

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LUCAS MANUEL RESENDE RODRIGUES**

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E SUPORTABILIDADE DE MEDIDORES**  
**ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**UBERLÂNDIA**

**Outubro de 2020**

**LUCAS MANUEL RESENDE RODRIGUES**

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E SUORTABILIDADE DE MEDIDORES  
ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Dissertação de mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do  
título de mestre em ciências.**

**Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior**

**UBERLÂNDIA**

**Outubro de 2020**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

R696 Rodrigues, Lucas Manuel Resende, 1995-  
2020 Análise da sensibilidade e suportabilidade de  
medidores eletrônicos de energia elétrica [recurso  
eletrônico] / Lucas Manuel Resende Rodrigues. - 2020.

Orientador: José Rubens Macedo Junior.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.701>  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Macedo Junior, José Rubens  
,1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

**LUCAS MANUEL RESENDE RODRIGUES**

**ANÁLISE DA SENSIBILIDADE E SUPORTABILIDADE DE MEDIDORES  
ELETRÔNICOS DE ENERGIA ELÉTRICA**

**Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências.**

**Comissão examinadora:**

**Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior (Orientador – UFU)**

**Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende (UFU)**

**Prof. Dr. Arnaldo José Pereira Rosentino Junior (UFTM)**

**Uberlândia, 16 de Outubro de 2020**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 750, PPGEELT				
Data:	Dezesseis de outubro de dois mil e vinte	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	11822EEL006				
Nome do Discente:	Lucas Manuel Resende Rodrigues				
Título do Trabalho:	Análise da sensibilidade e suportabilidade de medidores eletrônicos de energia elétrica				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Distribuição de energia elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de uma nova metodologia para quantificação das perdas técnicas da distribuição em condições distorcidas e desequilibradas Agência Financiadora: ENERGISA S.A. / P&D ANEEL Início: 27/07/2018 Término: 26/07/2020 No. do Projeto na agência: PD-00404-1803/2018 Professor Coordenador: José Rubens Macedo Junior				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Paulo Henrique Oliveira Rezende - FEELT/UFU; Arnaldo José Pereira Rosentino Junior - UFTM; José Rubens Macedo Junior - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Rubens Macedo Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/10/2020, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Oliveira Rezende, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/10/2020, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arnaldo José Pereira Rosentino Junior, Usuário Externo**, em 16/10/2020, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2267781** e o código CRC **13DC35A4**.

## AGRADECIMENTOS

Devo agradecer primeiramente a minha família. Meus pais, Roberto e Marlene, foram essenciais em todos os momentos da minha vida. Irei retribuir tudo que me deram. Dedico essa dissertação a vocês.

Ao meu grande amor e companheira, Laura Campos, por ter sido fundamental em momentos difíceis, pelos conselhos e pela relação especial e única que temos.

Aos meus amigos que seguem a vida ao meu lado, em especial, Jefferson, Otávio, Rafael, Gabriel, Vitor e Liniker. Obrigado pelos momentos engraçados e por todas as conversas ao longo destes anos.

Agradeço ao meu orientador José Rubens, por ter me auxiliado neste trabalho e por todos os conselhos e ensinamentos durante o tempo que estive sob sua orientação.

Agradeço aos meus caros colegas do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE), que me acompanharam durante todo este trabalho: Rodrigo, Guilherme, Eduardo, Lara, Gabriel, Hélio, Lucas, Isabela, Paulo, Isaque, Wellington, Lincoln e Pedro. Agradeço a cada um de vocês pelo companheirismo, cumplicidade, competência, profissionalismo e, acima de tudo, pela amizade e bons momentos que vocês proporcionaram.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, através de seus professores, pela oportunidade deste aprendizado.

Gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de fomento e ao Grupo Energisa pela bolsa de fomento por meio do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado junto ao LADEE.

