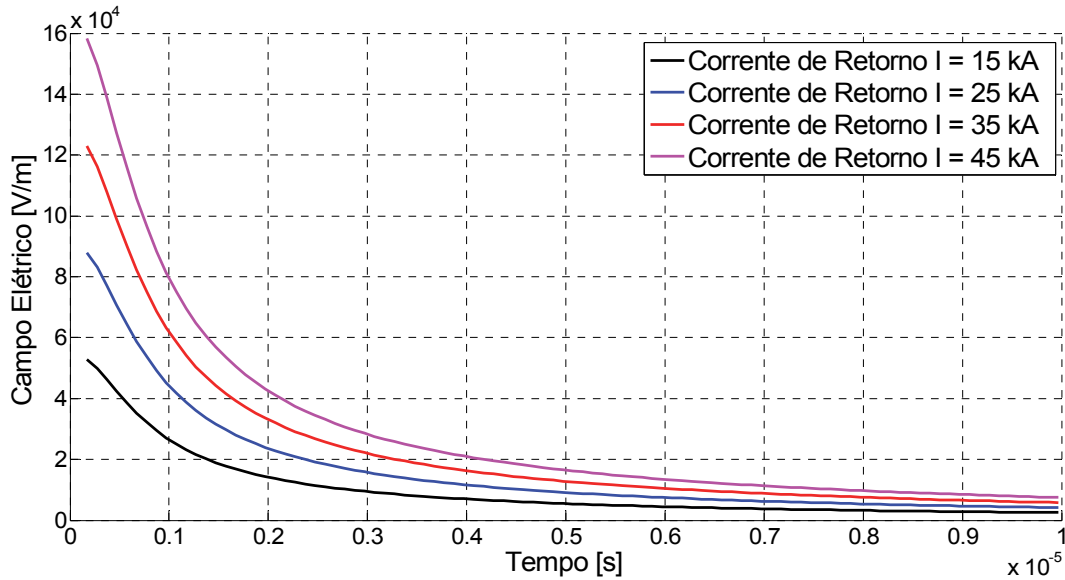


Figura 5.12 Campo elétrico (\vec{E}_i) total para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição

5.3.4 Tensão Induzida para Corrente Degrau

Dentre as hipóteses simplificadoras adotadas por Sune Rusck, uma delas admite que a corrente de retorno é assumida com degrau de amplitude I_0 . Diante disso, a tensão induzida na rede de distribuição é obtida integrando-se o campo elétrico vertical total (\vec{E}_z) do solo até a altura do condutor da rede.

$$U = - \int_0^h \vec{E}_z \cdot d\vec{z} \quad (5.27)$$

O campo elétrico associado com a corrente de retorno, como se sabe, possui duas componentes. Uma primeira devido à corrente e as cargas no canal, e, uma segunda, associada com as cargas eletrostáticas presentes na linha. Nestes termos:

$$U = \left(- \int_0^h \vec{E}_i \cdot d\vec{z} \right) - (k) \cdot (q) \cdot \quad (5.28)$$

Onde:

$$\vec{E}_i = -\nabla V_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (5.29)$$

Para o caso de uma linha aérea em paralelo com o plano x , lembrando que esta é, via de regra, constituída pelos condutores a , b e c , segue que as distâncias identificadas por y_a , y_b e y_c representam

a geometria entre a linha e o início do eixo x e, as alturas dos condutores a partir do solo são caracterizadas por h_a , h_b , e h_c . Nestes condutores, as correntes I_a , I_b e I_c , as cargas q_a , q_b e q_c e os potenciais escalares V_a , V_b e V_c são induzidos partindo-se do pressuposto que a distribuição de cargas e a corrente no canal não são afetadas por estas variáveis. Assim sendo, o potencial escalar na superfície de um condutor pode ser escrito utilizando a notação clássica matricial a seguir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{eia} \\ V_{eib} \\ V_{eic} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ab} & K_{ac} \\ K_{ba} & K_{bb} & K_{bc} \\ K_{ca} & K_{cb} & K_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Onde:

$$K_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2h_i}{r_{ci}} \quad (5.31)$$

$$K_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{d'_{ij}}{d_{ij}}, \quad i \neq j \quad (5.32)$$

V_a : Potencial escalar total na superfície do condutor a ;

V_{eia} : Potencial escalar devido à corrente no canal, na superfície do condutor a ;

q_a : Cargas elétricas induzidas no condutor da fase a da linha por unidade de comprimento;

h_i : Altura do condutor i ;

r_{ci} : Raio do condutor i ;

d_{ij} : Distância entre os condutores i e j ;

d'_{ij} : Distância entre o condutor i e a imagem do condutor j .

Substituindo as equações 5.29 e 5.30 em 5.28, a tensão induzida por ser escrita como:

$$U = \int_0^h \left(\nabla V_i + \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \right) \cdot d\vec{z} + (V - V_{ei}) \cdot \quad (5.33)$$

Sendo:

$$V_{ei} = h \cdot \nabla V_i \quad (5.34)$$

$$U = V + h \cdot \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (5.35)$$

Sabendo-se que o potencial escalar possui contribuições em dois sentidos da linha, ou seja, no sentido positivo e negativo do eixo x , isto determina que a tensão induzida também possui contribuições nesses dois sentidos, conforme Figura 5.2.

Dentro destas premissas a tensão induzida se apresenta constituída por duas componentes, como a seguir:

$$U = U_{1(x)} + U_{2(-x)} \quad (5.36)$$

Onde:

$$U_{1(x)} = V_1(+x) + \frac{1}{2}h \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (5.37)$$

$$U_{2(-x)} = V_1(-x) + \frac{1}{2}h \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (5.38)$$

Finalmente, após a substituição e rearranjos matemáticos, chega-se a expressão algébrica para o cálculo de uma das componentes ou parcela da tensão induzida U_l , dada pela equação 5.39 [58] [69]:

$$U_1 = Z_0 \cdot I_0 \cdot h \frac{v}{c} \frac{ct - x}{y^2 + (v/c)^2 (ct - x)^2} \left[1 + \frac{x + (v/c)^2 (ct - x)}{\sqrt{((v/c)^2 (ct)^2 + (1 - (v/c)^2)(x^2 + y^2))}} \right] \quad (5.39)$$

No que tange a outra parcela de tensão induzida, aqui denominada por U_2 , esta é obtida meramente substituindo x por $-x$ na Equação 5.39.

Para a relação da velocidade da corrente de retorno e a da luz no vácuo (v/c) utiliza-se da equação 5.40.

$$v/c = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{500}{I_0}}} \quad (5.40)$$

Os desenvolvimentos anteriores permitem obter o maior valor para a tensão induzida na linha, o que ocorre para o ponto mais próximo da descarga ($x=0$). Esta é:

$$U_{máx} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{2}} (v/c) \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} (v/c)^2}} \right) \right] \quad (5.41)$$

Resumindo, fica, pois, esclarecido que as formulações representadas pelas equações de número 5.1 a 5.41 fornecem, pois, as bases para o cálculo da amplitude da tensão induzida, quando da incidência de uma descarga atmosférica em qualquer ponto de uma linha de transmissão.

Considerando os mesmos parâmetros de linha já empregados quando dos cálculos dos campos elétricos, feitos na seção anterior, procede-se, na sequência, a determinação das tensões induzidas quando da incidência de distintas descargas atmosféricas indiretas.

A Figura 5.13 é indicativa dos valores de tensões induzidas para um valor fixo de corrente de retorno, variando-se, todavia, as distâncias envolvidas.

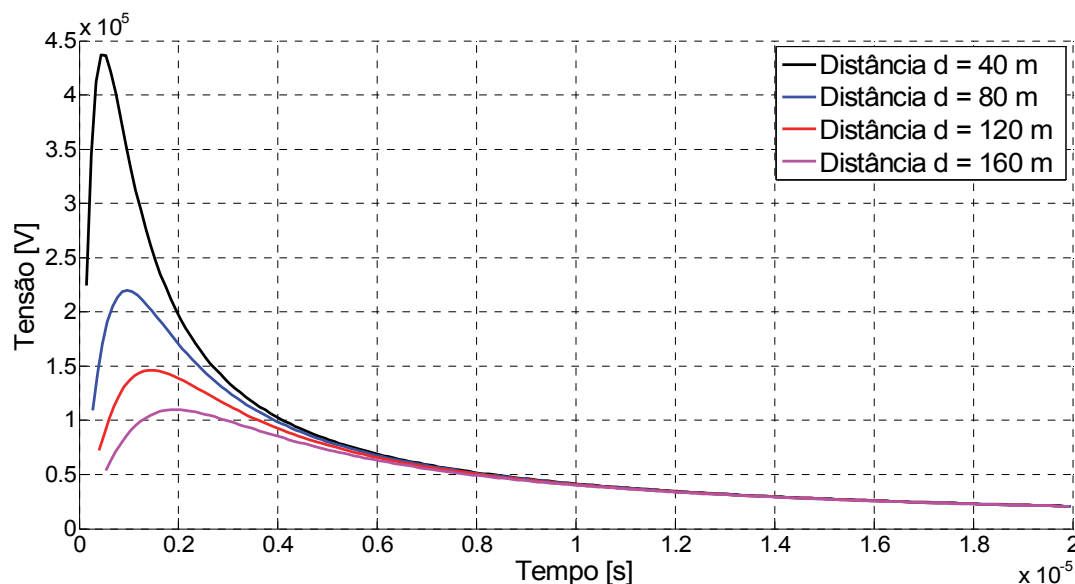


Figura 5.13 Tensão Induzida total para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição – corrente degrau

Para distâncias fixas e diferentes magnitudes das correntes impactantes, a Figura 5.14, de modo similar, expressa as tensões induzidas.

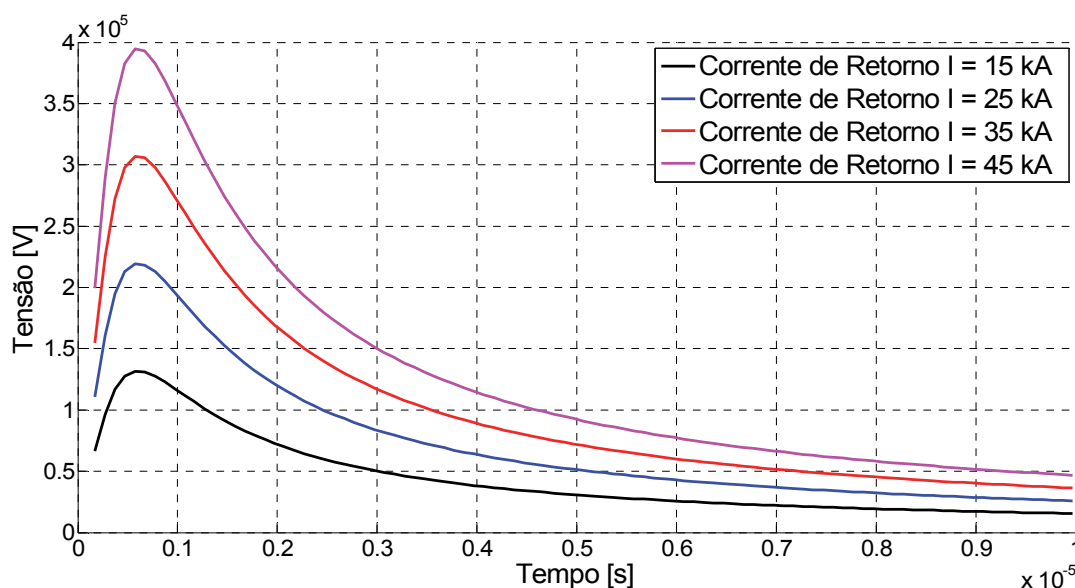


Figura 5.14 Tensão induzida total para diferentes amplitudes das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição – corrente degrau

5.3.5 Tensão Induzida para Corrente em Rampa

Medições realizadas em diversas partes do mundo evidenciaram que a forma da corrente mais adequada para a representação das descargas atmosféricas se apresente na forma de rampas, como indicado na Figura 5.15.

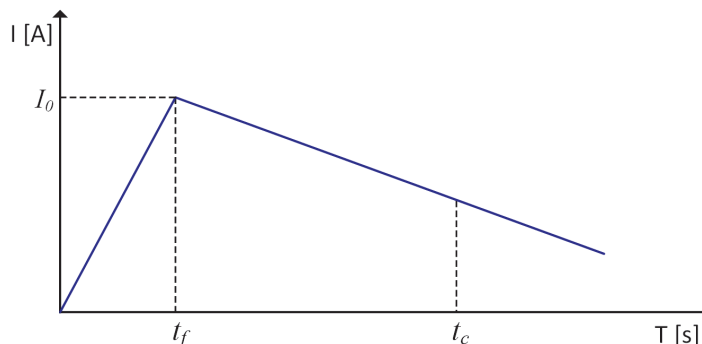


Figura 5.15 Forma de onda da corrente do tipo rampa

Para esta forma de onda, é evidente que sua caracterização se apresenta através das grandezas: tempo de frente, máxima intensidade de corrente e tempo de meia cauda.

A equação 5.42 descreve o comportamento para as respectivas rampas de subida e descida.

$$i(t) = \frac{I_0}{t_f} \cdot t \cdot u(t) - \left[\frac{(2t_c - t_f) \cdot I_0}{(t_c - t_f) \cdot 2t_f} \right] \cdot u(t - t_f) \quad (5.42)$$

Considerando a linearidade do processo, é possível empregar-se a integral de Duhamel [15] para os estudos de desempenho do fenômeno da indução através de uma série sucessiva de degraus. Assim procedendo, a tensão induzida em um ponto x qualquer da linha de distribuição pode ser, então, obtida pela composição das contribuições individuais de cada componente de corrente discretizada.

Empregando os conceitos de Duhamel nas equações desenvolvidas por Rusck, apresentadas na seção anterior, é possível obter uma expressão analítica para a tensão induzida para a onda de corrente na forma de rampa através de:

$$U' = U'_{1(x)} + U'_{2(-x)} \quad (5.43)$$

Onde:

$$U'_{1(x)} = \frac{Z_0 h}{bc} \cdot \frac{di(t)}{dt} \cdot \int_{L_0}^L \vartheta \cdot \frac{L}{1 + L^2} \cdot dL \quad (5.44)$$

Sendo:

$$L_0 = b \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{d}\right)^2} - \frac{x}{d} \right) \quad (5.45)$$

$$L = \frac{b \cdot (c \cdot t - x)}{d} \quad (5.46)$$

$$\vartheta = 1 + \frac{\frac{x}{d} + b \cdot L}{\sqrt{(1 - b^2)(1 + L^2) + \left(\frac{x}{d} + b \cdot L\right)^2}} \quad (5.47)$$

Em razão da dificuldade na solução da integral da equação 5.44, Rusck adotou, na expressão de ϑ , o valor 1 para a variável L , fato este decorrente de que a variação da função ϑ é insignificante para valores de L próximos da unidade. Assim, esta grandeza passa a ser considerada constante e designada por ϑ' . Além disso, a máxima amplitude de $U_{1(x)'}^{'}$ é obtida quando $L = 1$ e, nestas condições, a equação 5.44 pode ser substituída pelas expressões a seguir.

Para o caso da equação 5.48, esta é utilizada variando-se o vetor de tempo até o instante compreendido pela soma do tempo de frente, mais aquele necessário para a propagação de onda do ponto de incidência da descarga até a linha.

$$U_{1(x)'} = \frac{Z_0 h}{bc} \cdot \frac{di_{(t)}}{dt} \cdot \vartheta' \cdot \ln \left(\frac{1 + L^2}{1 + L_0^2} \right) \quad 0 \leq t \leq \left(\frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{c} + t_f \right) \quad (5.48)$$

Para contemplar a parcela de atenuação do comportamento da tensão induzida, utiliza-se da equação 5.49.

$$U_{1(x)'} = \frac{Z_0 h}{bc} \cdot \frac{di_{(t)}}{dt} \cdot \vartheta' \cdot \ln \left(\frac{1 + L^2}{1 + (L - L_T)^2} \right) \quad t > \left(\frac{\sqrt{x^2 + d^2}}{c} + t_f \right) \quad (5.49)$$

Onde:

$$L_T = \frac{b \cdot c \cdot t_f}{d} \quad (5.50)$$

Visando ilustrar o desempenho da tensão induzida diante da nova situação imposta para a corrente, desta feita na forma de rampas, apresentam-se, a seguir, os resultados de uma análise conduzida para um tempo de frente de onda de 8 μ s. Os resultados assim obtidos, em função de distintas distâncias entre a linha e o ponto de incidência da descarga, encontram-se fornecidos na Figura 5.16.

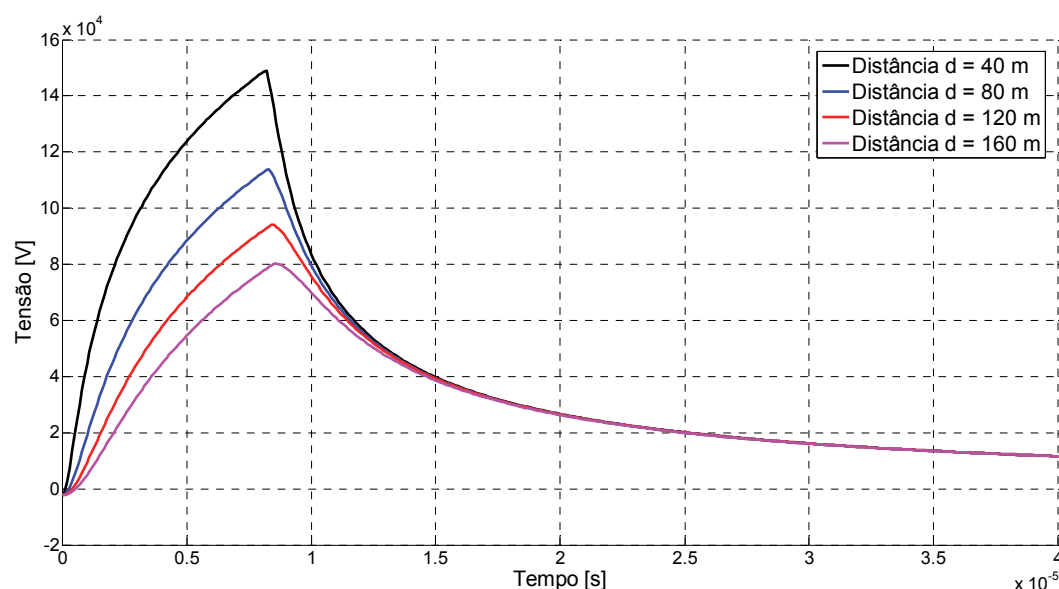


Figura 5.16 Tensão Induzida total para diferentes distâncias entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e a rede de distribuição – corrente tipo rampa

Também, em consonância com estudos anteriores, foram feitas investigações associadas com a questão das induções para diferentes valores das amplitudes de corrente, mantendo-se constante a distância de 50 metros entre a linha e o ponto de incidência, mantendo-se inalterado o tempo da frente da onda em 8 μ s. Estes resultados são indicados na Figura 5.17.

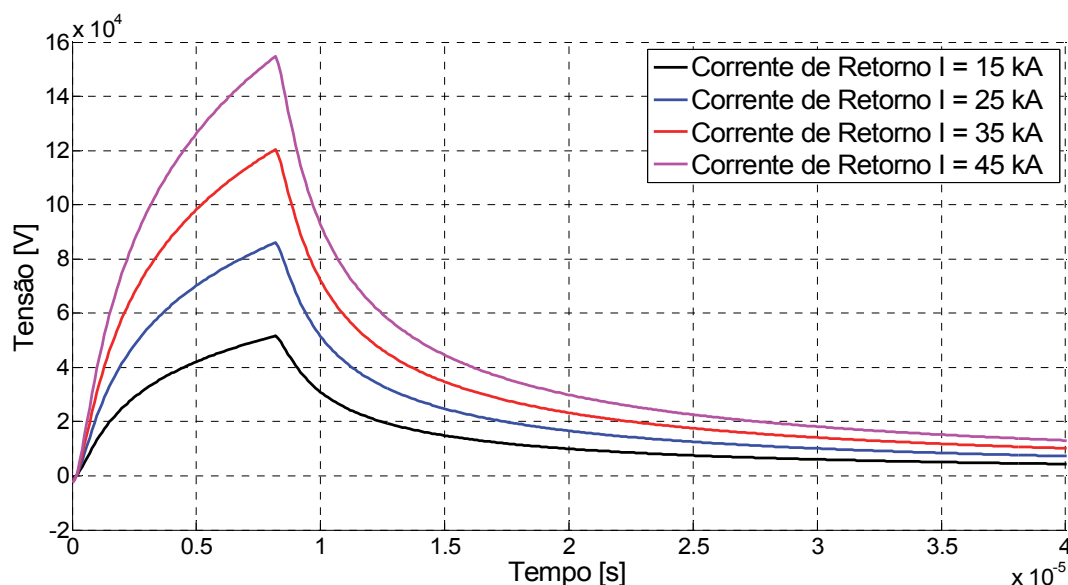


Figura 5.17 Tensão induzida total para diferentes amplitudes das correntes para as descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição – Corrente tipo rampa

Objetivando avaliar os efeitos de diferentes tempos para a subida da onda representativa das descargas atmosféricas, a Figura 5.18 é indicativa desta interdependência. Os estudos foram conduzidos para uma mesma distância de 50 metros entre a linha e o ponto de incidência, assim como

também foi uma única amplitude de 40 kA para o valor de crista da corrente. Os valores utilizados para o tempo de subida se apresentam compatíveis com grandezas típicas.

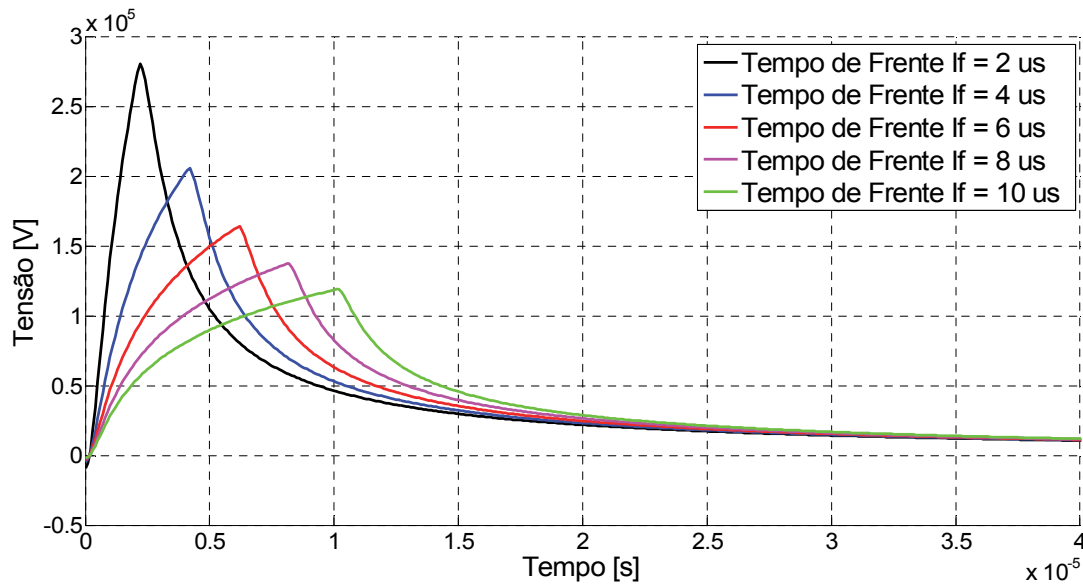


Figura 5.18 Tensão induzida total para diferentes tempos de frente das correntes das descargas atmosféricas incidindo a 50 metros da rede de distribuição – Corrente tipo rampa

Como pode ser constatado, quanto mais rápido o tempo de subida, maior será a tensão induzida e tal valor é atingido mais rapidamente.

Por fim, destaca-se que, na ausência de indicativos concretos, um tempo de frente de onda de corrente de 8 μs será adotado, enquanto que o de descida será de 20 μs. Isto se apoia em informações contidas nas referências [39] [85] [86] [87].

5.4 Correlação entre as Tensões Induzidas e os Esforços Dielétricos

Objetivando expressar a relação entre as tensões induzidas determinadas nas seções anteriores e os denominados esforços dielétricos a que são submetidos eventuais dispositivos eletroeletrônicos das unidades consumidoras, através da equação 5.51 [37], que se apresenta, intrinsecamente, com um significado físico similar ao cálculo do valor eficaz ao longo do tempo, torna-se viável transformar os fenômenos da indução ora tratados em informações relevantes aos processos de análise dos PIDs.

$$V_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n}} \quad (5.51)$$

Onde: V_k é o valor do esforço dielétrico para um instante de tempo qualquer; V_i é o valor instantâneo da tensão para um instante de tempo qualquer e n é o número de amostras.

Para uma avaliação da influência dos distintos métodos de análise apresentados para a determinação das tensões induzidas, seja, a seguir, uma situação atrelada à incidência de uma descarga de 40 kA, num ponto a 50 metros de uma rede de distribuição com 12 metros de altura.

Para a realização de tal investigação torna-se oportuno lembrar que, nas seções anteriores, a tensão induzida na rede elétrica depende de alguns fatores, os quais podem ser inseridos de maneiras distintas, como a seguir:

- **Procedimento 1:** Este se apoia na abordagem inicial de Rusck, a qual trata a corrente de descarga na forma de degrau, fato este que orienta para o uso da equação 5.39 como meio para a obtenção da tensão resultante do processo de indução aqui tratado;
- **Procedimento 2:** Também baseado nos fundamentos do procedimento anterior, exceto pela substituição da corrente por uma rampa e o emprego das equações 5.48 a 5.50;
- **Procedimento 3:** Por fim, este se apresenta como uma mera simplificação do Procedimento 1, fato este que determina um menor esforço computacional. Para o seu emprego utiliza-se da equação algébrica 5.41.

Vale destacar que, quando do emprego do Procedimento 3, para fins do estabelecimento de bases comparativas com os demais, utiliza-se de surto de tensão padrão, representado por uma função dupla exponencial, como recomendado por [39] [85] [86] [87], parametrizado na forma de uma onda de $1,2 \times 50 \mu s$ e amplitude definida pela equação 5.41.

A partir da incidência da descarga atmosférica caracterizada anteriormente, a Figura 5.19 expressa os resultados associadas com as tensões induzidas determinadas através dos 3 procedimentos e evidencia, com clareza, substanciais diferenças entre os desempenhos obtidos. A inexistência de um referencial para a análise e indicação da metodologia mais apropriada, dificulta uma pronta correlação entre os níveis de aderência das tensões assim obtidas. Não obstante a isto, acredita-se ser de bom senso afirmar que o desempenho atrelado com o Procedimento 2 se mostra com um realismo mais consistente, visto que o mesmo se apoia em formas de onda de correntes de retorno mais próximas àquelas encontradas em campo.

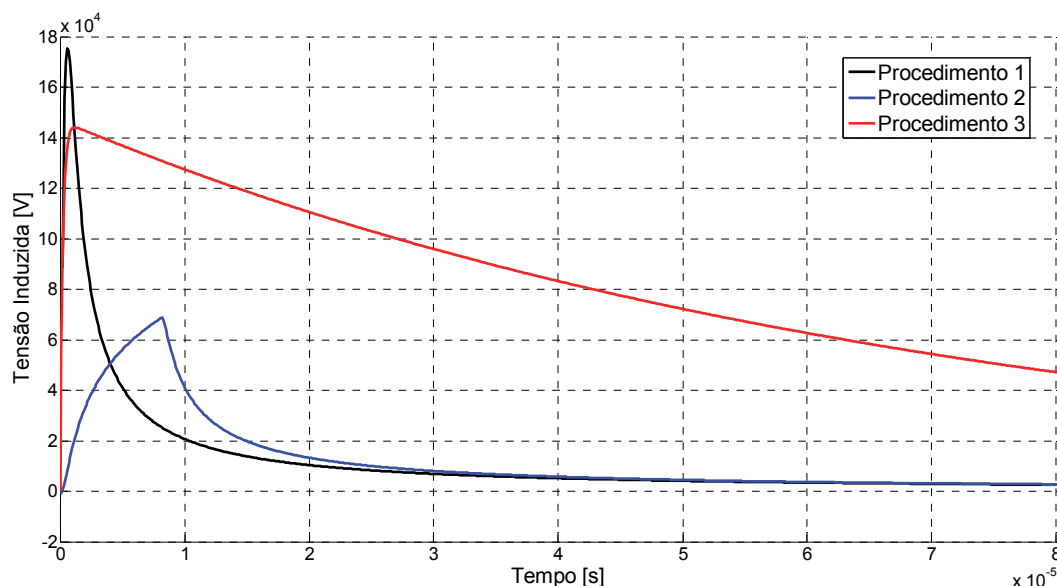


Figura 5.19 Tensões induzidas obtidas pelos três procedimentos: degrau, rampa e onda padrão

Por fim, focando de forma pontual o interesse maior desta pesquisa, qual seja, a obtenção dos denominados esforços dielétricos associadas com a manifestação de fenômenos anômalos junto à tensão de suprimento das unidades consumidoras, a Figura 5.20 traduz os impactos provenientes da incidência indireta da descarga de 40 kA a uma distância de 50 m de uma instalação. Mais uma vez, em consonância com as observações anteriormente feitas, fica indicado que o uso de uma forma de onda de corrente incidente na forma rampada, com frente de onda de $8 \mu\text{s}$.

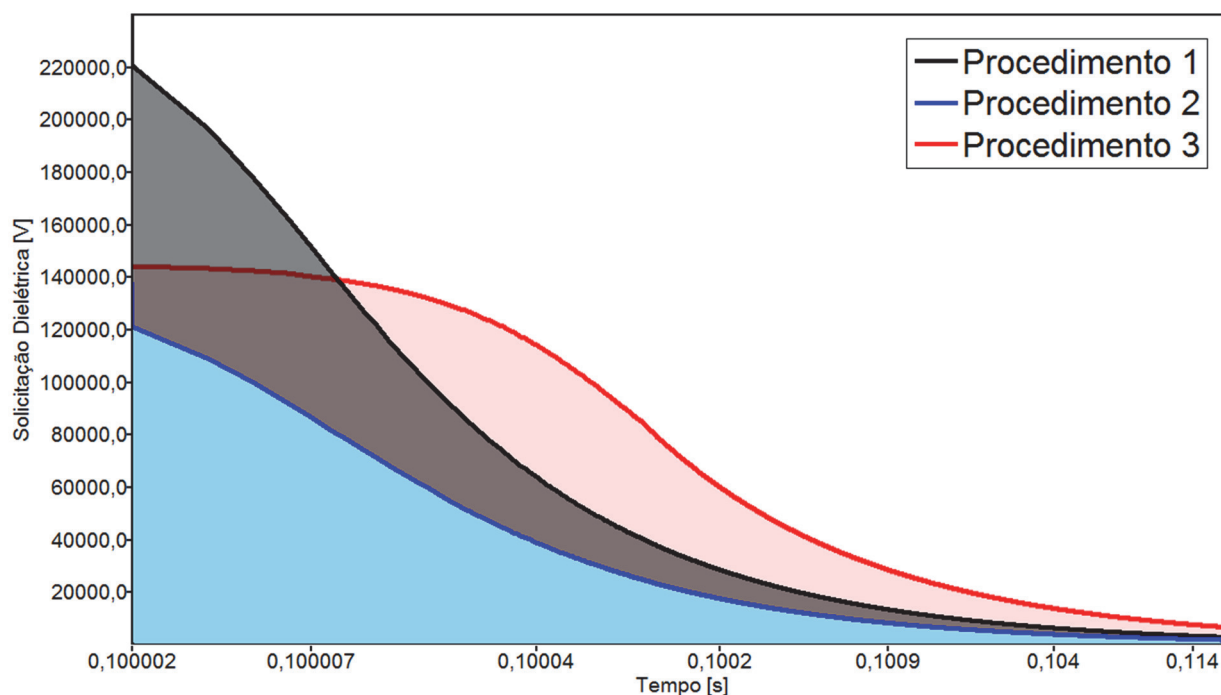


Figura 5.20 Solicitações dielétricas impostas pelas tensões induzidas em função do procedimento de cálculo empregado

5.5 Considerações finais

Conforme estabelecido como meta para este capítulo, o mesmo se apresentou centrado na busca de meios para a determinação das tensões induzidas eletromagneticamente em pontos das redes elétricas onde se localizam, eventualmente, consumidores reclamantes de PIDs. Como estabelecido, muito embora os estudos da correlação entre a incidência de descargas atmosféricas de forma direta sobre os condutores já tivessem sido contemplados em trabalhos anteriores que culminaram pelo aplicativo computacional APR, o fato é que, mecanismos indiretos associados com induções elétricas e magnéticas, até então, não foram considerados. Em vista do fato, há fortes indicativos que tais fenômenos possam se apresentar como esforços dielétricos impactantes sobre os componentes das instalações consumidoras, tais efeitos não podem ser ignorados. Diante desta realidade, foram realizados exaustivos trabalhos de levantamento e estudos da bibliografia aplicável à matéria, de forma tal a oferecer meios para a inclusão dos distúrbios ora tratados nas análises dos pedidos de indenização em foco.

Inicialmente, é importante destacar uma grande diversidade de propostas envolvidas com as tensões induzidas e publicadas na literatura, todavia, a grande maioria não foi aqui considerada visto que seus enfoques se apresentaram distintos do escopo desta tese. À luz dos objetivos centrais desta pesquisa, da confiabilidade já comprovada e grande difusão e aceitação no meio científico do denominado Método de Rusck, a opção aqui feita recaiu sobre esta estratégia para a avaliação da correlação entre a manifestação de descargas atmosféricas indiretas e as induções eletromagnéticas passíveis de ocorrência nas redes de suprimento dos consumidores.

Diante desta realidade, o trabalho prosseguiu apresentando os fundamentos físicos e formulações matemáticas aplicáveis. Neste particular torna-se mister destacar que, muito embora os desenvolvimentos de carácter descritivo não sejam inovadoras quanto aos seus princípios, o direcionamento da metodologia proposta por Rusck se apresenta como ferramenta com pouca difusão para os fins aqui esperados, fato este que motivou os detalhamentos realizados.

Quanto ao emprego do processo de Rusck, em consonância com as discussões feitas e sem particularizar as propriedades de uma ou outra estratégia, o fato é que, por fim, os processos para a determinação das induções eletromagnéticas foram caracterizados na forma de três procedimentos. Um primeiro apoiado na concepção de uma forma de onda em degrau para o surto de corrente, um segundo na forma de rampa e, por fim, um terceiro, utilizando a tradicional forma padrão $1,2 \times 50 \mu s$. Também, para uma melhor compreensão e visualização da correlação entre os fenômenos de indução tratados e as informações efetivamente requeridas pelos estudos de ressarcimento de danos, as tensões anômalas passíveis de manifestação nas redes elétricas de suprimento dos consumidores foram, também, traduzidas na forma de esforços dielétricos, como requer o aplicativo APR.

Estabelecidas tais possibilidades e reconhecendo o fato que todos os procedimentos se encontram disponibilizados para os trabalhos, estudos de cunho computacional apontaram para que o denominado Procedimento 2, diante de expectativas físicas, se mostrou mais consistente com a realidade física e foi, por tal motivo, indicado como melhor opção para os trabalhos associados com os PIDs.

CAPÍTULO 6

VERSÃO MODIFICADA DO APLICATIVO APR E ANÁLISE DE DESEMPENHO

6.1 Considerações iniciais

Não obstante as propriedades atuais disponibilizadas pelo aplicativo computacional desenvolvido no âmbito da UFU para fins dos estudos de consistência dos nexos causais envolvendo a polêmica área conhecida por Ressarcimento por Danos Elétricos a consumidores, este *software* ainda oferece importantes desafios a serem considerados e incorporados à ferramenta de análise até então oferecida.

Dentro deste princípio, utilizando os estudos realizados anteriormente, que conduziram a um conjunto de expressões destinadas a correlacionar os mencionados fenômenos atrelados com a ocorrência de descargas atmosféricas indiretas e os fenômenos das induções eletromagnéticas, procede-se, nesta fase dos trabalhos, à inserção dos meios propostos para a incorporação de tais recursos no *software* APR, viabilizando, assim, novas frentes de investigações direcionadas aos estudos da consistência ou não do nexo causal requeridos pelos mais distintos PIDs submetidos à apreciação das empresas distribuidoras.

Para tanto, iniciando com uma síntese do atual estágio de desenvolvimento do *software*, são esclarecidos pontos relacionados com a filosofia e potencialidade da ferramenta de análise e pontuados aspectos relacionados com a estratégia para a incorporação dos recursos destinados aos estudos dos impactos causados pelas descargas indiretas. Os trabalhos seguem através da inclusão da modelagem descrita para o fenômeno em pauta, e testes de desempenho são conduzidos visando elucidar a aplicabilidade e relevância do tema.

Somado aos esforços vinculados com as descargas atmosféricas indiretas e respectivas induções, são ainda sintetizados os trabalhos destinados a incorporação, no mencionado aplicativo, do modelo computacional do televisor a LED e também das curvas representando os limites de suportabilidade térmica e dielétrica, assim como também os limites de sensibilidade operacional dos produtos estudados nesta tese.

Estudos investigativos são, por fim, realizados objetivando analisar e elucidar estudos de casos associados com situações passíveis de PIDS.

6.2 Versão Modificada do Aplicativo APR

O *software* de análise (APR), nos termos vigentes, foi concebido e desenvolvido visando:

- Permitir uma interação amigável entre o usuário e o ATP;
- Viabilizar a caracterização da rede elétrica através da configuração e edição dos parâmetros elétricos da mesma ou por acesso a banco de dados;
- Disponibilizar os diversos modelos de equipamentos eletroeletrônicos, alvos das avaliações;
- Permitir uma pronta representação das fontes responsáveis por distúrbios típicos em redes de distribuição;
- Realizar a montagem e arquivamento dos dados de entrada para a execução do ATP;
- Executar e, posteriormente, importar os arquivos de saída do ATP;
- Fazer o tratamento dos resultados para fornecer subsídios técnicos que permitam a tomada de decisão e emissão do parecer final sobre o pedido de ressarcimento.

Seguindo a filosofia de sua concepção inicial, o *software* busca reproduzir, propagar e correlacionar os distúrbios factíveis de manifestações nas redes elétricas e seus impactos sobre os equipamentos supridos pelos alimentadores de distribuição, ou outros. Neste sentido, ocorrências do tipo: descargas atmosféricas, curtos-circuitos, atuação dos dispositivos de proteção, manobras diversas, etc., podem ser realizados através de uma base computacional sólida e amplamente aceita pelas empresas de energia elétrica do Brasil e do mundo.

No que tange a lógica operacional e de análise, os impactos causados pelos fenômenos são propagados até o ponto de conexão do consumidor reclamante, onde os equipamentos contemplados no PID são representados através de modelos compatíveis com cada produto considerado. Analisando as tensões e as correntes incidentes sobre os produtos reclamados, correlaciona-se então os esforços dielétricos e térmicos com estas grandezas e, torna-se então possível a comparação destas solicitações com os padrões de suportabilidade dos dispositivos, constatando-se ou não a existência donexo causal e, conclusivamente, emite-se um parecer sobre a solicitação feita.

A interface gráfica do APR foi desenvolvida em *Delphi*, sendo composta por uma área de desenho para a representação do diagrama unifilar do sistema de energia. Nela, todos os comandos e campos são dispostos de forma direta e prática onde o usuário visualiza facilmente os instrumentos ou opções de trabalho, conforme indica a Figura 6.1

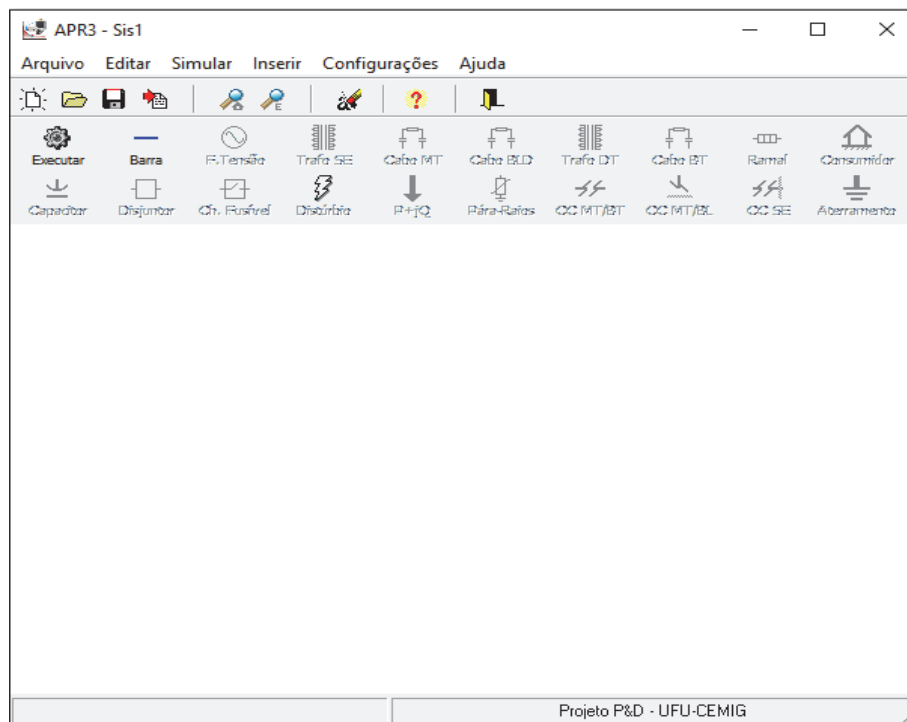


Figura 6.1 Interface gráfica do APR

Maiores detalhes sobre o mencionado aplicativo, dentre outras questões vinculadas com o seu desenvolvimento, podem ser encontrados em [37], [53], [100].

De um modo geral, a Figura 6.2 representa a estrutura e uma macro visão dos módulos de configuração do sistema.

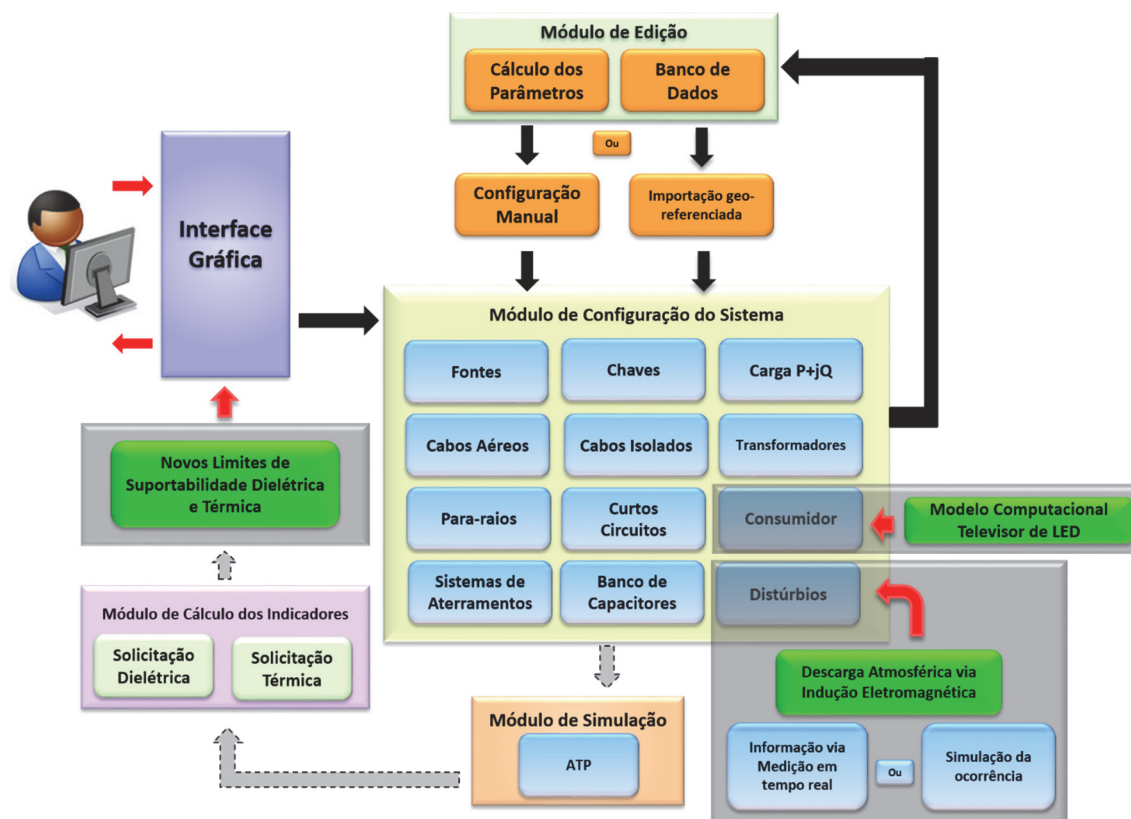


Figura 6.2 Estrutura do aplicativo APR com as inserções desta tese

Na Figura 6.2 podem ser constatados, nos blocos na cor verde, as alterações processadas e próprias desta tese, visando adequar a ferramenta aos propósitos estabelecidos, a saber: inclusão do modelo computacional do televisor a LED, a inserção dos limites de suportabilidade às tensões e correntes para os equipamentos estudados, e por fim, a incorporação dos efeitos das induções eletromagnéticas devido a incidência das descargas atmosféricas indiretas.

Na estrutura da figura, as setas em preto representam as ações diretas do operador, utilizando a interface gráfica do APR, enquanto que aquelas na cor cinza indicam processos de comunicação interna do *software*, independentemente da interferência do usuário. Desta forma, o usuário é responsável por apenas executar os módulos de configuração e edição do sistema em questão.

6.2.1 Implementação do modelo computacional do televisor a LED

Uma vez obtida e validada a representação do televisor a LED, esta foi incorporada ao elenco de dispositivos pertencentes ao APR, dentro da seguinte filosofia:

- Criação de um circuito elétrico no ATPDraw que incorpore os principais componentes eletrônicos presentes na placa da fonte do televisor, utilizando para isso o recurso disponível na TACS;
- Criação de um cartão para interligação do circuito elétrico montado no ATPDraw com o padrão base, apropriadas para a leitura e utilização no aplicativo APR.

Todos os detalhes da construção desse cartão de interligação, bem como os dados que representam o modelo dos televisores a LED, podem ser verificados no APÊNDICE A. De maneira complementar, a Figura 6.3 ilustra a janela do aplicativo APR destacando a inserção do televisor a LED, dentre as opções já existentes de equipamentos.