“Vamos lutar por um mundo de razão. Um mundo no qual a ciência e o progresso conduzam à felicidade de todos nós”

**Charles Chaplin**

## RESUMO

Com o avanço da tecnologia, mais e mais equipamentos estão sendo fabricados tendo dentre seus componentes, os circuitos eletrônicos, os quais possuem a característica de serem susceptíveis às variações de tensão de curta duração (VTCD). Sobre essa vertente, encontram-se na literatura nacional e internacional, alguns estudos apresentando o comportamento de variados tipos de equipamentos frente à tais fenômenos que comumente se verificam na rede de distribuição de energia elétrica. Porém, até o presente momento, não se encontrou algum estudo direcionado a medidores eletrônicos de energia elétrica, responsáveis por quantificar o consumo de energia elétrica. O objetivo principal deste trabalho é apresentar o comportamento de diversos modelos de medidores de energia elétrica, identificando as nuances de cada modelo frente aos fenômenos comentados, apresentando-se para tal, curvas de sensibilidade operacional à tensões e curvas de suportabilidade dielétrica. Além disso, são avaliados os impactos causados sobre a perda do registro de medição (devido aos afundamentos de tensão) e os danos verificados na estrutura do medidor (devido às elevações de tensão). Por fim, é apresentado um estudo de caso mostrando o impacto causado pela perda do registro de medição em um cenário onde foram registrados um certo número de eventos de VTCD em uma rede de distribuição real.

**Palavras chave** — Medidores de energia, sensibilidade, suportabilidade, qualidade da energia elétrica, Variações de Tensão de Curta Duração

## ABSTRACT

With the advancement of technology, more and more equipment is being manufactured with electronic components among its components, which have the characteristic of being susceptible to short-duration voltage variations (SDVV). Regarding this aspect, in the national and international literature, some studies have shown the behavior of various types of equipment in the face of such phenomena that commonly occur in the electricity distribution network. However, until the present moment, no study has been found aimed at electronic meters, responsible to measure electricity consumption. The main objective of this work is present the behavior of several models of electric energy meters, identifying the nuances of each model in face of the phenomena commented, presenting, for this, sensitivity and supportability curves. In addition, the impacts caused by losing measurement record (due to voltage dips) and the damage to the meter structure (due to voltage rises) are evaluated. It is presented a case study that shows the impact caused by the loss of measurement in a scenario which a certain number of VTCD events were recorded in a real power distribution network.

**Keywords** — Energy Metering Devices, sensitivity, supportability, power quality, voltage sags

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de cálculo do valor eficaz considerando-se uma taxa amostral de 8 amostras por ciclo, sendo: (a) deslizamento a cada ciclo e (b) deslizamento da janela a cada 1/2 ciclo.	31
Figura 2 - Caracterização de eventos de VTCD com e sem a consideração de histerese em: (a) eventos de afundamento de tensão e (b) eventos de elevação momentânea de tensão. ....	32
Figura 3 - Configuração básica de uma fonte de alimentação monofásica de um circuito eletrônico. ....	33
Figura 4 - Efeito de um afundamento de tensão no lado da tensão cc não regulada sob a condição de não ter carga. ....	34
Figura 5 - Tensão cc não regulada imediatamente após a ocorrência de um afundamento de tensão. ....	36
Figura 6 - Região de sensibilidade comumente verificada em circuitos integrados de medidores eletrônicos de energia elétrica. Fonte: [33]. ....	37
Figura 7 - Topologias de fontes de alimentação comumente encontradas em medidores eletrônicos de energia elétrica sendo: (a) Fonte isolada e (b) Fonte não-isolada. ....	38
Figura 8 - A influência na resposta da tensão da fonte de suprimento isolada na presença de diferentes tipos de capacitores sendo: (a) $C2 = 42\mu\text{F}$ , (b) $C2 = 47\mu\text{F}$ , (c) $C2 = 220\mu\text{F}$ , (d) $C2 = 470\mu\text{F}$ e (e) $C2 = 680\mu\text{F}$ ....	39
Figura 9 - Curva típica para a suportabilidade de tensão. ....	42
Figura 10 - Fluxograma representativo do processo iterativo para demarcação de pontos na curva de sensibilidade. ....	44
Figura 11 - Conversor de pulsos conectado a um osciloscópio para registro de pulsos luminosos. ....	45
Figura 12 - Curva CBEMA: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores. ....	47
Figura 13 - Curva ITIC: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores. ....	47
Figura 14 - Curva SEMI F47: Curva de sensibilidade para processos industriais de fabricação de semicondutores. ....	48
Figura 15 - Curva AES SUL: Limites de suportabilidade para televisores a tubo – novos e usados. ....	49
Figura 16 - Estrutura a ser montada em laboratório para execução de testes para levantamento da curva de sensibilidade de medidores eletrônicos. ....	51