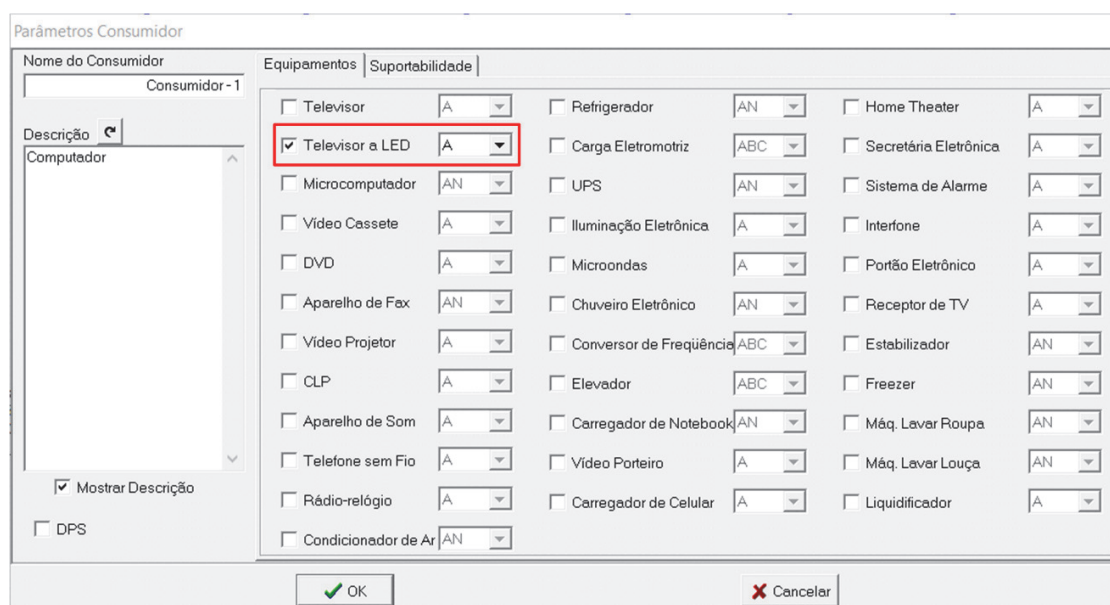


Figura 6.3 Interface do aplicativo APR destacando a inserção do novo equipamento disponível dentre as opções já existentes

6.2.2 Implementação dos novos limites de suportabilidade térmico e dielétrico para os produtos investigados

Uma vez estabelecidos os limites térmicos e dielétricos, nos termos descritos nos capítulos 3 e 4, estes foram inseridos na nova versão do aplicativo APR e, diante destes novos recursos, a Figura 6.4 é indicativa da nova interface disponibilizada para o usuário selecionar a curva do correspondente produto a ser analisado.

Figura 6.4 Interface do APR para seleção dos limites de suportabilidade

6.2.3 Implementação dos efeitos das induções eletromagnéticas

Muito embora as descrições feitas até o presente momento tenham primado pela utilização do ATP como recurso básico para os desenvolvimentos dos modelos dos equipamentos, estes foram, na sequência, transferidos para o aplicativo APR.

Para tanto foram realizadas as seguintes ações:

- Criação de um cartão que incorpora detalhes numéricos do vetor representativo das tensões induzidas, obtidas via programação realizada pela rotina do *software* MATLAB;
- Estabelecimento de meios para a migração desses vetores associados com as tensões induzidas, do ambiente MATLAB para a base do aplicativo APR.

A Figura 6.5 ilustra a interface gráfica criada, no contexto da plataforma MATLAB, com o intuito de tornar mais amigável a entrada de dados do usuário. Como indicado, o usuário simplesmente fornece os parâmetros da corrente de descarga atmosférica e as informações de caracter geométrico da rede. Como saída, tem-se duas funções: “Plotar gráficos” e “Gerar Cartão para o APR”. A primeira opção apenas exibe em uma tela a tensão induzida ao longo do tempo. Já a segunda, executa a comunicação da plataforma MATLAB com o APR.

O resultado do código fonte da implementação da interface para o usuário, bem como a rotina para fornecimento das grandezas, é fornecido no APÊNDICE B.

Figura 6.5 Interface gráfica com usuário na plataforma MATLAB

De modo a integrar os *softwares* MATLAB e APR, uma rotina de programação executa os cálculos de um dos procedimentos de cálculo contemplados no capítulo 5 e cria, posteriormente, um arquivo de texto padronizado com os resultados dessa simulação. Esse arquivo forma um cartão que representa, ponto a ponto, em forma de um vetor, os valores das tensões ao longo do tempo.

A Figura 6.6 ilustra o formato padrão de um cartão representativo do vetor tensão induzida, criado pela rotina em MATLAB.

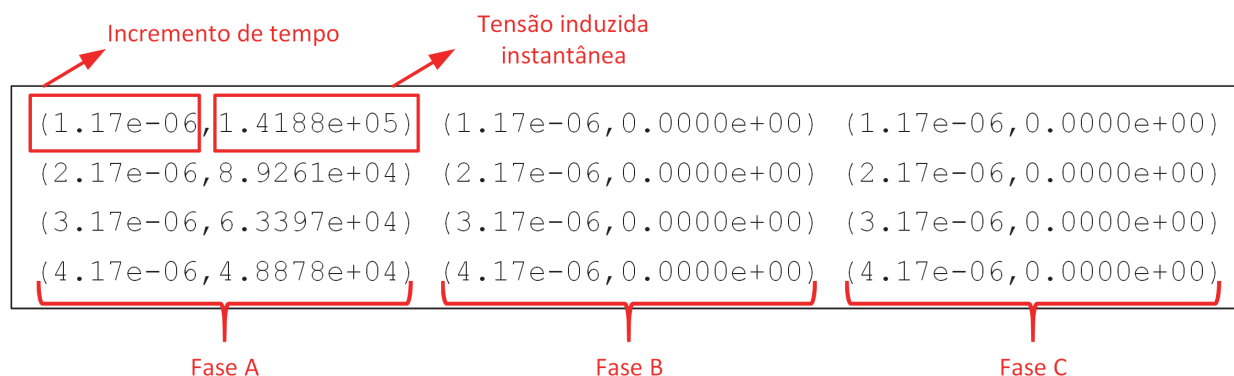


Figura 6.6 Formato do cartão contendo o vetor representativo das tensões induzidas

Também, a rotina gera um segundo cartão, contendo as informações necessárias para a configuração da simulação e compatibilização dos dados contidos no cartão representativo das

tensões induzidas com: passo de integração, tempo máximo do evento e número de pontos fornecidos pela rotina executada em MATLAB. A Figura 6.7 ilustra o cartão assim criado.

```

VAR
  tref -- variável de tempo incrementada a cada passo de integração superior a tdl
  va -- tensão da fase A
  vb -- tensão da fase B
  vc -- tensão da fase C
  Vmf -- valor máximo da tensão de fase
  A0 -- ângulo inicial da tensão da fase A
  B0 -- ângulo inicial da tensão da fase B
  C0 -- ângulo inicial da tensão da fase C
  Atd1 -- ângulo da tensão no início do evento
  t1 -- intervalo de tempo entre amostras de tensão
  td2 -- instante de tempo do último ponto amostrado
  flag -- variável de controle de cálculos iniciais
FUNCTION fonte_f(Vmff,freqf,A0f):=Vmff*sin(2*pi*freqf*t+A0f)
FUNCTION vamed POINTLIST
$INCLUDE, C:\Users\Isaque\Desktop\Sergio\faseA.lst
FUNCTION vbmed POINTLIST
$INCLUDE, C:\Users\Isaque\Desktop\Sergio\faseB.lst
FUNCTION vcmed POINTLIST
$INCLUDE, C:\Users\Isaque\Desktop\Sergio\faseC.lst
INIT
  flag:=0
  tref:=0
  t1:=5.917147E-05
  td2:=t1+td1
  Vmf:=sqrt(2)*Vrmsff/sqrt(3)
  Atd1:=deg(asin(vamed(0)/Vmf))
ENDINIT
EXEC
  IF t < tdl OR t > td2 THEN
    IF flag = 0 THEN
      IF vamed(0) >= 0 THEN
        IF vamed(0) > vamed(t1) THEN
          Atd1:=rad(180-Atd1)
        ELSE
          Atd1:=rad(Atd1)
        ENDIF
      ENDIF
    ENDIF
  
```

Figura 6.7 Cartão para adequação das informações a serem exportadas para o APR

Quanto a inserção das tensões induzidas no aplicativo APR, essa ação é feita através de uma interface, no próprio aplicativo, a qual visava, originalmente, a substituição de uma fonte de tensão senoidal por dados de uma medição. Assim procedendo, o cartão representativo das tensões induzidas (gerado pelo MATLAB) é transferido ao APR, como indicado na Figura 6.8.

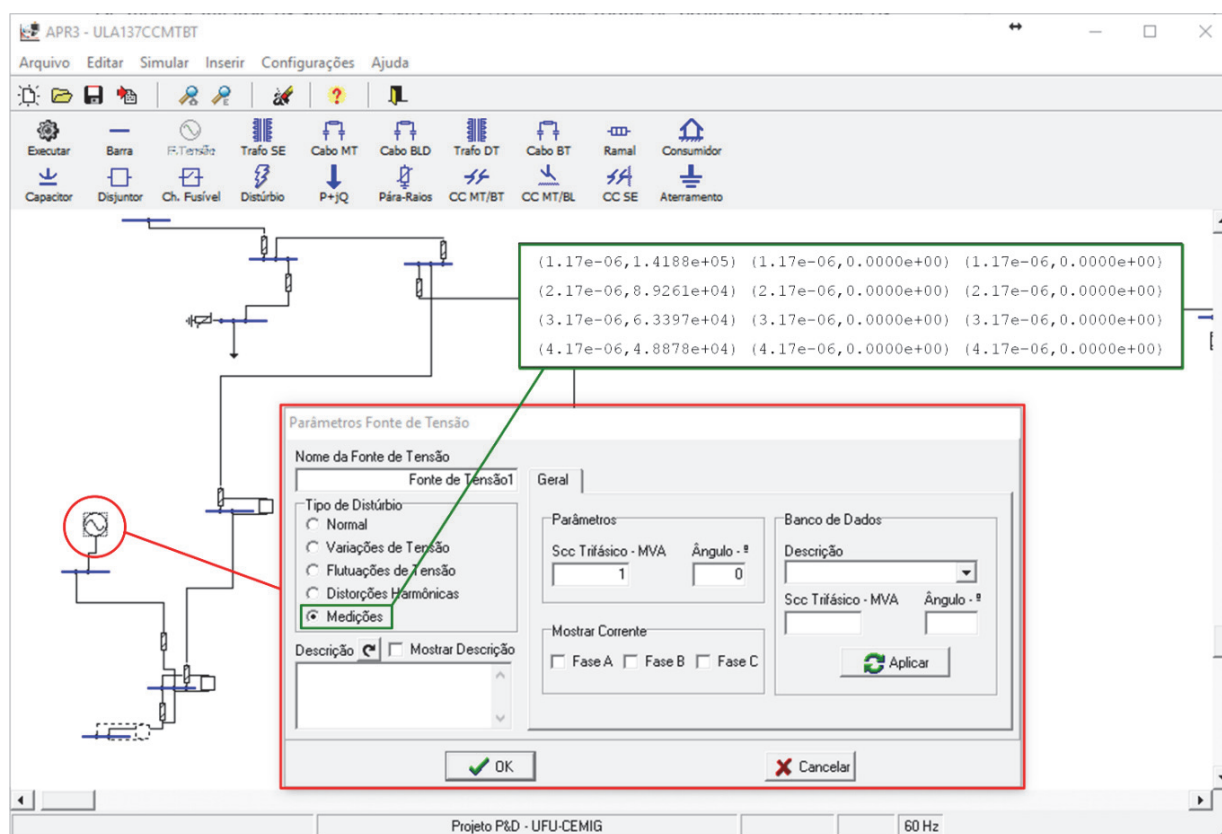


Figura 6.8 Configuração das induções eletromagnéticas no aplicativo APR

6.3 Estudos de Casos

Objetivando elucidar a utilização do aplicativo APR, com destaque para a inserção das novas propriedades oferecidas por esta tese, procede-se, nesta seção, a realização de estudos de desempenho do *software*.

Dentro de um grande universo de situações avaliadas, são considerados dois casos para as considerações subsequentes. São eles:

- **Caso 01** – Destinado a avaliar os limites de suportabilidade dielétrica e térmica dos eletrodomésticos pertencentes a linha branca, propostos nos capítulos 3 e 4, a partir de uma ocorrência numa rede de distribuição, na forma de rompimento de um cabo da média tensão, com consequente queda sobre o cabo de baixa tensão e, posteriormente, ao solo;
- **Caso 02** – Voltado para o processo avaliativo de desempenho do modelo do televisor a LED e seus respectivos limites de suportabilidade dielétrico e térmico, quando da incidência de uma descarga atmosférica, direta e indireta, sobre o alimentador de um dado consumidor.

No que tange a caracterização geográfica da unidade consumidora aqui considerada, com destaque a rede de distribuição compreendida desde a subestação da qual originou o distúrbio considerado até o reclamante, a Figura 6.9 detalha o arranjo físico em questão.



Figura 6.9 Identificação geográfica do consumidor e alimentador elétrico – [Fonte: Google Maps]

Quanto a topologia e parametrização para o caso sob análise, estas poderiam ser inseridas no APR através de duas formas. Uma através de uma composição manual do sistema, a partir dos dados conhecidos e disponibilizados pela empresa. Outra, através da importação direta das informações fornecidas por um banco de dados georeferenciado disponível pela concessionária e prontamente acessado pelo APR. Naturalmente, esta segunda opção, além da rapidez e maior exatidão quanto as informações, oferece, como consequência, uma maior confiabilidade e segurança para os estudos. Foi esta segunda opção a utilizada para os fins deste trabalho, a qual resultou no diagrama unifilar indicado na Figura 6.9.

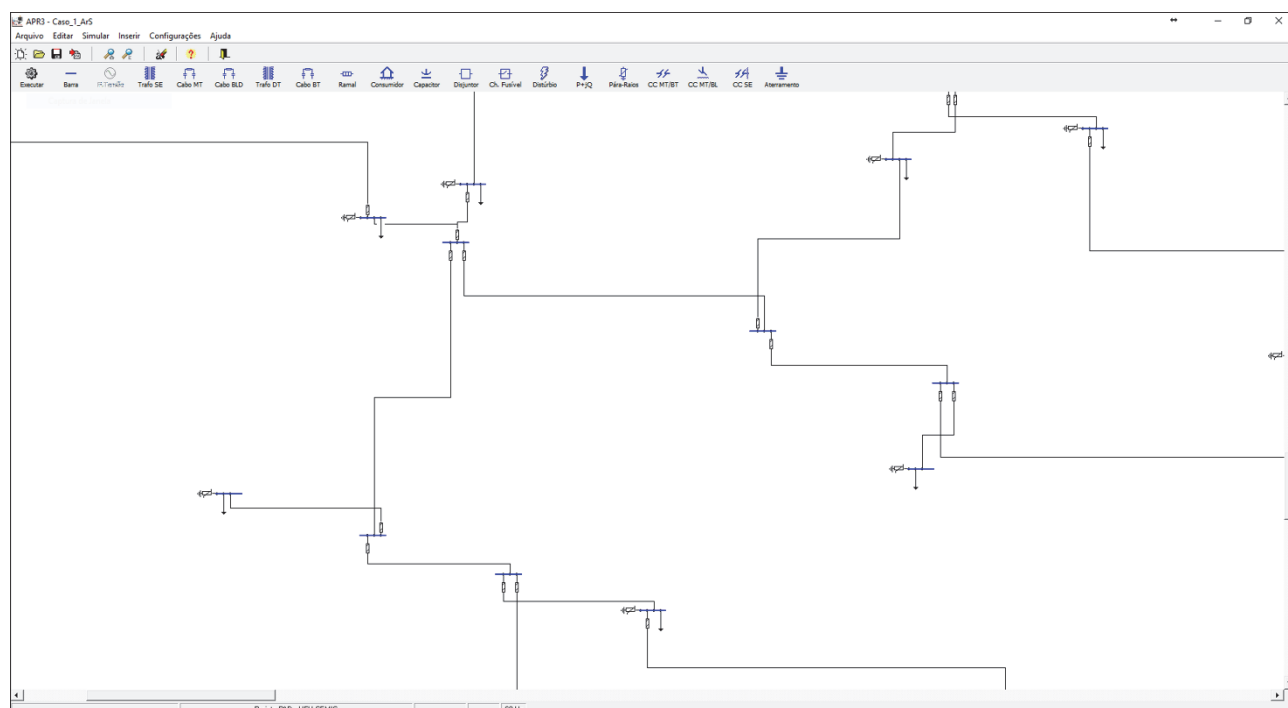


Figura 6.10 Rede de distribuição importada automaticamente para o APR

Vale lembrar que, tão logo esta etapa seja concluída, torna-se imperativo que a fonte de distúrbio (curto-circuito ou descarga atmosférica), supostamente responsável pelo dano reclamado, seja imposta e parametrizada.

6.3.1 Caso 01: Ruptura e queda de um cabo de média tensão sobre um alimentador residencial de baixa tensão

A distribuidora de energia elétrica, uma vez realizada uma primeira etapa da análise do caso em questão, constatou que: *“no dia em que o consumidor alegou ter seus equipamentos danificados, ocorreu, devido a colisão do veículo ao poste de energia, um rompimento de um cabo da fase A da média tensão, com consequente queda sobre um condutor, também da fase A, de baixa tensão e posteriormente sua queda ao solo.”*

Portanto, ficou ratificada a ocorrência do fato que, num primeiro momento, poderia justificar a existência do nexa causal que sustentaria a reclamação ora considerada.

Objetivando o processo avaliativo sobre a correlação das tensões e correntes impactantes e o ressarcimento feito, a Figura 6.11 ilustra uma primeira etapa da análise, a qual consiste na configuração do fenômeno anômalo no simulador computacional. Na figura podem ser visualizadas algumas barras de média tensão (em azul), o transformador que alimenta o circuito de baixa tensão o qual o consumidor está conectado, as barras de baixa tensão (em vermelho) e a inserção do curto-circuito da média para a baixa tensão. Também, é possível constatar a questão dos recursos para configuração e parametrização do fenômeno ora estudado.

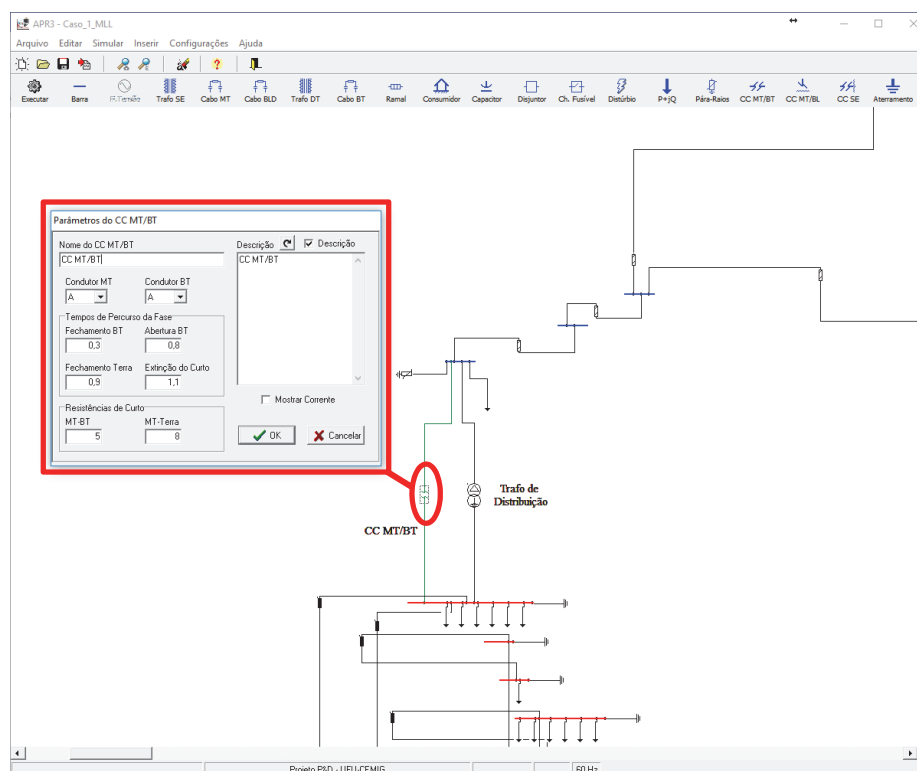


Figura 6.11 Sistema elétrico equivalente e importado para o aplicativo APR incluindo a configuração do curto-MT/BT – Caso 01

A Figura 6.12, associada com os resultados preliminares fornecidos pelo APR, ilustra as tensões nas três fases e de neutro na barra de baixa tensão junto aos terminais de conexão do consumidor. Como pode ser constatado, a fase A evidencia que valores próximos de 2 p.u. para esta grandeza durante o curto entre as fases, enquanto que a fase B indica uma modesta redução em sua amplitude.

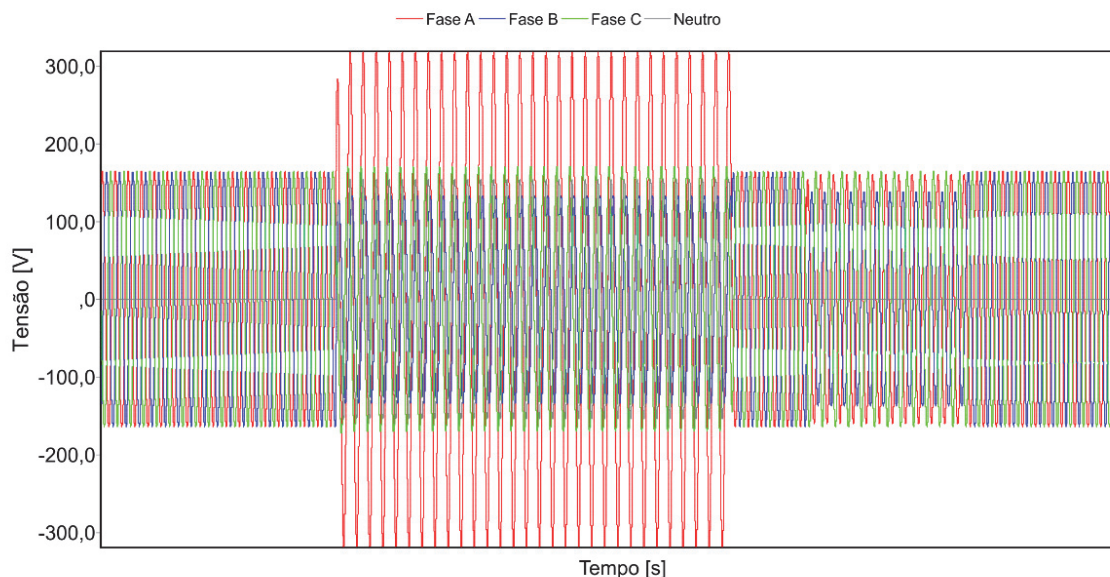


Figura 6.12 Tensões trifásicas no ponto de conexão do consumidor – Caso 01

Uma vez obtidas as tensões de suprimento, estas são, na sequência, empregadas para fins da verificação da violação, ou não, dos limites preconizados para os esforços dielétricos. Tendo em vista que o total de equipamentos reclamados foram 5 (cinco), estes são individualmente considerados a seguir.

A) Refrigerador

A Figura 6.13 (a) e (b) mostram, respectivamente, as formas de onda da tensão e da corrente observadas nos terminais de suprimento do refrigerador.

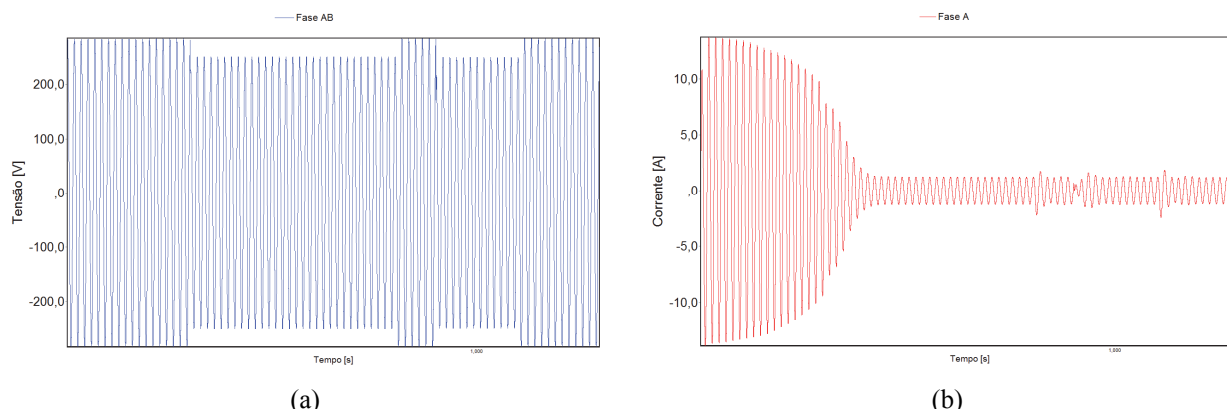


Figura 6.13 (a) tensão e (b) corrente na entrada do refrigerador – Caso 01-A

As tensões e correntes no equipamento sob análise, correlacionadas em termos de seus respectivos esforços dielétricos e térmicos, assim como os correspondentes limites considerados admissíveis, encontram-se indicados na Figura 6.14 e na Figura 6.15.

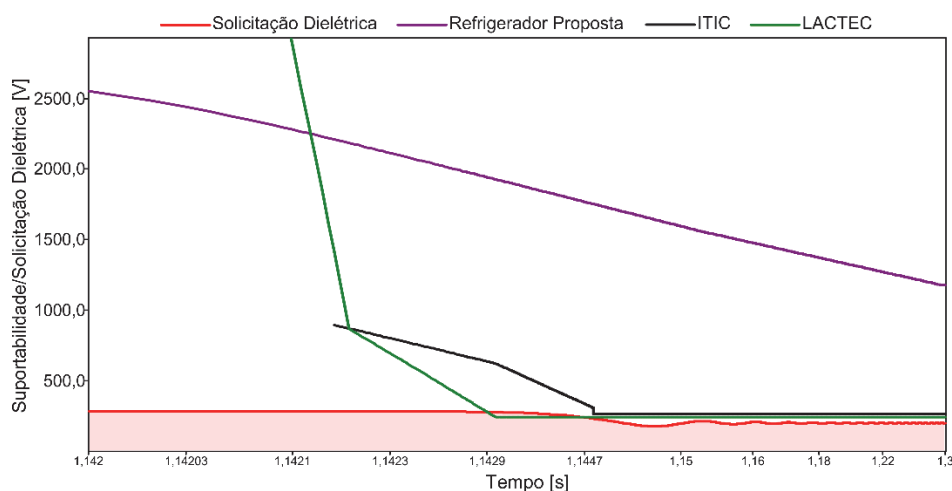


Figura 6.14 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica no refrigerador - Caso 01-A

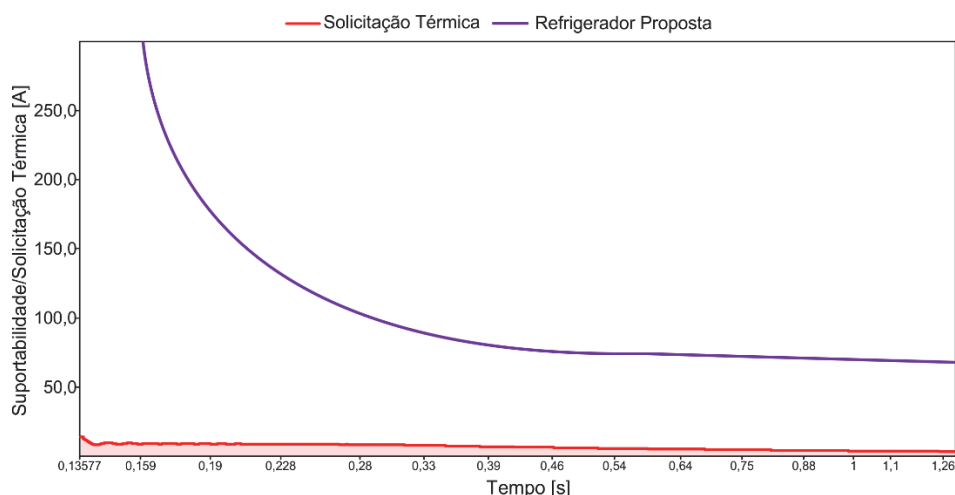


Figura 6.15 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica no refrigerador - Caso 01-A

Os resultados obtidos permitem constatar que: houve violação dos níveis de tensão admissíveis, sem que registrasse o mesmo fato para a corrente tolerada pelo refrigerador. Portanto, quanto às questões dielétricas, pode-se verificar que, tomando por base o banco de dados do LACTEC, há evidências de que o fenômeno em pauta poderia ter causado os danos físicos reclamados. Todavia, ao se empregar os demais limites fornecidos nesta tese, constata-se que os esforços associados com as tensões não atingiram proporções que viessem a provocar danos físicos no produto contemplado no PID.

B) Freezer

A Figura 6.16 (a) e (b) mostra as formas de onda da tensão e da corrente nos terminais de suprimento do freezer.

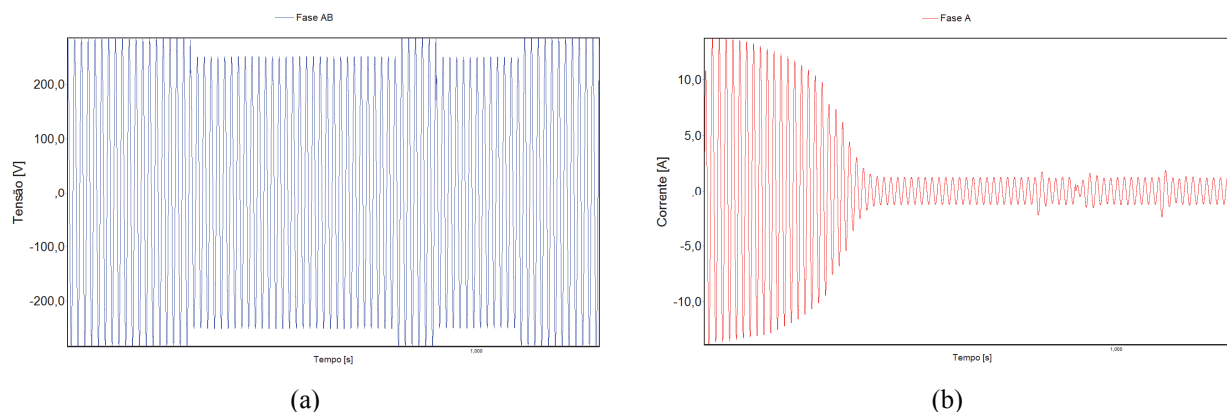


Figura 6.16 (a) tensão e (b) corrente na entrada do freezer – Caso 01-B

As tensões e correntes, uma vez correlacionadas com seus respectivos esforços dielétricos e térmicos, e correspondentes limites admissíveis, encontram-se indicados na Figura 6.17 e na Figura 6.18.

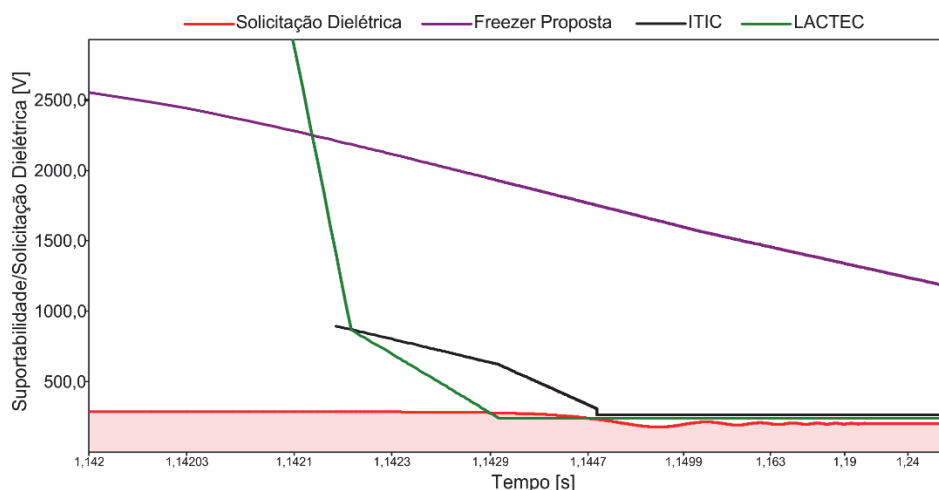


Figura 6.17 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica no freezer - Caso 01-B

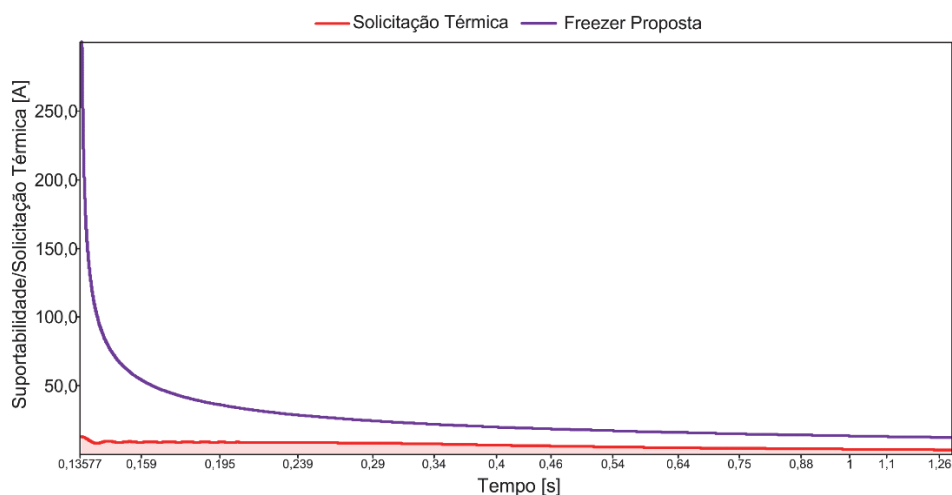


Figura 6.18 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica no freezer - Caso 01-B

Os resultados anteriormente mostrados levam a constatação que: houve violação dos níveis de tensão admissíveis, sem que registrasse o mesmo fato para a corrente tolerada pelo freezer. Portanto, quanto às questões dielétricas, tomando por base as informações de tolerância definidas por

LACTEC, pode-se verificar que há evidências de que o fenômeno em pauta poderia ter causado os danos físicos reclamados. Quanto aos demais limites, novamente constata-se a mesma situação já comentada anteriormente.

No que tange as questões térmicas, não houve qualquer violação dos limites, qualquer que seja a base de dados.

C) Máquina de Lavar Roupas

A Figura 6.19 (a) e (b) indicam as formas de onda da tensão e da corrente de suprimento da máquina de lavar roupas.

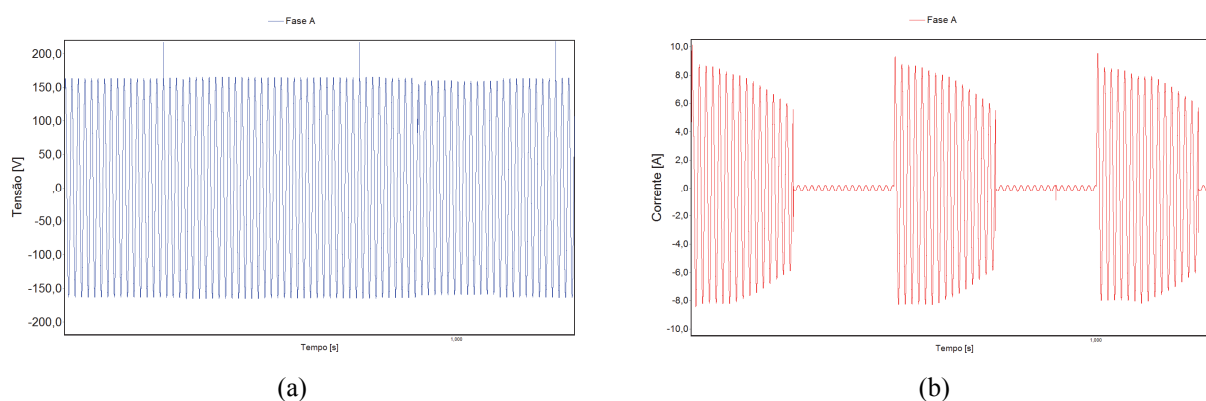


Figura 6.19 (a) tensão e (b) corrente na entrada da máquina de lavar roupas – Caso 01-C

Novamente, a Figura 6.20 e a Figura 6.21 fornecem as correlações entre os esforços aplicados e os limites de tolerância aplicáveis.

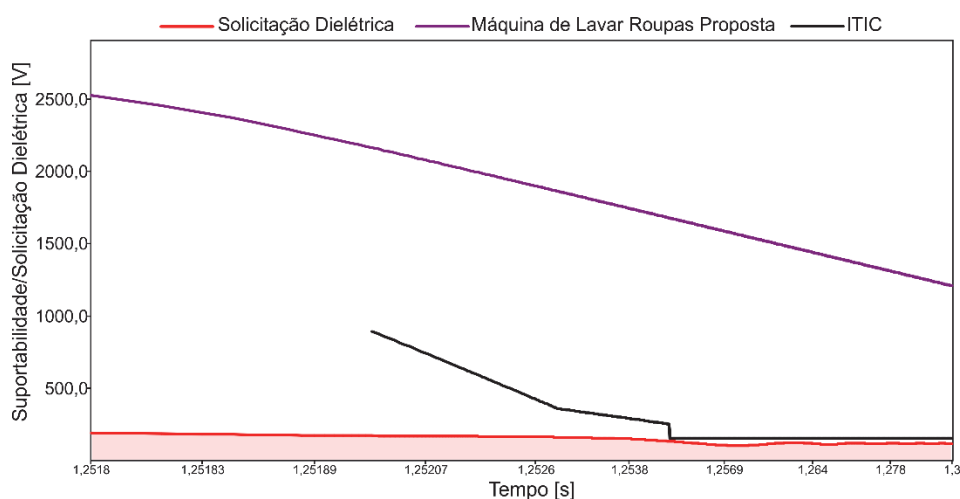


Figura 6.20 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica na máquina de lavar roupas - Caso 01-C

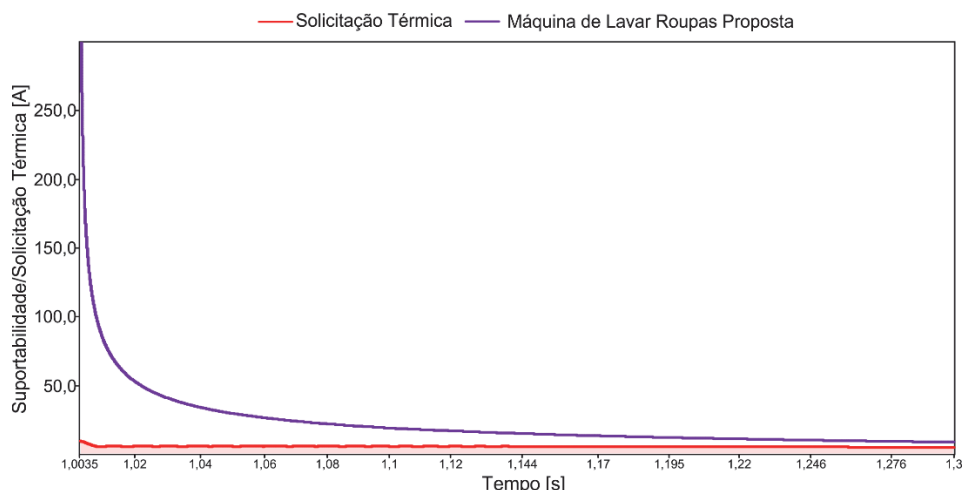


Figura 6.21 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica na máquina de lavar roupas - Caso 01-C

Diferentemente dos casos anteriores, os resultados obtidos para a presente condição operativa permitem constatar que não houve qualquer evidência de violação dos níveis de tensão e corrente admissíveis pelo produto em análise. Portanto, quanto às questões dielétricas e térmicas, não há evidências de que o fenômeno em pauta poderia ter causado os danos físicos reclamados. Ressalta-se que, para o eletrodoméstico investigado, não há outra informação sobre níveis de suportabilidade que a proposta desta tese. Não obstante a isto, a comparação também foi feita com a curva ITIC, muito embora se reconheça sua limitada abrangência a equipamentos da linha da informática.

D) Máquina de Lavar Louças

A Figura 6.22 (a) e (b) fornece as tensões e correntes nos terminais de suprimento da máquina de lavar louças.

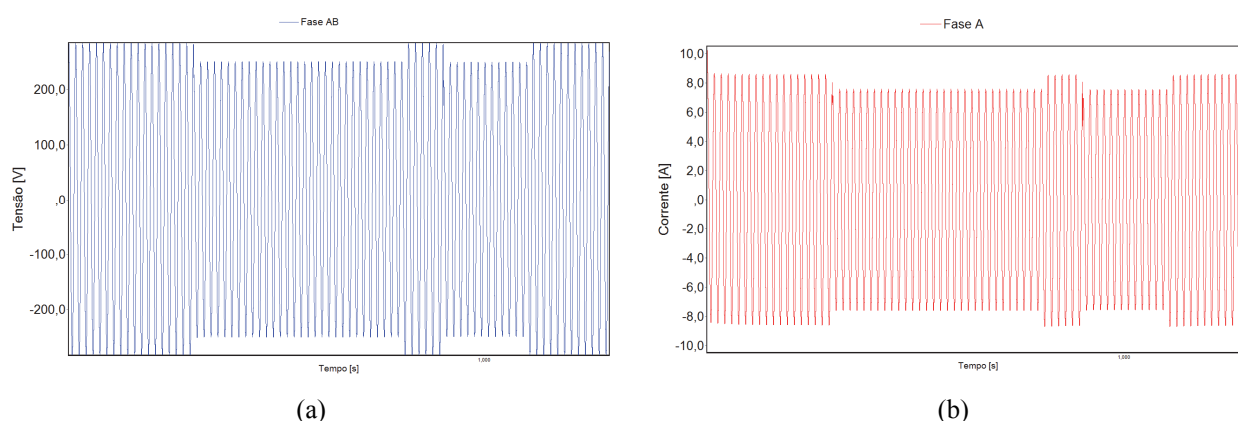


Figura 6.22 (a) tensão e (b) corrente na entrada da máquina de lavar louças – Caso 01-D

Quanto aos esforços dielétricos e térmicos e correspondentes limites admissíveis, estes se apresentam na Figura 6.23 e Figura 6.24, respectivamente.

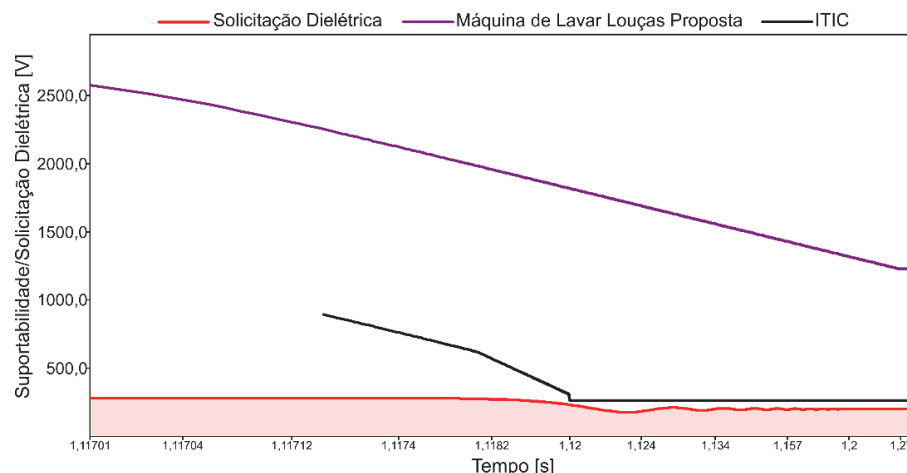


Figura 6.23 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica na máquina de lavar louças - **Caso 01-D**

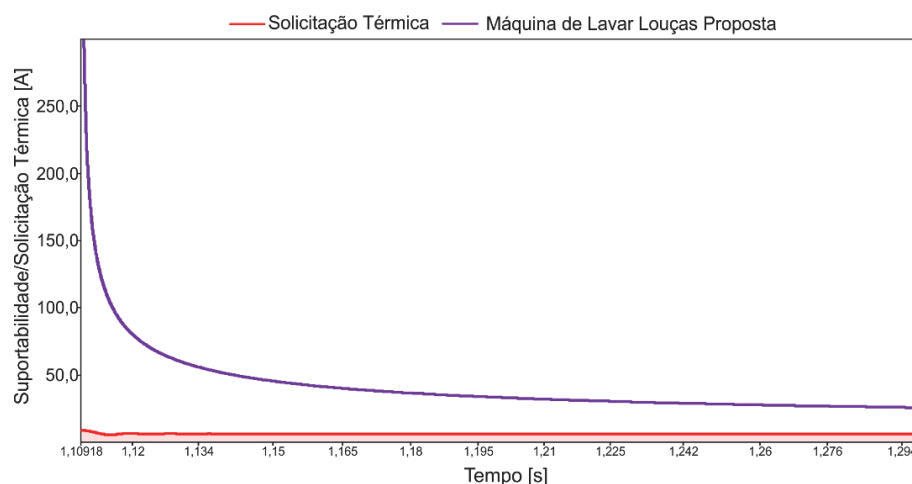


Figura 6.24 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica na máquina de lavar louças - **Caso 01-D**

Mais uma vez, os estudos e resultados fornecidos pelo APR não evidenciaram que a situação operativa imposta poderia ter causado danos de natureza física no equipamento.

E) Condicionador de Ar Split

A Figura 6.25 (a) e (b) encontra-se relacionada com as tensões e correntes na entrada do condicionador de ar Split.

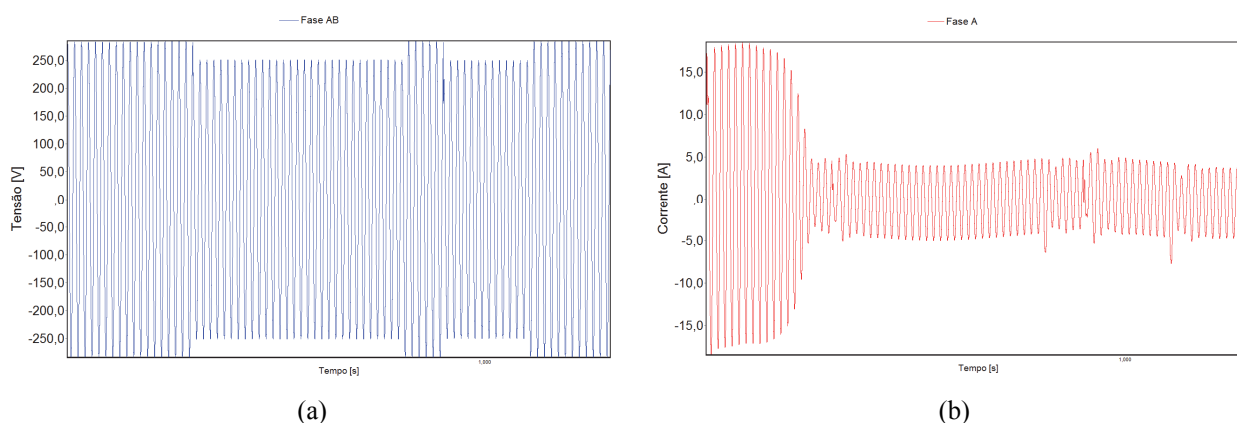


Figura 6.25 (a) tensão e (b) corrente na entrada do condicionador de ar Split – **Caso 01-E**

Uma vez correlacionadas com os esforços correspondentes e respectivos limites de suportabilidade, o programa fornece os resultados indicados na Figura 6.26 e Figura 6.27.

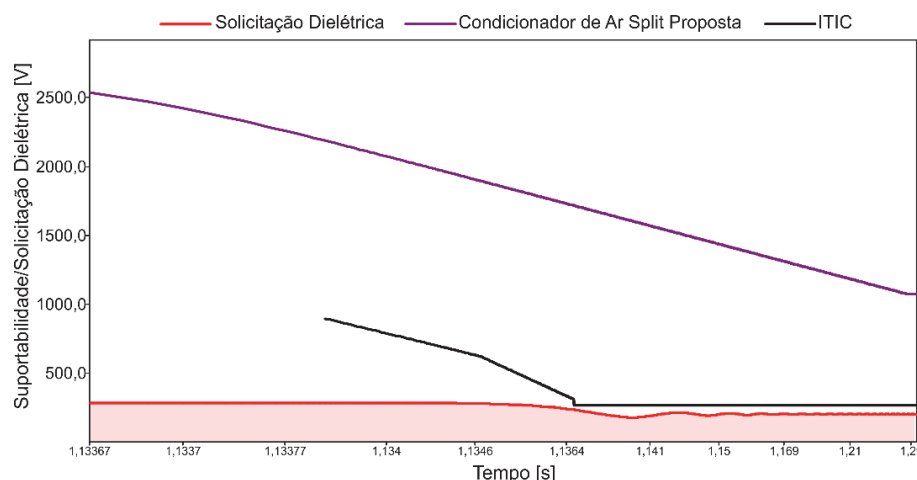


Figura 6.26 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica no condicionador de ar Split - Caso 01-E

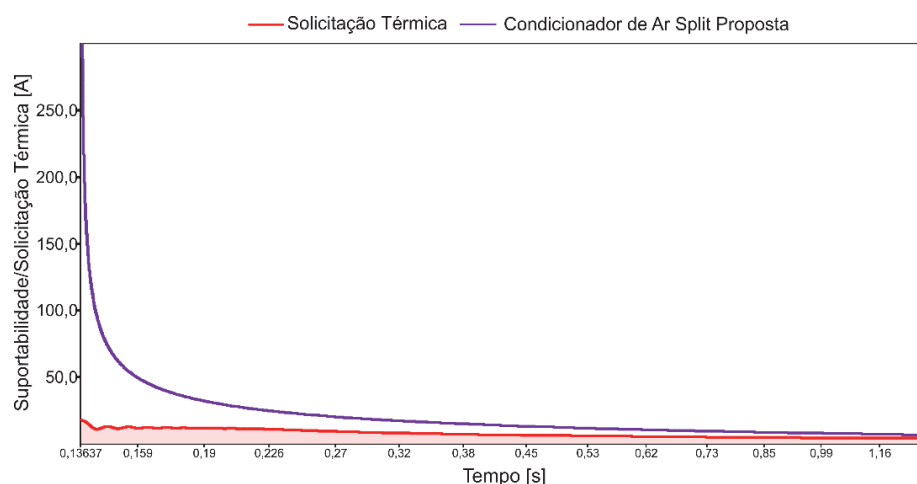


Figura 6.27 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica no condicionador de ar Split - Caso 01-E

Por fim, destaca-se que, também para o presente processo avaliativo, não houve violação dos níveis de tensão e corrente admissíveis.

6.3.2 Caso 02: Incidência de descarga atmosférica direta e indireta

As investigações aqui conduzidas, objetivaram avaliar o PID feito por um consumidor que solicitou ressarcimento de um televisor a LED danificado após uma forte chuva e inúmeras incidências de descargas atmosféricas na região. Vale destacar que esta situação se apresenta como hipotética, visto que, muito embora a manutenção da mesma unidade consumidora já explicitada, o equipamento adotado não fora efetivamente reclamado.

Em atenção aos procedimentos utilizados pelo APR segue que, num primeiro momento, a partir do identificador do consumidor, este seria configurado no *software* de modo similar ao já descrito. Quanto ao ponto físico escolhido para a incidência da descarga utilizada, este foi pouco

distante da subestação que alimenta a rede de distribuição que o alimenta, como indicado na Figura 6.9.

6.3.2.1 Caso 2.1: Incidência Direta

Esta situação encontra-se atrelada com a incidência da descarga atmosférica direta na média tensão. Esta situação se apresenta como referência para análises subsequentes, uma vez que permite estabelecer as bases para comparações que se seguirão.

O fenômeno corresponde a um impulso de corrente, definido por um valor de crista de 40 kA, com 8 μ s de tempo de subida e 20 μ s como tempo de calda. Num primeiro momento, como esclarecido, esta foi considerada como diretamente incidente na fase A. A Figura 6.28 é indicativa do recurso disponibilizado pelo APR para os objetivos aqui postos.

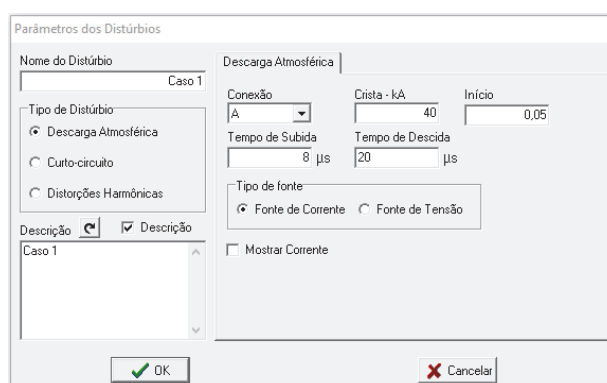


Figura 6.28 Interface do APR para parametrização da descarga atmosférica de incidência direta

A descarga atmosférica foi iniciada em 0,05 segundos e, em decorrência deste fato. Nestas condições, a Figura 6.29 e Figura 6.30 expressam, respectivamente, as solicitações dielétricas e térmicas impostas ao produto sob análise, assim como também seus limites admissíveis.

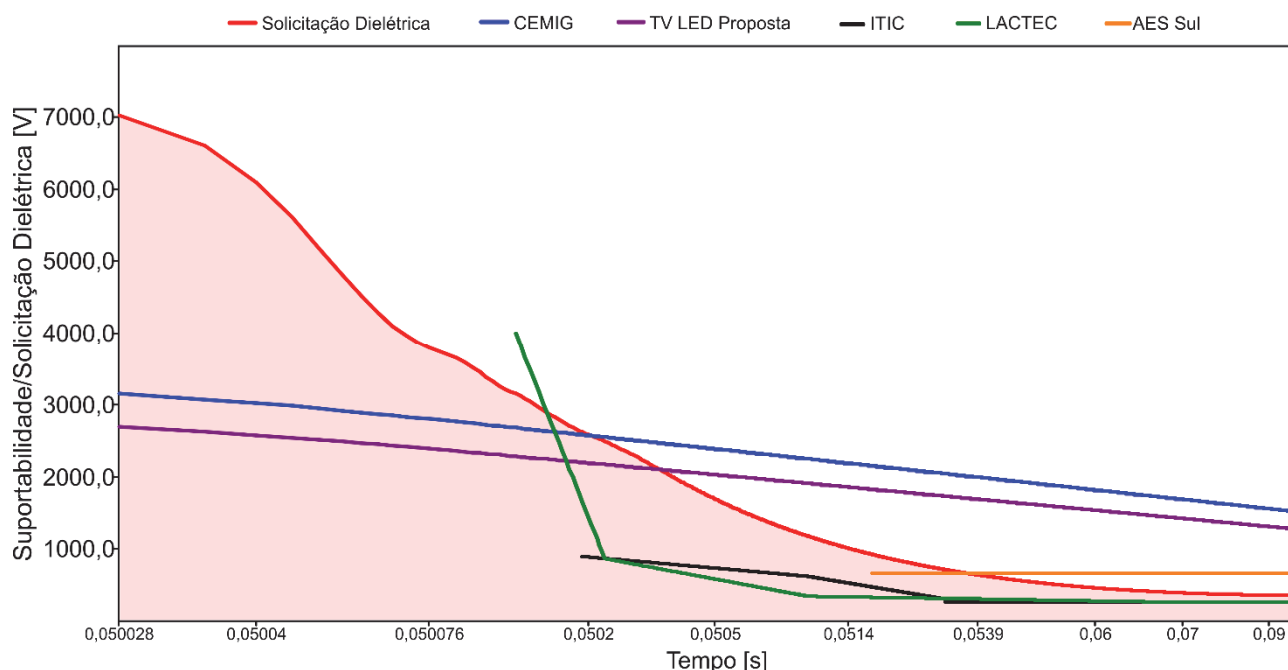


Figura 6.29 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica – Caso 2.1

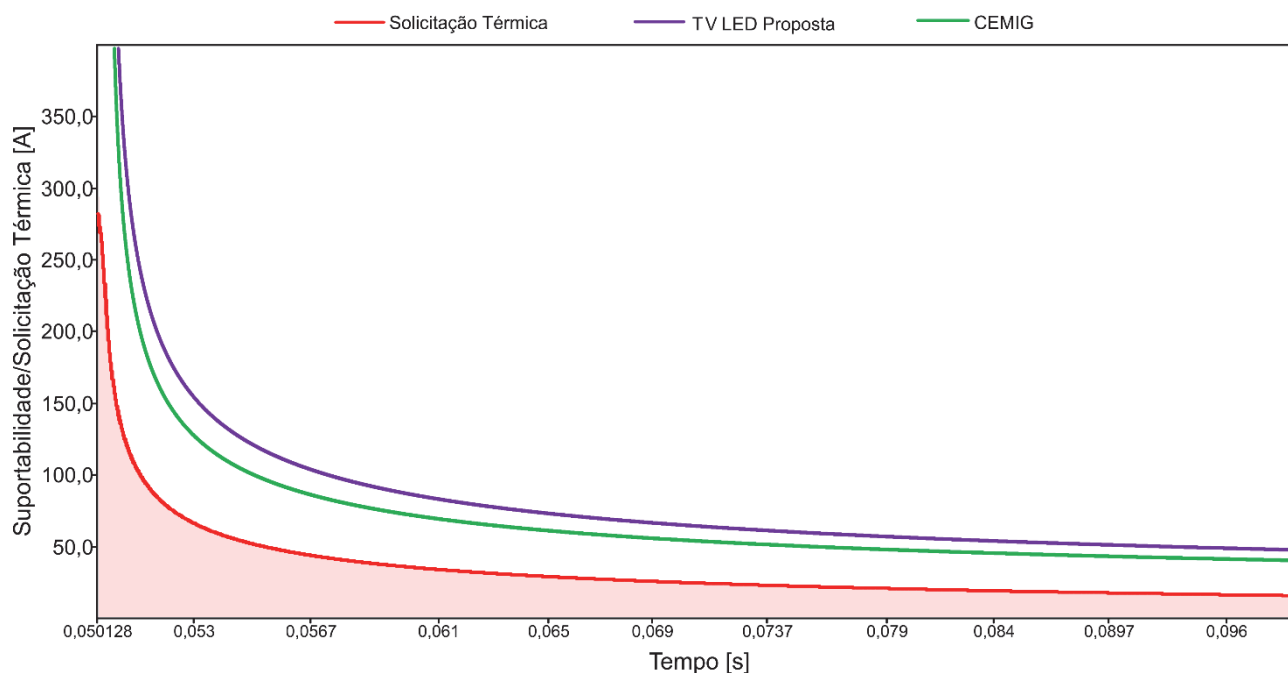


Figura 6.30 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica – Caso 2.1

À luz dos resultados obtidos fica evidenciado que os estudos computacionais apontam para as seguintes constatações:

- Há claras evidências de violação dos níveis de tensão admissíveis pelo equipamento. Portanto, do ponto de vista dielétrico, justifica-se os danos físicos na forma de rompimento da isolamento do televisor a LED;
- Com relação ao limite térmico, não há indicativos que o fenômeno seja capaz de produzir danos, visto que nenhum limite utilizado nos estudos foi ultrapassado;
- Parecer final: solicitação de PID procedente.

6.3.2.2 Caso 2.2 – Incidência Indireta: Distância variável e corrente com valor de crista fixo

Diferentemente da parametrização de uma descarga direta, a qual é feita diretamente nas telas de acesso do APR, para a presente situação deve-se recorrer à estratégia descrita e aplicável para os estudos da correlação causa efeito advindas da manifestação de fenômenos indiretos e com potencialidade, via induções eletromagnéticas, de violar os limites de suportabilidade de ordem dielétrica e térmica.

Em consonância com as etapas já descritas, o primeiro passo consiste na inserção dos parâmetros da corrente de descarga nos termos estabelecidos pela interface com o usuário implementada na seção 6.2.3 e mostrada na Figura 6.31. Para o caso em pauta foi utilizada uma corrente impulsiva, de crista igual a 40 kA com tempo de subida de 8 μ s e uma rede de distribuição com altura padrão (h) de 12 metros do solo.

Dentro destas condições, alterando-se a distância entre a linha e o ponto de incidência, os cálculos são feitos através do Procedimento 2 anteriormente esclarecido.

The screenshot shows the GUI_Inducao window with the following parameters:

Parâmetros da Corrente de Retorno		Parâmetros Geométricos da Rede	
Amplitude	40 [kA]	Altura da Linha de Distribuição com relação ao solo	12 [m]
Tempo de Frente	8 [us]	Menor distância entre a linha e o ponto de incidência	50 [m]
Constante "Alfa"	1.4203E+04	Local de interesse na linha com relação a referência	0 [m]
Constante "Beta"	4.8804E+06		
Constante "Amp"	1.4690E+05		
Tempo Máximo de Simulação	100 [us]		
Passo de Integração	1E-06 [us]		

Visualizar a Tensão Induzida:

- ☐ Procedimento 1: Corrente de Retorno do Tipo Degrau
- ☒ Procedimento 2: Corrente de Retorno do Tipo Rampa
- ☐ Procedimento 3: Corrente de Retorno do Tipo Dupla Exponencial

Exportar Resultado para APR:

- ☐ Procedimento 1: Corrente de Retorno do Tipo Degrau
- ☒ Procedimento 2: Corrente de Retorno do Tipo Rampa
- ☐ Procedimento 3: Corrente de Retorno do Tipo Dupla Exponencial

Buttons: Plotar Gráfico, Gerar Cartão Para o APR

Figura 6.31 Parametrização dos dados para obtenção da tensão induzida – Caso 2.2

A Figura 6.32 ilustra o comportamento das tensões induzidas considerando-se 4 (quatro) distâncias que foram arbitrariamente adotadas para os estudos.

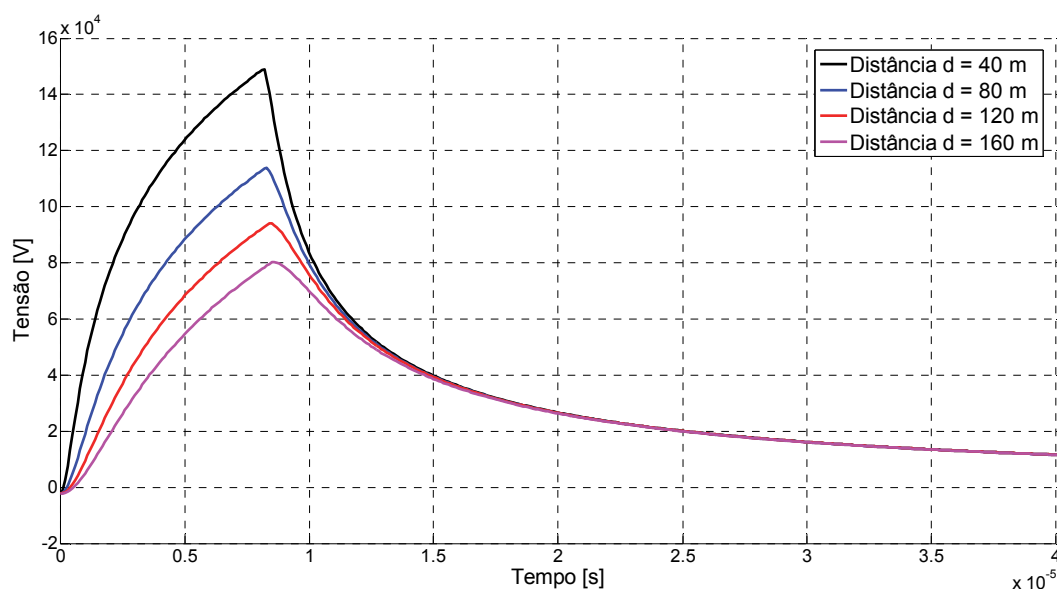


Figura 6.32 Tensões induzidas utilizadas para as análises do Caso 2.2 – influência da distância entre o ponto de incidência da descarga e a localização física da rede de distribuição

Uma vez determinados os vetores representativos dos fenômenos das induções, via plataforma MATLAB, através do recurso “fonte de tensão” do APR, tais informações são prontamente

transferidas ao APR. Feito isto, os resultados das avaliações da correlação entre os esforços e os limites admissíveis, tanto quanto às questões dielétricas como térmicas, encontram-se indicados na Figura 6.33 e Figura 6.34.

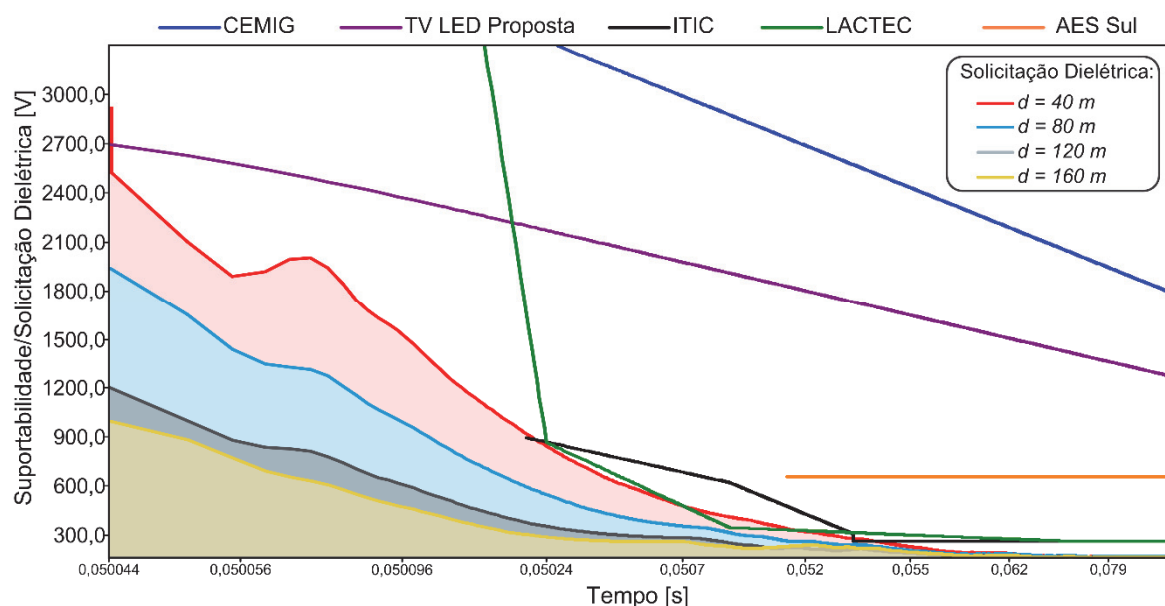


Figura 6.33 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica – Caso 2.2

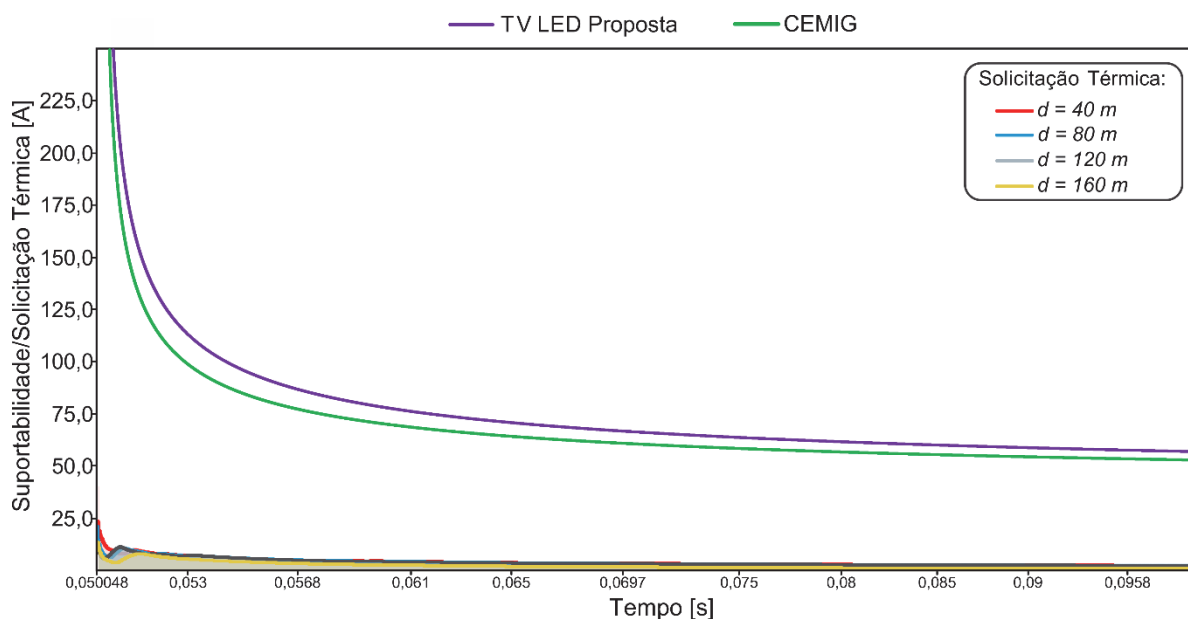


Figura 6.34 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica – Caso 2.2

À luz dos resultados obtidos fica evidenciado que os estudos computacionais apontam para as seguintes constatações:

- Houve violação dos níveis de tensão admissíveis apenas para a descarga incidente a 40 metros da linha. Portanto, do ponto de vista dielétrico, há possibilidade de danos físicos;

- Com relação ao limite térmico, não há indicativos que o fenômeno seja capaz de produzir danos no equipamento analisado, para qualquer dos limites mencionados nesta tese;
- Parecer final: solicitação de PID procedente.

6.3.2.3 Caso 2.3 – Incidência Indireta: Distância fixa e corrente com valor de crista variável

O mesmo procedimento acima utilizado é também obedecido para o caso em questão, exceto pelo fato que a distância física é mantida constante e igual a 50 m, enquanto que a corrente tipo impulso se apresenta com um valor de crista variável, mantendo-se, todavia, seu tempo de subida em 8 μ s. Nestas condições, a Figura 6.35 é indicativa dos valores obtidos para as induções eletromagnéticas na linha de distribuição.

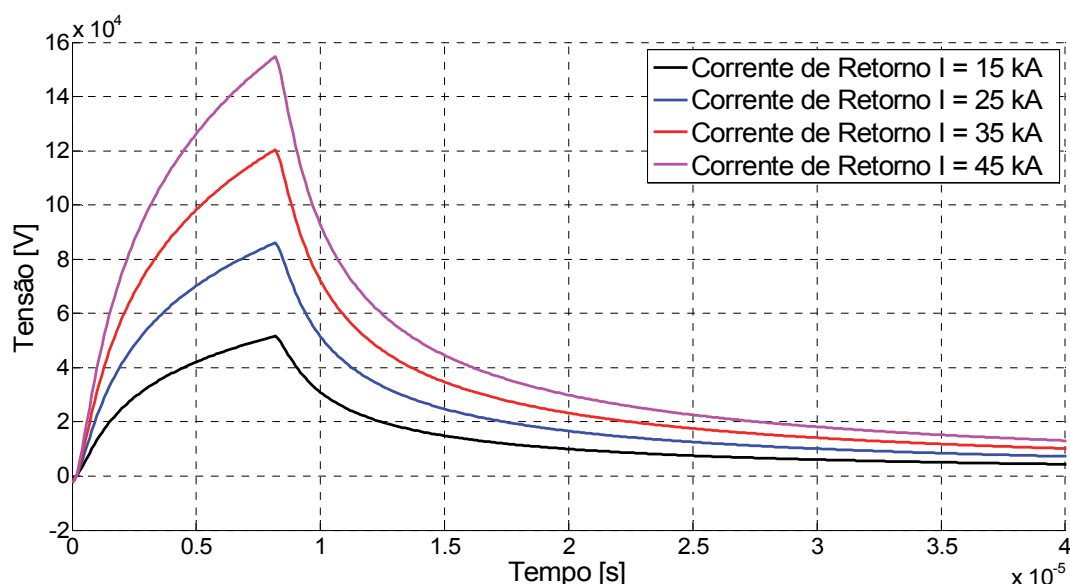


Figura 6.35 Tensões induzidas utilizadas para as análises do Caso 2.3 – influência do valor de crista da corrente impulso com distância constante entre o ponto de incidência e da rede de distribuição

Na Figura 6.36 tem-se as solicitações dielétricas e os limites de suportabilidade do televisor a LED. As solicitações térmicas são apresentadas na Figura 6.37.

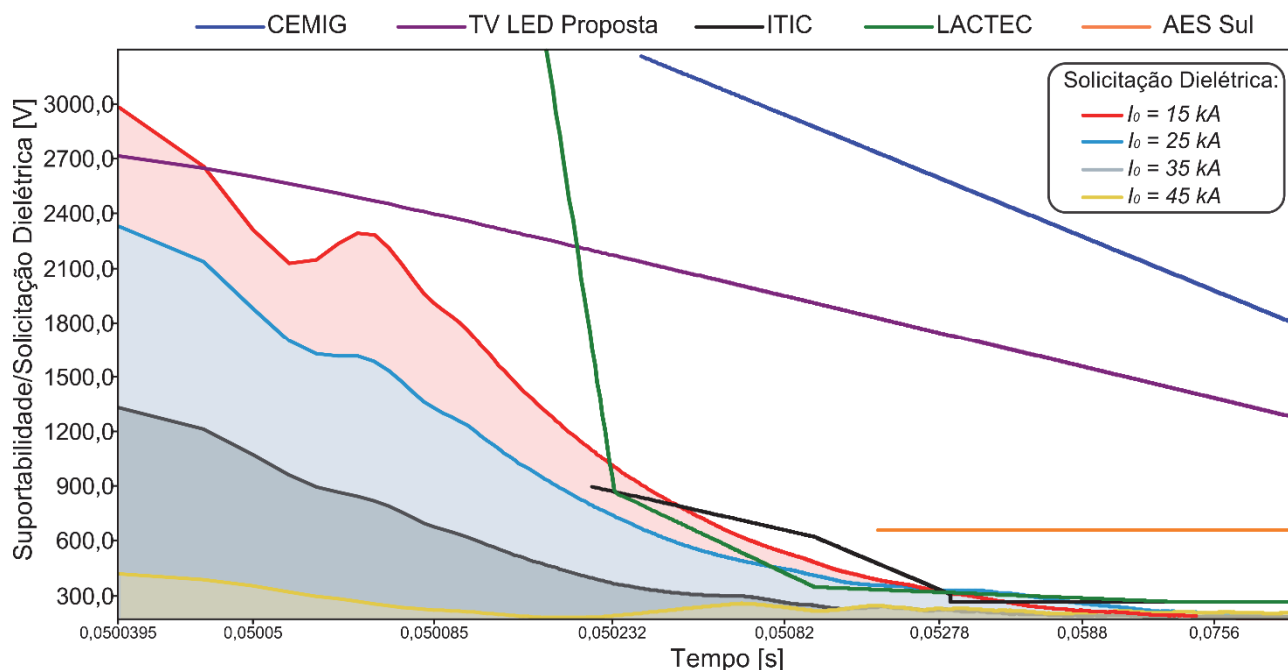


Figura 6.36 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade dielétrica – Caso 2.3

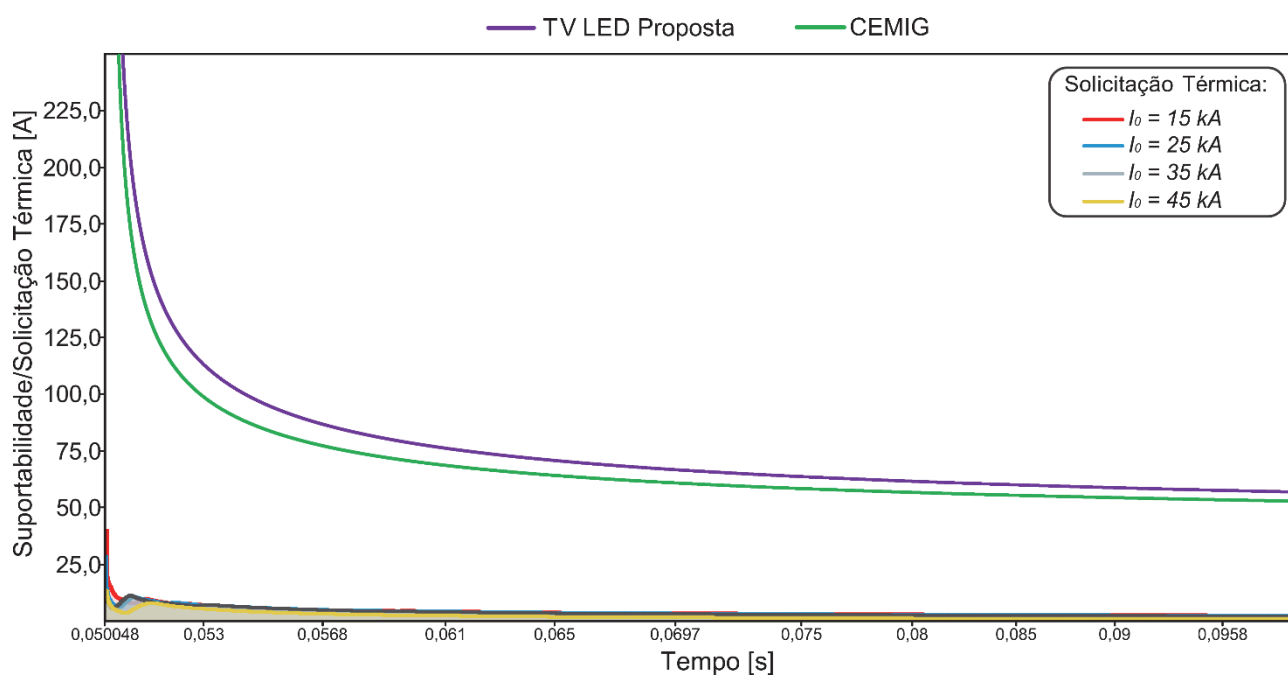


Figura 6.37 Correlação entre os esforços e os limites de suportabilidade térmica – Caso 2.3

À luz dos resultados obtidos fica evidenciado que os estudos computacionais apontam para as seguintes constatações:

- Houve violação dos níveis de tensão admissíveis apenas para a descargas incidente com valor de crista de 35 e 45 kA;
- Com relação ao limite térmico, não há indicativos que o fenômeno seja capaz de produzir danos no equipamento analisado;
- Parecer final: solicitação de PID procedente.

6.4 Considerações finais

Este capítulo focou, sobremaneira, a questão da inserção no APR dos avanços propostos pela presente tese, fato este que conduziu a ampliações e novos horizontes aplicativos para o *software* de análise destinado a avaliação donexo causal requerido pelos processos de PIDs.

Quanto ao número de dispositivos eletroeletrônicos agora disponibilizados pelo aplicativo, com a inserção da modelagem dos televisores de LED, torna-se possível a realização dos estudos para 34 produtos distintos.

Também, um aspecto meritório de destaque refere-se a proposição de limites de suportabilidade para 6 (seis) novos produtos. De fato, na situação original do programa, tais informações, de extrema relevância aos estudos da correlação entre causas e efeitos, se encontravam bastante limitadas quando a natureza dos produtos. As bases de referência anteriormente empregadas se apresentavam apoiadas, na sua maioria, em trabalhos voltados para a indústria da informática e poucos dados foram encontrados para os denominados dispositivos da linha branca. Através da realização de ensaios a nível destrutivo, como exposto no capítulo 3 e 4, foram efetivamente obtidos limites que passaram a compor o processo de análise, com expressivas diferenças em relação ao até então estabelecido.

Uma outra vertente de potencialidade inovadora reveste-se da possibilidade que, o APR, a partir de sua nova versão, passa a disponibilizar meios para a avaliação dos fenômenos associados com a incidência indireta das descargas atmosféricas, tema este de grande aplicabilidade para os estudos de PIDs.

Através da caracterização de situações típicas passíveis de manifestação em campo, foram então conduzidos trabalhos elucidativos sobre a utilização da nova versão do APR, fato este que apontou o reconhecimento dos aprimoramentos introduzidos pela presente tese.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Muito embora ao longo de cada capítulo tenha-se explorado aspectos relacionados com as constatações próprias aos desenvolvimentos feitos, é conveniente, neste momento, apresentar uma síntese dos principais pontos associados com os desenvolvimentos, propostas, metodologias, implementações computacionais, e outras constatações sobre os trabalhos até então realizados no campo de interesse desta pesquisa. Dentro deste enfoque, pode-se reconhecer que a presente pesquisa, nos termos atuais, evidencia significativas contribuições ao estabelecimento de um processo computacional sistematizado para fins da análise dos pedidos de indenização por danos elétricos, em consonância com as diretrizes propostas pelo PRODIST, em seu módulo 9.

O capítulo 1 foi direcionado a uma contextualização do tema central deste trabalho, apresentando, em termos gerais, a atualidade e importância do tema “Ressarcimento de Danos Elétricos”, com destaque a dados estatísticos atuais que indicam o crescimento dos PIDs no Brasil, considerações de ordem jurídica sobre o tema e o presente estado de desenvolvimento da matéria. Somado a tais informações, foram ainda tecidos comentários sobre as técnicas de modelagem destinadas a consideração dos fenômenos anômalos passíveis de ocorrência nas redes elétricas na forma de induções eletromagnéticas atreladas com a incidência de descargas atmosférica. Encerrando o capítulo, foram definidas as principais diretrizes para o presente trabalho de pesquisa, assim como também uma síntese da estrutura completa dessa tese de doutorado.

O capítulo 2 prestou-se, inicialmente, ao propósito de apresentar os eletrodomésticos da linha branca contemplados nessa pesquisa, em que pese seus princípios operacionais e modelagem implementada no simulador ATP e utilizadas no programa APR. Além destas considerações, especial atenção foi dada na direção da obtenção de um modelo computacional dos televisores de LED, com respectiva validação experimental, visto que tal componente ainda não perfazia o elenco de dispositivos disponibilizados no aplicativo de análise. De um modo geral, investigações conduzidas sob condições ideais e não-ideais de suprimento, evidenciaram uma boa correlação entre os resultados de cunho teórico/computacional com aqueles fornecidos dos ensaios, fato este que ratificou, qualitativa e quantitativamente, um bom desempenho da proposta feita.

No que tange aos demais produtos contemplados, estes se apresentaram na forma de uma síntese de trabalhos anteriores visando, sobretudo, estudos posteriores associados com o

estabelecimento de seus limites de suportabilidade quanto aos esforços dielétricos e térmicos impostos pelos distúrbios ocorridos nas redes de suprimento. Nesta categoria encontram-se os refrigeradores, freezers, máquinas de lavar roupas, máquinas de lavar louças e condicionadores de ar Split. A justificativa para a inclusão destes modelos se apoia, fundamentalmente, na inexistência de informações associadas com tais eletrodomésticos, quanto aos seus limites de suportabilidade e sensibilidade às tensões e correntes impostas, os quais foram, na sequência, explorados em detalhes para o estabelecimento das bases para a sustentação dos processos de análise dos pedidos de indenização por danos elétricos.

O capítulo 3, por sua vez, foi dedicado à questão da obtenção de informações sobre os limites de suportabilidade térmica para utilização nos estudos de PIDs, conforme se faz necessário pela metodologia utilizada pelo aplicativo computacional APR. De fato, em consonância com os princípios estabelecidos para este *software*, a ferramenta de análise prima pela correlação entre as causas e os efeitos sobre os equipamentos reclamados pelos consumidores, fato este que orienta para uma correlação entre os esforços impactantes, na forma de tensões e correntes, aqui denominados por esforços dielétricos e térmicos, e os padrões de suportabilidade dos produtos testados.

Focando especificamente as questões de natureza térmica, foram então tecidas considerações acerca do estado da arte sobre a disponibilização de dados aplicáveis à matéria e, ao final, constatado que os dados disponibilizados na literatura se mostraram frágeis e não aplicáveis à toda gama de produtos contemplados nos estudos. Reconhecendo tais limitações e baseado no princípio da energia necessária para ocasionar danos de natureza física, foi estabelecida uma metodologia matemática, que requer, para sua aplicação, dados advindos de experimentos laboratoriais com potencial para ocasionar danos físicos nos produtos de interesse.

Para tanto, foram definidos os requisitos de teste e a estrutura física laboratorial capaz de atender os objetivos aqui delineados. Para tanto, como esclarecido no texto, foi utilizado um arranjo disponibilizado na UNIFEI, o qual foi disponibilizado como cortesia para os fins aqui postos. Estabelecido o arranjo e realizada a parametrização necessária, foram então conduzidos testes para os equipamentos focados nesta tese, a saber: TV a LED, refrigerador, freezer, máquina de lavar roupa, máquina de lavar louças e condicionador de ar Split.

Feitos os testes e obtidas as informações requeridas, é importante ressaltar que os resultados obtidos não puderam ser correlacionados com informações outras, visto a inexistência de outras propostas nas publicações consultadas. O único ponto de destaque refere-se a questão dos televisores, visto que trabalhos anteriores feitos por pesquisadores da UFU apresentaram, no passado, limites aplicáveis a aparelhos televisores, todavia, do tipo de tubo de raios catódicos.

Por fim, destaca-se que as informações aqui obtidas, muito embora se apresentem como informações relevantes e originais, estão atreladas com os produtos testados e, certamente, a extensão

dos resultados para outros com características, marcas e modelos distintos, se apresenta como tema para futuras investigações.

Com uma estrutura filosófica similar ao do capítulo anterior, a sequência dos trabalhos foi dedicada a obtenção dos limites de suportabilidade dielétrica e de sensibilidade operacional às tensões para os equipamentos eletroeletrônicos contemplados nesta tese. Visando os estudos relacionados com os limites de suportabilidade das tensões, este desempenho foi considerado na forma da composição de três regiões distintas, cada qual associada com fenômenos típicos manifestados nas redes elétricas. Uma primeira envolvendo maiores níveis de tensão, porém com pequenas durações, como é o caso das descargas atmosféricas. Uma segunda atrelada com fenômenos oscilatórios, acompanhados de tensões em proporções inferiores à primeira, todavia, com duração de tempo superior. Por fim, uma terceira região é estabelecida, desta feita destinada a avaliação do desempenho dos produtos diante de sobretensões típicas à 60 Hz.

Os procedimentos empregados para realização dos testes destinados a obter os limites de sensibilidade operacional, por sua vez, foram realizados em consonância com recursos e metodologia esclarecidos no texto.

Uma vez estabelecidas as metodologias e os meios experimentais, foram então realizados ensaios para os seis produtos considerados nesta pesquisa. Respeitadas as considerações já esclarecidas sobre a questão dos limites de suportabilidade quanto às tensões atmosféricas, chegou-se a um conjunto de indicativos, expressos de forma matemática e gráfica, que passaram a oferecer um banco de dados com informações importantes ao processo de análise dos PIDs.

Respeitadas as limitações impostas pela inexistência de valores referenciais, os resultados obtidos foram correlacionados com curvas similares e, de um modo geral, foi possível constatar que, para aquelas disponibilizadas, os desempenhos aqui obtidos mostraram mais conservadoras.

Avançando, o capítulo 5 foi centrado na busca de meios para a determinação das tensões induzidas eletromagneticamente em pontos das redes elétricas. Lembrando que os estudos da correlação entre a incidência de descargas atmosféricas de forma direta sobre os condutores já foram contemplados em trabalhos anteriores, resta que os fenômenos associados com as denominadas incidências indiretas e respectivos efeitos na forma de induções elétricas e magnéticas, até a presente pesquisa, não foram considerados aos fins aqui desejados.

Tendo por foco os objetivos centrais desta pesquisa, da confiabilidade já comprovada, grande difusão e aceitação do denominado Método de Rusck, a opção aqui feita recaiu sobre esta estratégia como meio para correlacionar os fenômenos das descargas atmosféricas indiretas. Para tanto, muito embora o reconhecimento que os desenvolvimentos de carácter descritivo não tenham sido inovadoras, o direcionamento da metodologia proposta por Rusck se apresenta como ferramenta com pouca difusão para os fins aqui esperados, fato este que motivou os detalhamentos realizados. Como

visto, os processos para a determinação das induções eletromagnéticas foram caracterizados na forma de três procedimentos. Um primeiro utilizando uma forma de onda em degrau para o surto de corrente, um segundo na forma de rampa e, por fim, um terceiro, utilizando a tradicional forma padrão $1,2 \times 50 \mu s$. Estabelecidas tais possibilidades, estudos de cunho computacional apontaram para que o denominado Procedimento 2, diante de expectativas físicas, se mostrou mais consistente com a realidade física e foi, por tal motivo, selecionado para os trabalhos associados com os PIDs.

Por fim, os desenvolvimentos e contribuições feitas foram, no capítulo 6, incorporados ao *software* de análise APR, passando tal ferramenta, a partir de agora, a possibilitar novos horizontes aplicativos para a avaliação donexo causal requerido pelos processos de PIDs. Somado a estrutura de produtos passíveis de análise, que passa a ser constituída por 34 produtos distintos, outro aspecto meritório de destaque refere-se a proposição de limites de suportabilidade para 6 (seis) novos produtos. Ainda, uma outra inovação quanto a potencialidade de estudos reveste-se da possibilidade que, o APR, a partir de sua nova versão, disponibiliza meios para a avaliação dos fenômenos associados com a incidência indireta das descargas atmosféricas, tema este de grande aplicabilidade para os estudos de PIDs.

Através da caracterização de situações típicas passíveis de manifestação em campo, foram então conduzidos trabalhos elucidativos sobre a utilização da nova versão do APR, fato este que apontou o reconhecimento dos aprimoramentos introduzidos pela presente tese.

Não obstante os avanços oferecidos por esta tese, fica aqui registrado o reconhecimento que os trabalhos pertinentes ao tema são ainda merecedores de estudos complementares, até que o aplicativo APR possa atingir um nível de segurança e confiabilidade que resulte na sua utilização como ferramenta de análise para a avaliação da consistência ou não do nexo causal associado com os pedidos de indenização por danos em consumidores.

A título de exemplificação destes novos horizontes de desafios ressalta-se:

- Maiores investigações experimentais associadas com a obtenção de informações próprias às regiões 1 dos limites de suportabilidade dielétrica para os produtos;
- Realizar estudos mais abrangentes sobre a diversidade de produtos e seus respectivos limites de suportabilidade e sensibilidade, incorporando modelos distintos de eletrodomésticos de uma mesma categoria, tempo de uso, avaliações estatísticas, dentre outros aspectos;
- Comprovação experimental dos modelos estabelecidos para a inclusão dos fenômenos associados com a incidência de descargas atmosféricas indiretas;
- Aprimoramento do *software* de análise, através de um processo sistematizado dispensando a intervenção humana na elaboração dos resultados, de modo a isentar possíveis equívocos e manipulações humanas, permitindo aos agentes fiscalizadores

facilidade de acesso às informações, visando adequação ao padrão de arquivo proposto no Módulo 10 do PRODIST.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. Granaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2a. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [2] M. H. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. Piscataway: IEEE Press, 2000.
- [3] K. Ermeler, W. Pfeiffer, D. Schoen, and M. Schocke, "Surge immunity of electronic equipment," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 12–16, 2000. <https://doi.org/10.1109/57.833656>
- [4] H. R. P. M. Oliveira, N. C. JESUS, and M. L. B. MARTINEZ, "Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaios de Sobretensões," in XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005.
- [5] M. D. Teixeira et al., "Acceptable power quality limits to avoid damages in appliances," *WSEAS Trans. Circuits Syst.*, vol. 4, pp. 479–485, 2005.
- [6] ANEEL, "Resolução Normativa No 345," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2008.
- [7] A. S. Jucá, "Avaliação do Relacionamento entre Consumidores e Concessionárias na Solução de Conflitos por Danos Elétricos: Proposta de Adequação," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- [8] ANEEL, "Ouvidoria Setorial em números: 2013," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2013.
- [9] "Agência Nacional de Energia Elétrica," 2015. [Online]. Available: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/indicadores_de_qualidade/pesquisaGeral.cfm?anoInicio=2010. [Accessed: 29-Mar-2016].
- [10] I. N. Gondim, P. H. O. Rezende, J. C. Oliveira, J. R. Macedo Junior, A. C. O. Salomão, and N. Kagan, "Reimbursement Procedure due to Electrical Damages: the Subject Relevance, Juridical Fundamentals, Agency Standards, Analysis Procedures and Trends," *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 10, p. 1/6, 2012.
- [11] S. Cavalieri Filho, *Programa de Responsabilidade Civil*. 2015.
- [12] A. C. Cintra do Amaral, *Concessão de Serviço Público*. São Paulo, 2002.
- [13] E. Landau, *Regulação jurídica do setor elétrico*. Rio de Janeiro - RJ, 2006.
- [14] A. C. O. Salomão, "Uma abordagem jurídica à questão do ressarcimento de danos elétricos pelas distribuidoras de energia," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. <https://doi.org/10.11606/D.3.2012.tde-09052013-103806>
- [15] N. Watson and J. Arrillaga, *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, vol. 39. Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [16] W. Kennedy, *Power Quality Primer*. McGraw-Hill, 2000.
- [17] A. Kusko and M. T. Thompson, *Power Quality in Electrical Systems*, 12st ed. Nova York: McGraw-Hill Professional, 2007.

- [18] ANEEL, "Resolução Normativa No 61," Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2004.
- [19] ONS, "Submódulo 2.2 - Padrões de desempenho da rede básica," Operador Nacional do Sistema, 2002.
- [20] Technical Committee 3 (TC3) of the Information and T. I. Council, "ITIC (CBEMA) curve Application Note." .
- [21] E. F. Fuchs, D. J. Roesler, and K. P. Kovacs, "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage. Part II: Television Sets, Induction Watthour Meters and Universal Machines," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 2, no. 4, pp. 445–453, 1987. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1987.4308128>
- [22] L. M. Anderson and K. B. Bowes, "Effects of power-line disturbances on consumer electronic equipment," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 5, no. 2, pp. 1062–1065, 1990. <https://doi.org/10.1109/61.53122>
- [23] J. C. Smith, J. Lamoree, P. Vinett, T. Duffy, and M. Klein, "The Impact of Voltage Sags on Industrial Plant Loads," in International Conference on Power Quality End-Use Applications and Perspectives, 1991, pp. 171–178.
- [24] Y. Sekine, T. Yamonoto, S. Mori, N. Saito, and H. KuroKawa, "Presents State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasure in Japan," in International Council on Large Electric Systems (CIGRE), 1992.
- [25] S. B. Smith and R. B. Standler, "The effects of surges on electronic applicances," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 7, no. 3, pp. 1275–1282, 1992. <https://doi.org/10.1109/61.141841>
- [26] R. Arseneau and M. Ouellette, "The Effects Of Supply Harmomcs On The Performance Of Compact Fluorescent Lamps," in ICHPS V International Conference on Harmonics in Power Systems., 1992, vol. 8, no. 2, pp. 221–227. <https://doi.org/10.1109/ICHPS.1992.559043>
- [27] W. E. Reid, "Power quality issues-standards and guidelines," in IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, vol. 32, pp. 108–115. <https://doi.org/10.1109/28.502175>
- [28] K. J. Cornick and H. Q. Li, "Power quality and voltage dips: problem, requirements, responsibilities," in International Conference onAdvances in Power System Control, Operation and Management., 2000, vol. 1, pp. 149–156. <https://doi.org/10.1049/cp:20000382>
- [29] A. C. D. Santos, "Desempenho de fontes lineares e chaveadas no contexto da qualidade da energia elérica," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- [30] A. C. Azevedo, "Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [31] B. C. Carvalho, "Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- [32] R. N. Magalhães, "Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- [33] R. A. Peniche, "Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia – Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [34] C. E. Tavares, "Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos diante de Distúrbios da Qualidade da Energia – Enfoque: Televisores, VCR's e Som," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- [35] H. R. P. M. Oliveira, N. C. Jesus, and G. B. Viecili, "Sensibilidade de Equipamentos Eletrodomésticos Submetidos a Afundamentos de Tensão," in XVIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005.

- [36] Electric Power Research Institute, "Ride-trough Performance of Programmable Logic Controllers," *Power Qual. Test. Netw.*, vol. 39, 2007.
- [37] C. E. Tavares, "Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento de Danos a Consumidores," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [38] I. N. Gondim, J. A. Barbosa, J. C. Oliveira, C. E. Tavares, and A. C. Delaiba, "Uma Estratégia para Obtenção dos Limites de Suportabilidade Dielétrica e Térmica de Equipamentos com Foco aos Pedidos de Indenização por Danos," *Rev. Eletrônica Potência – SOBRAEP*, vol. 17, pp. 651–659, 2012.
- [39] IEC, "Electromagnetic compatibility (EMC): Part 4-5: Testing and measurement techniques: Surge immunity test," IEC Std 61000-4-5, 1995.
- [40] IEEE, "IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances," IEEE Std 1250-1995, vol. 1995, pp. 1–64, 2002.
- [41] S. W. Meyer and T. Liu, *Alternative Transients Program (ATP) - Rule Book*. 1992.
- [42] I. A. Bacca, "Modelagem para Análise de Desempenho de Equipamentos da Linha Branca diante de Distúrbios de Qualidade da Energia," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [43] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, *PRODIST - Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos*. Brazil, 2012, p. 22.
- [44] ABRADÉE, "Procedimento para Análise de Solicitação de Ressarcimento de Danos Materiais a Terceiros," Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, 2003.
- [45] ANEEL, "Ressarcimento de Danos em Equipamentos Elétricos Causados por Descargas Atmosféricas e Manobras," Agência Nacional de Energia Elétrica – Superintendência de Mediação Administrativa Setorial, Brasília, 2002.
- [46] F. J. Pazos, J. Amantegui, F. Ferrandis, and A. Barona, "Sobretensões em Sistemas de BT devidas a manobras na média tensão," *Rev. Eletr. Mod.*, 2008.
- [47] B. R. Costa and V. J. Luciano, "Uma Nova Abordagem Técnica sobre a Queima de Equipamentos em Análises de Ressarcimento de Danos," in *XVII SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*, 2006.
- [48] K. Scheibe, J. Schimanski, M. Wetter, and H. Altmaier, "Danos a Equipamentos Eletroeletrônicos Causados por Raios a Longas Distâncias," *Rev. Eletr. Mod.*, 2007.
- [49] A. A. Shiga, A. Piantini, and C. A. G. Pegollo, "Custos Relativos a Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição de Energia," in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, 2006.
- [50] ABNT, "NBR 5410 – Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão," Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- [51] J. A. Cipoli, E. D. B. Nogueira, and A. J. S. Rios, "Ressarcimento de Danos Elétricos," in *II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 2003.
- [52] J. N. Garcez et al., "Rede Neural de Ativação Interativa Competitiva – IAC para Auxílio à Tomada de Decisão sobre Responsabilidade por Danos em Consumidores de Energia Elétrica," in *II CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 2003.
- [53] M. V. B. Mendonça, "Contribuições ao Processo Computacional para Análise de Pedidos de Indenização por Danos em Equipamentos Elétricos," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

- [54] K. W. Wagner, *Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln*. B. G. Teubner, 1908.
- [55] L. V Bewley, "Traveling Waves Due to Lightning," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, no. 3. pp. 1050–1064, 1929. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1929.5055349>
- [56] C. F. Wagner and G. D. Mccann, "Induced voltages on transmission lines," *Electrical Engineering*, vol. 61, no. 12. pp. 916–929, 1942. <https://doi.org/10.1109/EE.1942.6435476>
- [57] R. H. Golde, *Indirect Lightning Surges on Overhead Distribution Lines*. British Electrical & Allied Industries Research Association, 1954.
- [58] S. Rusck, "Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low Voltage Networks," *Transactions of the Royal Institute of Technology*, 1957.
- [59] CIGRE Working Group 33.01 (Lightning), "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines." CIGRE Brochure 63, Paris, 1991.
- [60] "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," *IEEE Std 1410-2010 (Revision of IEEE Std 1410-2004)*. pp. 1–73, 2011.
- [61] M. Rubinstein and M. A. Uman, "Transient electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole, revisited," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 33, no. 4, pp. 312–320, 1991. <https://doi.org/10.1109/15.99112>
- [62] M. Rubinstein and M. A. Uman, "Methods for calculating the electromagnetic fields from a known source distribution: application to lightning," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 31, no. 2, pp. 183–189, May 1989. <https://doi.org/10.1109/15.18788>
- [63] S. Yokoyama, "Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, no. 1, pp. 100–108, Jan. 1984. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1984.318583>
- [64] E. J. Ribeiro, "Uma Contribuição ao Estudo dos Campos Eletromagnéticos Gerados por Descargas Atmosféricas," *Universidade Federal de Minas Gerais*, 2005.
- [65] A. F. L. da Fonseca, "Cálculo Analítico do Campo Eletromagnético e da Resposta Transitória de Uma Linha Unifilar Infinita Devido à Incidência de Uma Descarga Atmosférica Sobre Um Solo de Resistividade Nula," *Universidade Federal de Minas Gerais*, 1990.
- [66] E. W. Porto, "Cálculo de Sobreensões em Linhas de Distribuição Devido a Descargas Atmosféricas Laterais," *Universidade Federal de Minas Gerais*, 1990.
- [67] I. J. da S. Lopes, "Estudo do Comportamento de um Condutor Multiaterrado Frente a Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas," *Universidade Federal de Minas Gerais*, 1990.
- [68] W. do C. Boaventura, "Estudos da Tensão Induzida em Linhas Aéreas por Descargas Atmosféricas Utilizando Técnicas de Modelo Reduzido," *Universidade Federal de Minas Gerais*, 1990.
- [69] A. PIANTINI, "Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas," *Universidade de São Paulo, USP*, 1991.
- [70] A. PIANTINI, "Tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas aéreas, rurais e urbanas, considerando diferentes métodos de proteção -modelagens teórica e experimental e aplicação ao cálculo de interrupções," *Universidade de São Paulo, USP*, 1997.
- [71] A. Piantini and J. M. Janiszewski, "Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 5, pp. 2799–2802, 1998. <https://doi.org/10.1109/20.717651>

- [72] A. PIANTINI and J. M. JANISZEWSKI, "The extended Rusck model for calculating lightning induced voltages on overhead lines," 2003, pp. 151–155.
- [73] J. O. S. Paulino, "Uma Contribuição ao Estudo da Proteção de Redes Elétricas Contra Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas," Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 1994.
- [74] J. P. da Silva, "Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP," Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [75] T. A. S. de Oliveira, "Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica em Linhas Aéreas de Energia e Cabos Telefônicos: Uma Abordagem pela Teoria de Circuitos," Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [76] R. Thomazella, "Implementação Computacional Para Avaliar os Níveis de Sobretensões Atmosféricas Induzidas em Linhas de Distribuição," Universidade Federal Paulista, 2004.
- [77] I. N. Gondim, "Contribuições para o Aplicativo APR: Novos Limites de Suportabilidade, Perturbações via Medições e Sistematização no Processo da Configuração da Rede Elétrica," Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [78] "IEEE Recommended Practice--Adoption of IEC 61000-4-15:2010, Electromagnetic compatibility (EMC)--Testing and measurement techniques--Flickermeter--Functional and design specifications - Redline," IEEE Std 1453-2011 - Redline. pp. 1–89, 2011.
- [79] P. H. O. Rezende, "Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.
- [80] "Manuais da Empresa Tecumseh do Brasil." [Online]. Available: www.tecumseh.com.br. [Accessed: 07-Jun-2008].
- [81] P. C. Krause, "Simulation of Unsymmetrical 2-Phase Induction Machines," Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 84, no. 11. pp. 1025–1037, 1965. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1965.4766134>
- [82] C. J. Ávila, "Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores Integradas ao APR e ao Banco de Dados da CEMIG Distribuição S. A.," Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [83] J. M. Borges, "Desenvolvimento de uma Metodologia para Análise de Ressarcimento de Aparelhos de Som Associados aos Distúrbios na Rede Elétrica da CEMIG Testando Dispositivos Mitigadores," Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [84] E. A. Martins, "Elaboração de Curvas de Suportabilidade para Microcomputadores e Estudos de Desempenhos de Dispositivos Mitigadores para Subsidiar PIDs," Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- [85] "IEEE Standard for Performance of Low-Voltage Surge-Protective Devices (Secondary Arresters)," IEEE Std C62.34-1996. p. i-15, 1997.
- [86] "IEEE Recommended Practice on Surge Voltages in Low-Voltage AC Power Circuits," p. 1, 1991.
- [87] "IEEE Recommended Practice on Surge Testing for Equipment Connected to Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits," p. 0_1-85, 2003.
- [88] M. V. B. Mendonça et al., "Modelagem de Equipamentos Eletroeletrônicos Utilizando Fontes Lineares e Chaveadas sob Condições Não Ideais de Alimentação na Plataforma ATP," Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE. Santos - SP, 2007.
- [89] I. of E. and E. Engineers, IEEE Standard 446-IEEE Recommended Practice For Emergency

- And Standby Power Systems For Industrial And Commercial Applications. .
- [90] IEC 61000-4-11 ("Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Testing and Measurements Techniques – Section 11: Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests"). 2004.
 - [91] M. D. Teixeira et al., "Acceptable power quality limits to avoid damages in appliances," WSEAS Trans. Circuits Syst., vol. 4, pp. 479–485, 2005.
 - [92] H. R. P. M. de Oliveira, N. C. de Jesus, G. B. Viegas, C. F. B. Nonenmacher, and Fabiano Tondello Castoldi, "Avaliação do Desempenho de Equipamentos Eletrodomésticos Durante Ensaios Resultados De Simulações (Sobretensões)," in Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE, 2005, p. 8.
 - [93] "International Standard IEC 60831-1 Shunt power capacitors of the self healing type for ac systems having a rated voltage up to and including 1000 V." .
 - [94] M. A. Uman, "Natural lightning," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 3, pp. 785–790, 1994. <https://doi.org/10.1109/28.293729>
 - [95] R. P. Starling, "Estudo da Aplicação da Teoria de Rusck e de Modelos Probabilísticos ao Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas," Universidade Federal de Minas Gerais, 1992.
 - [96] P. C. A. Mota, "Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
 - [97] V. L. Coelho, "Influência das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Sistemas Aéreos de Distribuição de Energia Elétrica," Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
 - [98] O. P. Junior et al., "Identificação e monitoramento de tempestades com potencial de afetar a rede de distribuição da Ampla em tempo real e estudos de pós-operação," in XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2008, p. 6.
 - [99] O. Pinto, K. P. Naccarato, I. R. C. A. Pinto, W. A. Fernandes, and O. P. Neto, "Monthly distribution of cloud-to-ground lightning flashes as observed by lightning location systems," Geophys. Res. Lett., vol. 33, no. 9, 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GL026081>
 - [100] I. N. Gondim, "Contribuições para o aplicativo APR: Novos limites de suportabilidade, perturbações via medições e sistematização no processo da configuração da rede elétrica," Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

APÊNDICE A

Cartão do ATP Referente ao Televisor a LED

```

KARD  3  3  3  4  5  5  5  6  6  7  8  8  9  9 10 14 15 15 16 16 17 17 18 18 19
      19 20 21 22 22 23 23 24 25 26 26 27 27 28 29 29 30 30 31 31 32 32 33 34 34
      35 35 36 37 37 38 40 41 41 42 43 43 44 44 45 45 46 46 47 47 48 48 48 49 49
      49 51
KARG-10-11-12-11-10-13-21-10-13-10 -2-15-15-16 -2-14-18-19-18-20-18-20 -3-20-18
      -19 -3-20 -2-20 -2 -3 -2 -5 -3-19 -4 -5 -5 -2 -7 -2 -9 -6-20 -3 -8 -3 -2 -3
      -2-20-20-11-21-17 -6 -7-20 -8 -3 -9 -3 -4  2-14  1  3-10-11 -2-16-17 -2-10
      -15-21
KBEG  22 13  3  3 13 22  3 22  3  3 13  3 19  3  3  9  3  9  3  9  3  9  3  9  9
      3  3  9  3  9  3  9  9  9  9  3  3  9  3  9  3  9  3  3  9  9  3  9  9  3
      9  3  9  3  9  9  9  9  3  9  3  9  3  9  9  3  3 80  3  9  3 71  9  9  3
      71  3
KEND  27 18  8  8 18 27  8 27  8  8 18  8 24  8  8 14  8 14  8 14  8 14  8 14 14
      8  8 14  8 14  8 14 14 14 14  8  8 14  8 14  8 14  8  8 14 14  8 14 14  8
      14  8 14  8 14 14 14 14  8 14  8 14 14  8  8 80  8 14  8 76 14 14  8
      76  8
KTEX  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1
      1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1
      1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  1  0  1  1  1  1  1  1  1
      1  1
$ERASE
C *****
C *****
/TACS
98XX0065  = XX0060 * XX0059
91XX0060                                     -1.      100.
98XX0179  = XX0059 - XX0069
98XX0069  = 5.6E+4 / XX0059
90XX0059                                     -1.      100.
98XX0079  = XX0015 .GT. 20
98XX0081  = .NOT. XX0079
90XX0015                                     -1.      100.
C          1          2          3          4          5          6          7          8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R  >< L  >< C  >
C < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R  >< A  >< B  ><Leng><><>0
TRANSFORMER                                TX0001                                0
      9999
1TV__2XX0076                                1.E-5      1.
2XX0093XX0097                                1.E-5      1.
XX0093XX0105                                .6                                0
XX0093XX0105                                900.
XX0024XX0105                                113.64      .22      0
XX0097XX0093                                113.64      .22      0
XX0024                                1250.      .02      0
      XX0105                                1250.      .02      0
XX0015XX0105                                1250.      .02      0

```

```

XX0015XX0024      1250.      .02      0
      XX0015      .11364      180.      0
      XX0026      .54348      46.      0
XX0097XX0024      5.4      0
XX0025XX0026      1.9E4      0
XX0026      11500.      0
XX0032XX0015      .001      0
XX0036XX0015      .001      0
XX0030XX0105      .001      0
XX0034XX0024      .001      0
      XX0024      33.      .3      0
XX0024XX0015      33.      .3      0
XX0105XX0015      33.      .3      0
      XX0105      33.      .3      0
XX0060XX0179      1.2.E3      0
      XX0083      110.      0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
11      XX0030      0
11XX0105XX0032      CLOSED      0
11      XX0034      CLOSED      0
11XX0024XX0036      0
11XX0024XX0025      0
      XX0076TV__4      MEASURING      0
      TV__1TV__2      MEASURING      %
      XX0059XX0060      MEASURING      0
13XX0015XX0083      CLOSED      XX0081      0
13XX0059XX0015      CLOSED      XX0079      0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
60XX0179 0
$EOF      User-supplied header cards follow.      19-Jun-08 17:43:03
ARG TV__1 TV__4 %
NUM %
DUM XX0002 XX0015 XX0024 XX0025 XX0026 XX0030 XX0032 XX0034 XX0036 XX0059
DUM XX0060 XX0065 XX0069 XX0076 XX0079 XX0081 XX0083 XX0093 XX0097 XX0105
DUM XX0179

```

APÊNDICE B

Procedimento computacional para Corrente em Rampa

```

clear all

syms t

%----- Declaração das constantes -----%

u0 = 0.000001256;
E0 = 0.000000000000885418;
x = 0;
zi = 10;
d = 100;
hn = 3000;
I0 = 50000;
b = 0.3;
h = 10;
tf = 4e-6;
tc = 50e-6;
dt = 1e-8;

% ----- Cálculo da Velocidade da Luz no Vácuo ----- %

c = (1/(sqrt(u0*E0)));

% ----- Cálculo da Impedância do Canal de Descarga ----- %

Z0 = ((1/(4*pi))*(sqrt(u0/E0)));

% ----- Cálculo da Distância r0 ----- %

r0 = sqrt((d^2)+(x^2));

% ----- Cálculo do tempo tT ----- %

Tt = ((sqrt((d^2)+(x^2)))/c)+tf;

% ----- Cálculo das variáveis auxiliares ----- %

% -- Para (x) -- %

P = ((b*((c*t)-x))/d);

P1 = b*((sqrt(1+((x/d)^2)))-(x/d));

PT = (b*c*tf)/d;

P_mod = 1 + (((b)+(x/d))/(sqrt((1-(b^2))+((b+(x/d))^2))));

```

```

Ln = log((1+(P^2))/(1+(P1^2)));

LnT = log((1+(P^2))/(1+((P-PT)^2)));

% -- Para (-x) -- %

Pn = ((b*((c*t)+x))/d);

P1n = b*((sqrt(1+((-x/d)^2)))-(-x/d));

P_modn = 1 + (((b)+(-x/d))/(sqrt((1-(b^2))+((b+(-x/d))^2))));

Lnn = log((1+(Pn^2))/(1+(P1n^2)));

LnTn = log((1+(Pn^2))/(1+((Pn-PT)^2)));

% -- Rampa de Corrente -- %

If = (I0/tf)*t;

% -- Derivada das Correntes -- %

Der_If = diff(If,'t');

% -- Tensão Induzida Parcial Unilateral (x) -- %

U1t_If = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If*P_mod*Ln;

U1t_Ic = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If*P_mod*LnT;

% -- Tensão Induzida Parcial Unilateral (-x) -- %

U2t_If = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If*P_modn*Lnn;

U2t_Ic = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If*P_modn*LnTn;

% -- Vetores de Tempo -- %

t_vetor = 0:dt:tc;
t_vetor1 = 0:dt:Tt;
t_vetor2 = Tt:dt:tc;

% -- Vetores de Tensão -- %

U1t_If_vetor = double(subs(U1t_If,t,t_vetor1));
U1t_Ic_vetor = double(subs(U1t_Ic,t,t_vetor2));
U1t = horzcat(U1t_If_vetor,U1t_Ic_vetor);

U2t_If_vetor = double(subs(U2t_If,t,t_vetor1));
U2t_Ic_vetor = double(subs(U2t_Ic,t,t_vetor2));
U2t = horzcat(U2t_If_vetor,U2t_Ic_vetor);

Ut = (U1t + U2t);

% -- Plotar as Tensões -- %

plot(t_vetor,Ut);
grid

```


Interface e Gerações dos Cartões do APR

```

function varargout = GUI_Inducao(varargin)
% GUI_INDUCAO MATLAB code for GUI_Inducao.fig
%   GUI_INDUCAO, by itself, creates a new GUI_INDUCAO or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = GUI_INDUCAO returns the handle to a new GUI_INDUCAO or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   GUI_INDUCAO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in GUI_INDUCAO.M with the given input arguments.
%
%   GUI_INDUCAO('Property','Value',...) creates a new GUI_INDUCAO or raises
the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before GUI_Inducao_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to GUI_Inducao_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help GUI_Inducao

% Last Modified by GUIDE v2.5 28-Oct-2016 09:29:25

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',   @GUI_Inducao_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',    @GUI_Inducao_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',    [] , ...
                  'gui_Callback',     []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before GUI_Inducao is made visible.
function GUI_Inducao_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to GUI_Inducao (see VARARGIN)

% Choose default command line output for GUI_Inducao
handles.output = hObject;

% Update handles structure

```

```

guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes GUI_Inducao wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = GUI_Inducao_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout    cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject      handle to figure
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in checkbox1.
function checkbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to checkbox1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox1

% --- Executes on button press in checkbox2.
function checkbox2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to checkbox2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox2

% --- Executes on button press in checkbox3.
function checkbox3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to checkbox3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of checkbox3

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

clc;
format long;
opengl neverselect;
syms t

objeto1=findobj(gcf,'tag','edit13');
objeto2=findobj(gcf,'tag','edit12');
objeto3=findobj(gcf,'tag','edit3');
objeto4=findobj(gcf,'tag','edit11');

```

```

objeto5=findobj(gcf,'tag','edit4');
objeto6=findobj(gcf,'tag','edit9');
objeto7=findobj(gcf,'tag','edit8');
objeto8=findobj(gcf,'tag','edit5');
objeto9=findobj(gcf,'tag','edit6');
objeto10=findobj(gcf,'tag','edit7');

%----- Declaração das constantes -----%

u0 = 0.000001256;
E0 = 0.00000000000885418;
b = 0.3;
x = str2double(get(objeto1,'String'));
zi = 12;
d = str2double(get(objeto2,'String'));
hn = 3000;
I0 = str2double(get(objeto3,'String'))*1000;
b = 0.3;
h = str2double(get(objeto4,'String'));
tf = str2double(get(objeto5,'String'))*1e-6;
tc = 100e-6;
dt = str2double(get(objeto6,'String'));
tm = str2double(get(objeto7,'String'))*1e-6;
%metodo = 1; % Escolhe qual grandeza gerará o cartão de medição

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo das constantes ----- %

c = (1/(sqrt(u0*E0)));

Z0 = ((1/(4*pi))*(sqrt(u0/E0)));

r0 = sqrt((d^2)+(x^2));

Tt = ((sqrt((d^2)+(x^2)))/c)+tf;

% ----- Método 1 ( Rusck_Puro_Degrau) ----- %

r01 = sqrt((d^2)+(x^2));

t0z1 = ((sqrt((zi^2)+(r01^2)))/c);

Eeiv1 = ((Z0*I0/b)*((1/sqrt(((b*c*t)-zi)^2)+((1-(b^2))* (r01^2))))+(1/(sqrt(((b*c*t)+zi)^2)+((1-(b^2))* (r01^2)))))-(1/(sqrt((hn-zi)^2)+(r01^2)))-(1/(sqrt((hn+zi)^2)+(r01^2))));

Emil = ((-Z0*I0*b)*((1/sqrt(((b*c*t)-zi)^2)+(1-(b^2))* (r01^2))))+(1/sqrt(((b*c*t)+zi)^2)+(1-(b^2))* (r01^2))));

Ei1 = (Eeiv1 + Emil);

U1 = (((Z0*I0*h*b*((c*t)-x))/((d^2)+((b^2)*((c*t)-x)^2)))* (1+((x+(b^2)*((c*t)-x))/sqrt(((b*c*t)^2)+((1-(b^2))* (r01^2))))));
U2 = (((Z0*I0*h*b*((c*t)+x))/((d^2)+((b^2)*((c*t)+x)^2)))* (1+((-x+(b^2)*((c*t)+x))/sqrt(((b*c*t)^2)+((1-(b^2))* (r01^2))))));
Ut1 = U1 + U2;

t1_vetor = t0z1:dt:tm;

Ei1_vetor = double(subs(Ei1,t,t1_vetor));

```

```

U1_vetor = double(subs(U1,t,t1_vetor));
U2_vetor = double(subs(U2,t,t1_vetor));
Ut1_vetor = double(subs(Ut1,t,t1_vetor));

% ----- Método 2 ( Rusck_Modificado_Rampa) ----- %

P_1 = ((b*((c*t)-x))/d);

Pl_1 = b*((sqrt(1+((x/d)^2)))-(x/d));

PT_1 = (b*c*tf)/d;

P_mod_1 = 1 + (((b)+(x/d))/(sqrt((1-(b^2))+((b+(x/d))^2))));

Ln_1 = log((1+(P_1^2))/(1+(Pl_1^2)));

LnT_1 = log((1+(P_1^2))/(1+((P_1-PT_1)^2)));

% -- Para (-x) -- %

Pn_1 = ((b*((c*t)+x))/d);

Pln_1 = b*((sqrt(1+((-x/d)^2)))-(-x/d));

P_modn_1 = 1 + (((b)+(-x/d))/(sqrt((1-(b^2))+((b+(-x/d))^2))));

Lnn_1 = log((1+(Pn_1^2))/(1+(Pln_1^2)));

LnTn_1 = log((1+(Pn_1^2))/(1+((Pn_1-PT_1)^2)));

% -- Rampa de Corrente -- %

%I_triangular = I0*triangularPulse(0,tf,tc,t);

If_1 = (I0/tf)*t;
Der_If_1 = diff(If_1,'t');

% -- Tensão Induzida Parcial Unilateral (x) -- %

U1t_If_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_mod_1*Ln_1;

U1t_Ic_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_mod_1*LnT_1;

% -- Tensão Induzida Parcial Unilateral (-x) -- %

U2t_If_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_modn_1*Lnn_1;

U2t_Ic_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_modn_1*LnTn_1;

% -- Vetores de Tempo -- %

t_vetor = 0:dt:tm;
t_vetor1_1 = 0:dt:Tt;
t_vetor2_1 = Tt:dt:tm;

% -- Vetores de Tensão -- %

U1t_If_1_vetor = double(subs(U1t_If_1,t,t_vetor1_1));

```

```

U1t_Ic_1_vetor = double(subs(U1t_Ic_1,t,t_vetor2_1));
U1t_1 = horzcat(U1t>If_1_vetor,U1t_Ic_1_vetor);

U2t>If_1_vetor = double(subs(U2t>If_1,t,t_vetor1_1));
U2t_Ic_1_vetor = double(subs(U2t_Ic_1,t,t_vetor2_1));
U2t_1 = horzcat(U2t>If_1_vetor,U2t_Ic_1_vetor);

Ut_1 = (U1t_1 + U2t_1);

% ----- Método 3 ( Exponencial_Rusck_Valor_Máximo) ----- %

a = str2double(get(objeto8,'String'));
be = str2double(get(objeto9,'String'));
Amp = str2double(get(objeto10,'String'));
Uexp = Amp*((exp(-a*t))-(exp(-be*t)));

Uexp_vetor = double(subs(Uexp,t,t_vetor));
figure
c1 = get(handles.checkbox1,'Value');
c2 = get(handles.checkbox2,'Value');
c3 = get(handles.checkbox3,'Value');

if c1==1 && c2==1 && c3==1
hold on
grid on
g1= plot(t1_vetor,U1t_vetor, 'k-', 'LineWidth',3);
set(g1,{'DisplayName'},{'Método 1'});
g2= plot(t_vetor,Ut_1, 'b-', 'LineWidth',3);
set(g2,{'DisplayName'},{'Método 2'});
g3= plot(t_vetor,Uexp_vetor, 'r-', 'LineWidth',3);
set(g3,{'DisplayName'},{'Método 3'});
xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
legend show
end

if c1==1 && c2==1 && c3==0
hold on
grid on
g1= plot(t1_vetor,U1t_vetor, 'k-', 'LineWidth',3);
set(g1,{'DisplayName'},{'Método 1'});
g2= plot(t_vetor,Ut_1, 'b-', 'LineWidth',3);
set(g2,{'DisplayName'},{'Método 2'});
xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
legend show
end

if c1==1 & c2==0 & c3==1
hold on
grid on
g1= plot(t1_vetor,U1t_vetor, 'k-', 'LineWidth',3);
set(g1,{'DisplayName'},{'Método 1'});
g3= plot(t_vetor,Uexp_vetor, 'r-', 'LineWidth',3);
set(g3,{'DisplayName'},{'Método 3'});
xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
legend show
end

if c1==0 & c2==1 & c3==1
hold on
grid on

```

```

    g2= plot(t_vetor,Ut_1, 'b-', 'LineWidth',3);
    set(g2,{'DisplayName'},{'Método 2'});
    g3= plot(t_vetor,Uexp_vetor, 'r-', 'LineWidth',3);
    set(g3,{'DisplayName'},{'Método 3'});
    xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
    ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
    legend show
end
if c1==1 & c2==0 & c3==0
hold on
    grid on
    g1= plot(t1_vetor,Ut1_vetor, 'k-', 'LineWidth',3);
    set(g1,{'DisplayName'},{'Método 1'});
    xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
    ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
    legend show
end
if c1==0 & c2==1 & c3==0
hold on
    grid on
    g2= plot(t_vetor,Ut_1, 'b-', 'LineWidth',3);
    set(g2,{'DisplayName'},{'Método 2'});
    xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
    ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
    legend show
end

if c1==0 & c2==0 & c3==1
hold on
    grid on
    g3= plot(t_vetor,Uexp_vetor, 'r-', 'LineWidth',3);
    set(g3,{'DisplayName'},{'Método 3'});
    xlabel('Tempo [s]','FontSize',24)
    ylabel('Tensão Induzida [V]','FontSize',24)
    legend show
end

function edit11_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit11 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit11 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit11 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit12_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject      handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit12 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit12 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit12_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit12 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit13_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit13 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit13 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit13_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit13 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit3 (see GCBO)

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit4_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit4 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit4 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit4 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit5 as text
% str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit5 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to edit5 (see GCBO)
% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit6_Callback(hObject, eventdata, handles)

```



```

% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit6 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit6 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit6 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit7_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit7 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit7 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit7 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%          See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit8_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit8 as text
%          str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit8 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit8_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit8 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function edit9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit9 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit9 as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit9_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to edit9 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata    reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)

clc;
format long;
opengl neverselect;
syms t

objeto1=findobj(gcf,'tag','edit13');
objeto2=findobj(gcf,'tag','edit12');
objeto3=findobj(gcf,'tag','edit3');
objeto4=findobj(gcf,'tag','edit11');
objeto5=findobj(gcf,'tag','edit4');
objeto6=findobj(gcf,'tag','edit9');
objeto7=findobj(gcf,'tag','edit8');
objeto8=findobj(gcf,'tag','edit5');
objeto9=findobj(gcf,'tag','edit6');
objeto10=findobj(gcf,'tag','edit7');

%----- Declaração das constantes -----%

u0 = 0.000001256;
E0 = 0.000000000000885418;
b = 0.3;
x = str2double(get(objeto1,'String'));
zi = 12;

```

```

d = str2double(get(objeto2,'String'));
hn = 3000;
I0 = str2double(get(objeto3,'String'))*1000;
b = 0.3;
h = str2double(get(objeto4,'String'));
tf = str2double(get(objeto5,'String'))*1e-6;
tc = 100e-6;
dt = str2double(get(objeto6,'String'));
tm = str2double(get(objeto7,'String'))*1e-6;

rad_on= get(handles.uipanel4,'SelectedObject'),'Tag');
switch rad_on
    case 'radiobutton1'
        metodo = 1; % Escolhe qual grandeza gerará o cartão de medição
    case 'radiobutton2'
        metodo = 2; % Escolhe qual grandeza gerará o cartão de medição
    case 'radiobutton3'
        metodo = 3; % Escolhe qual grandeza gerará o cartão de medição
end
%}

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo das constantes ----- %

c = (1/(sqrt(u0*E0)));

Z0 = ((1/(4*pi))*(sqrt(u0/E0)));

r0 = sqrt((d^2)+(x^2));

Tt = ((sqrt((d^2)+(x^2)))/c)+tf;

% ----- Método 1 ( Rusck_Puro_Degrau) ----- %

r01 = sqrt((d^2)+(x^2));

t0z1 = ((sqrt((zi^2)+(r01^2)))/c);

Eeiv1 = ((Z0*I0)/b)*((1/sqrt(((b*c*t)-zi)^2)+((1-(b^2))*(r01^2))))+(1/(sqrt(((b*c*t)+zi)^2)+((1-(b^2))*(r01^2))))-(1/(sqrt((hn-zi)^2)+(r01^2)))-(1/(sqrt((hn+zi)^2)+(r01^2)));

Emi1 = ((-Z0*I0*b)*((1/sqrt(((b*c*t)-zi)^2)+(1-(b^2))*(r01^2))))+(1/sqrt(((b*c*t)+zi)^2)+(1-(b^2))*(r01^2))));

Ei1 = (Eeiv1 + Emi1);

U1 = (((Z0*I0*h*b*((c*t)-x))/((d^2)+((b^2)*((c*t)-x)^2)))* (1+((x+(b^2)*((c*t)-x))/sqrt(((b*c*t)^2)+((1-(b^2))*(r01^2))))));
U2 = (((Z0*I0*h*b*((c*t)+x))/((d^2)+((b^2)*((c*t)+x)^2)))* (1+((-x+(b^2)*((c*t)+x))/sqrt(((b*c*t)^2)+((1-(b^2))*(r01^2))))));
Ut1 = U1 + U2;

t1_vetor = t0z1:dt:tm;

Ei1_vetor = double(subs(Ei1,t,t1_vetor));

U1_vetor = double(subs(U1,t,t1_vetor));
U2_vetor = double(subs(U2,t,t1_vetor));

```

```

Ut1_vetor = double(subs(Ut1,t,t1_vetor));

% ----- Método 2 ( Rusck_Modificado_Rampa) ----- %

P_1 = ((b*((c*t)-x))/d);

Pl_1 = b*((sqrt(1+((x/d)^2)))-(x/d));

PT_1 = (b*c*tf)/d;

P_mod_1 = 1 + (((b)+(x/d))/(sqrt((1-(b^2))+((b+(x/d))^2))));

Ln_1 = log((1+(P_1^2))/(1+(Pl_1^2)));

LnT_1 = log((1+(P_1^2))/(1+((P_1-PT_1)^2)));

% -- Para (-x) -- %

Pn_1 = ((b*((c*t)+x))/d);

Pln_1 = b*((sqrt(1+((-x/d)^2)))-(-x/d));

P_modn_1 = 1 + (((b)+(-x/d))/(sqrt((1-(b^2))+((b+(-x/d))^2))));

Lnn_1 = log((1+(Pn_1^2))/(1+(Pln_1^2)));

LnTn_1 = log((1+(Pn_1^2))/(1+((Pn_1-PT_1)^2)));

% -- Rampa de Corrente -- %

%I_triangular = I0*triangularPulse(0,tf,tc,t);

If_1 = (I0/tf)*t;
Der_If_1 = diff(If_1,'t');

% -- Tensão Induzida Parcial Unilateral (x) -- %

U1t_If_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_mod_1*Ln_1;

U1t_Ic_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_mod_1*LnT_1;

% -- Tensão Induzida Parcial Unilateral (-x) -- %

U2t_If_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_modn_1*Lnn_1;

U2t_Ic_1 = ((Z0*h)/(2*b*c))*Der_If_1*P_modn_1*LnTn_1;

% -- Vetores de Tempo -- %

t_vetor = 0:dt:tc;
t_vetor1_1 = 0:dt:Tt;
t_vetor2_1 = Tt:dt:tc;

% -- Vetores de Tensão -- %

U1t_If_1_vetor = double(subs(U1t_If_1,t,t_vetor1_1));
U1t_Ic_1_vetor = double(subs(U1t_Ic_1,t,t_vetor2_1));
U1t_1 = horzcat(U1t_If_1_vetor,U1t_Ic_1_vetor);

```

```

U2t_If_1_vetor = double(subs(U2t_If_1,t,t_vetor1_1));
U2t_Ic_1_vetor = double(subs(U2t_Ic_1,t,t_vetor2_1));
U2t_1 = horzcat(U2t_If_1_vetor,U2t_Ic_1_vetor);

Ut_1 = (U1t_1 + U2t_1);

% ----- Método 3 ( Exponencial_Rusck_Valor_Máximo) ----- %

a = str2double(get(objeto8,'String'));
be = str2double(get(objeto9,'String'));
Amp = str2double(get(objeto10,'String'));
Uexp = Amp*((exp(-a*t))-(exp(-be*t)));

Uexp_vetor = double(subs(Uexp,t,t_vetor));

% ----- Geração dos Cartões de Medições para o APR (Pasta Medições) ----- %
switch metodo
    case 1
        % ----- Para Fase A ----- %
        fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Medições\med.txt','wt');
        formatSpec = '(%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e)\n';
        fprintf(fileID,'(0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00)\n');
        for kt=2:length(Ut1_vetor)

            fprintf(fileID,formatSpec,t1_vetor(kt),(Ut1_vetor(kt))/2,t1_vetor(kt),0,t1_vetor(kt),0);
        end
        fclose(fileID);
        final = t1_vetor(length(t1_vetor));
    case 2
        % ----- Para Fase B ----- %
        fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Medições\med.txt','wt');
        formatSpec = '(%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e)\n';
        fprintf(fileID,'(0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00)\n');
        for kt=2:length(Ut1_vetor)

            fprintf(fileID,formatSpec,t_vetor(kt),(Ut_1(kt))/2,t_vetor(kt),0,t_vetor(kt),0);
        end
        fclose(fileID);
        final = t_vetor(length(t_vetor));
    case 3
        % ----- Para Fase C ----- %
        fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Medições\med.txt','wt');
        formatSpec = '(%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e) (%3.2e,%3.4e)\n';
        fprintf(fileID,'(0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00) (0.00e+00,0.0000e+00)\n');
        for kt=2:length(Ut1_vetor)

            fprintf(fileID,formatSpec,t_vetor(kt),(Uexp_vetor/(kt))/2,t_vetor(kt),0,t_vetor(kt),0);
        end
        fclose(fileID);
        final = t_vetor(length(t_vetor));
    end

% ----- Geração do cartão para o APR (Pasta Original) -----%
fileID = fopen('C:\APR-CEMIG\Original\gera_med_m.base','w');
fprintf(fileID,'BEGIN NEW DATA CASE --NOSORT--\nDATA BASE
MODULE\n$ERASE\nARG,mod__1,mod__2,mod__3,Vrmsff\n');
fprintf(fileID,'NUM,Vrmsff\n\nOUTPUT\n mod__1\n mod__2\n mod__3\nMODEL
DISTUR\n COMMENT\n =====\n');

```

```

fprintf(fileID,'          REGISTRO DE DISTURBIO\n
===== \n ENDCOMMENT\n');
fprintf(fileID,' OUTPUT\n va\n vb\n vc\n DATA\nC Vrmsff {dflt:220} -- tensão
eficaz entre fases\n nc {dflt:8} -- número de ciclos de medição\n');
fprintf(fileID,' ppc {dflt:128} -- número de amostras de tensão por ciclo\n
freq {dflt:60} -- frequência\n tdl {dflt:0.1} -- instante de ocorrência
do distúrbio\n VAR\n');
fprintf(fileID,' tref -- variável de tempo incrementada a cada passo de
integração superior a tdl\n va -- tensão da fase A\n');
fprintf(fileID,' vb -- tensão da fase B\n vc -- tensão da fase C\n Vmf
-- valor máximo da tensão de fase\n A0 -- ângulo inicial da tensão da fase
A\n');
fprintf(fileID,' B0 -- ângulo inicial da tensão da fase B\n C0 -- ângulo
inicial da tensão da fase C\n Atd1 -- ângulo da tensão no início do
evento\n');
fprintf(fileID,' t1 -- intervalo de tempo entre amostras de tensão\n td2
-- instante de tempo do último ponto amostrado\n flag -- variável de controle
de cálculos iniciais\n');
fprintf(fileID,' FUNCTION fonte_f(Vmff,freqf,A0f):=Vmff*sin(2*pi*freqf*t+A0f)\n
FUNCTION vamed POINTLIST\n$INCLUDE,
C:\\Users\\Isaque\\Desktop\\Sergio\\faseA.lst\n');
fprintf(fileID,' FUNCTION vbmed POINTLIST\n$INCLUDE,
C:\\Users\\Isaque\\Desktop\\Sergio\\faseB.lst\n FUNCTION vcmed POINTLIST\n');
fprintf(fileID,'$INCLUDE, C:\\Users\\Isaque\\Desktop\\Sergio\\faseC.lst\n INIT\n
flag:=0\n tref:=0\n');
fprintf(fileID,' t1:=%3.6E\n',final);
fprintf(fileID,' td2:=t1+tdl\n Vmf:=sqrt(2)*Vrmsff/sqrt(3)\n
Atd1:=deg(asin(vamed(0)/Vmf))\n ENDINIT\n');
fprintf(fileID,' EXEC\n IF t < tdl OR t > td2 THEN\n IF flag = 0 THEN\n IF
vamed(0) >= 0 THEN\n IF vamed(0) > vamed(t1) THEN\n');
fprintf(fileID,' Atd1:=rad(180-Atd1)\n ELSE\n Atd1:=rad(Atd1)\n
ENDIF\n ELSIF vamed(0) < 0 THEN\n IF vamed(0) > vamed(t1) THEN\n');
fprintf(fileID,' Atd1:=rad(180-Atd1)\n ELSE\n Atd1:=rad(Atd1)\n
ENDIF\n ENDIF\n A0:=Atd1-(2*pi*freq*tdl)\n');
fprintf(fileID,' B0:=rad(deg(A0)-120)\n C0:=rad(deg(A0)+120)\n
flag:=1\n ENDIF\n va:=fonte_f(Vmf,freq,A0)\n');
fprintf(fileID,' vb:=fonte_f(Vmf,freq,B0)\n vc:=fonte_f(Vmf,freq,C0)\n
ELSIF t >= tdl THEN\n va:=vamed(tref)\n vb:=vbmed(tref)\n');
fprintf(fileID,' vc:=vcmed(tref)\n tref:=tref+timestep\n ENDIF\n
ENDEXEC\n');
fprintf(fileID,'ENDMODEL\nRECORD\nDISTUR.va AS va\nDISTUR.vb AS vb\nDISTUR.vc AS
vc\nUSE DISTUR AS DISTUR\nDATA\n');
fprintf(fileID,'C Vrmsff:= 220\n nc:= 8.\n ppc:= 128.\n freq:=
60.\n tdl:= 0.1\nOUTPUT\n');
fprintf(fileID,' mod_1:=va\n mod_2:=vb\n mod_3:=vc\nENDUSE\nENDMODELS\nC
1 2 3 4 5 6 7 8\n');
fprintf(fileID,'C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890\n
');
fprintf(fileID,'/BRANCH\nC < n 1>< n 2><ref1><ref2>< R >< L >< C >\nC < n 1><
n 2><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0\n');
fprintf(fileID,'/OUTPUT\nBEGIN NEW DATA CASE\nC\n$n$PUNCH,med_m.cet\nBEGIN NEW
DATA CASE\nBLANK\n');
fclose(fileID);

% --- Executes when selected object is changed in uipanel4.
function uipanel4_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject handle to the selected object in uipanel4
% eventdata structure with the following fields (see UIBUTTONGROUP)
% EventName: string 'SelectionChanged' (read only)
% OldValue: handle of the previously selected object or empty if none was
selected
% NewValue: handle of the currently selected object
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

ANEXO A

Procedimento computacional para Corrente Degrau

```

clear all

% Recebendo as variáveis de entrada:
fprintf ('\n\nRecebendo as variáveis de entrada: \n\n');
x = input ('Distância na qual deseja-se saber a Uinduzida em relação ao ponto
mais próximo da descarga "x": ');
zi = input ('Distância em relação ao solo "zi": ');
d = input ('Menor distância entre a linha e o ponto da descarga "d": ');
hn = input ('Valor da altura do canal da descarga "hn": ');
I0 = input ('Valor de pico da corrente da descarga "I0": ');
b = input ('Valor da razão da velocidade de propagação da corrente de retorno
pela velocidade da luz "b": ');
h = input ('Altura da linha a ser considerada "h": ');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

syms t

%----- Declaração das constantes -----%

% u0 = 0.000001256;
% E0 = 0.000000000000885418;
% x = 0;
% zi = 10;
% d = 200;
% hn = 3000;
% I0 = 40000;
% b = 0.3;
% h = 12;
% % tf = 4e-6;
% % tc = 100e-6;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo da Velocidade da Luz no Vácuo ----- %

c = (1/(sqrt(u0*E0)));

% ----- Cálculo da Impedância do Canal de Descarga ----- %

Z0 = ((1/(4*pi))*(sqrt(u0/E0)));

% ----- Cálculo da Distância r0 ----- %

r0 = sqrt((d^2)+(x^2));

% ----- Cálculo do Tempo Mínimo para Satisfazer a Condição Básica ----- %

t0z = ((sqrt((zi^2)+(r0^2)))/c);

```

```

% ----- Cálculo do Tempo Mínimo para Satisfazer a Condição Básica_2 ----- %

t0 = (r0/c);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo da Componente Vertical da Contribuição Eletrostática "Eeiv" ----
- %

Eeiv = ((Z0*I0)/b)*((1/sqrt(((b*c*t)-zi)^2)+((1-(b^2))* (r0^2))))+(1/(sqrt(((b*c*t)+zi)^2)+((1-(b^2))* (r0^2))))-(1/(sqrt((hn-zi)^2)+(r0^2)))-(1/(sqrt((hn+zi)^2)+(r0^2))));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo da Componente Horizontal da Contribuição Eletrostática "Eeix" --
--- %

Y = (1/(sqrt((hn-zi)^2)+(r0^2))*(hn-zi+(sqrt((hn-zi)^2)+(r0^2)))));
Yl = (-1/(sqrt((hn+zi)^2)+(r0^2))*(hn+zi+(sqrt((hn+zi)^2)+(r0^2)))));
G = (((-1-(b^2)))/(sqrt((r0^2)*(1-(b^2))+((b*c*t)-zi)^2)))*(1/(b*c*t-zi+(sqrt((r0^2)*(1-(b^2))+((b*c*t)-zi)^2)))));
Gl = (((-1-(b^2)))/(sqrt((r0^2)*(1-(b^2))+((b*c*t)+zi)^2)))*(1/(b*c*t+zi+(sqrt((r0^2)*(1-(b^2))+((b*c*t)+zi)^2)))));

Eeix = ((Z0*I0*x)/b)*(Y+Yl+G+Gl);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo da Componente Magnética do Campo Elétrico ----- %

Emi = ((-Z0*I0*b)*((1/sqrt(((b*c*t)-zi)^2)+((1-(b^2))* (r0^2))))+(1/sqrt(((b*c*t)+zi)^2)+((1-(b^2))* (r0^2)))));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo do Campo Elétrico Total (Direção eixo Z) ----- %

Ei = (Eeiv + Emi);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Cálculo da Tensão Induzida_(Rusck) ----- %

U1 = (((Z0*I0*h*b*((c*t)-x))/(d^2)+((b^2)*(((c*t)-x)^2))))*(1+((x+(b^2)*((c*t)-x))/sqrt(((b*c*t)^2)+((1-(b^2))* (r0^2)))));
U2 = (((Z0*I0*h*b*((c*t)+x))/(d^2)+((b^2)*(((c*t)+x)^2))))*(1+((-x+(b^2)*((c*t)+x))/sqrt(((b*c*t)^2)+((1-(b^2))* (r0^2)))));
U = U1 + U2;

% ----- Criando os vetores no tempo (t): ----- %

t_vetor = t0:1e-7:0.000020;
Eeiv_vetor = double(subs(Eeiv,t,t_vetor));
Eeix_vetor = double(subs(Eeix,t,t_vetor));
Emi_vetor = double(subs(Emi,t,t_vetor));
Ei_vetor = double(subs(Ei,t,t_vetor));
U1_vetor = double(subs(U1,t,t_vetor));
U2_vetor = double(subs(U2,t,t_vetor));

```



```
U_vetor = double(subs(U,t,t_vetor));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% ----- Plotando os Resultados: ----- %

plot(t_vetor,U_vetor);
grid
```

Procedimento computacional para tensão dupla exponencial

```
A0=315000;    %kA
T1=1.2e-6;    %s
T2=50e-6;    %s
tsim=30e-6; %tempo de simulação
alfa=1/T2;
beta=1/T1;
deltat=0.5e-6; %passo de integração
ts=tsim/deltat;
sourcetype='2'; %1 for ATP, 2 for AHMAD
if sourcetype=='1'
    for k=1:ts
        t(k)=k*deltat;
        Amp(k)=A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k)));
    end
else
    w=(log(alfa/beta))/(alfa-beta);
    for k=1:ts
        t(k)=k*deltat;
        Amp(k)=(A0*(exp(-alfa*t(k))-exp(-beta*t(k))))/(exp(-alfa*w)-
exp(-beta*w));
    end
end

plot (Amp);
```