Figura 17 - Estrutura física utilizada para realização de testes de sensibilidade de medidores eletrônicos.....	52
Figura 18 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante A.....	54
Figura 19 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante B.....	55
Figura 20 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante C.....	56
Figura 21 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante D.....	57
Figura 22 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante E.....	57
Figura 23 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante G.....	58
Figura 24 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante I.....	59
Figura 25 - Intervalo entre pulsos para as seguintes condições: operação normal ( $\Delta t_1$ ) e após a ocorrência da VTCD ( $\Delta t_2$ ). .....	60
Figura 26 - Tempos de restabelecimento dos medidores eletrônicos em segundos. ....	62
Figura 27 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante A sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.....	64
Figura 28 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante B sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.....	65
Figura 29 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante C sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.....	65
Figura 30 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante D sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.....	66
Figura 31 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante E sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.....	66
Figura 32 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante G sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.....	66
Figura 33 - Curva de sensibilidade dos medidor do fabricante I sobreposta por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real. ....	67
Figura 34 - Circuito proposto para obtenção da curva de suportabilidade dos medidores eletrônicos.....	71
Figura 35 - Teste para levantamento da curva de suportabilidade sendo executado.....	72
Figura 36 - Curva de suportabilidade do Medidor A.02.....	74
Figura 37 - Curva de suportabilidade do Medidor B.07.....	75
Figura 38 - Curva de suportabilidade do Medidor D.01.....	76
Figura 39 - Curva de suportabilidade do Medidor G.03.....	77

Figura 40 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor D.01 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.....	78
Figura 41 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor B.07 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.....	78
Figura 42 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor A.02 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.....	79
Figura 43 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor G.03 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das VTCD, de acordo com a IEEE 1159. ....	27
Tabela 2 - Classificação dos tipos de VTCD pelo Módulo 8 do PRODIST.....	28
Tabela 3 - Intervalos de tempo entre pulsos antes ( $\Delta t_1$ ) e após ( $\Delta t_2$ ) o distúrbio em segundos. .....	61
Tabela 4 - Média de tempos de restabelecimento por fabricante em segundos.....	63
Tabela 5 - Total de registros de afundamentos e interrupções para cada ponto de medição. ....	63
Tabela 6 - Número de vezes que ocorreria o desligamento do circuito eletrônico de cada medidor para cada ponto de medição onde se registraram eventos de VTCD num alimentador real. ....	67
Tabela 7 – Tempo em minutos que cada medidor ficaria sem registrar a quantidade de energia consumida devido ao desligamento do circuito eletrônico devido aos eventos registrados de VTCD em um alimentador real.....	68
Tabela 8 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor A.02.....	74
Tabela 9 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor B.07.....	74
Tabela 10 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor D.01. ....	75
Tabela 11 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor G.03. ....	76

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 METODOLOGIA .....	18
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	19
<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>21</b>
<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>26</b>
3.1 DEFINIÇÕES .....	26
3.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO .....	28
3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO .....	29
3.4 OS EFEITOS DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO SOBRE A FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS .....	33
3.5 A INFLUÊNCIA DE CAPACITORES NA SENSIBILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS .....	37
3.6 LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES.....	40
3.6.1 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA.....	41
3.6.2 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DA SENSIBILIDADE ÀS TENSÕES 43	
3.6.3 CURVAS DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES CONHECIDAS E JÁ PUBLICADAS NA LITERATURA .....	46
<b>SENSIBILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS .....</b>	<b>50</b>
4.1 ESTRUTURA LABORATORIAL PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES DE SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES .....	51
4.2 CARACTERÍSTICAS DO TESTE PARA LEVANTAMENTO DA CURVA DE SENSIBILIDADE DOS MEDIDORES.....	52
4.3 RESULTADOS OBTIDOS .....	53
4.3.1 CURVAS DE SENSIBILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS .....	53
4.3.2 TEMPO DE RESTABELECIMENTO DE MEDIDORES .....	59
4.3.3 ESTUDO DE CASO PARA VERIFICAÇÃO DO TEMPO SEM MEDIÇÃO UTILIZANDO EXEMPLO REAL DE REGISTROS DE VTCD .....	63
4.3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69

<b>SUPPORTABILIDADE DIELÉTRICA DE MEDIDORES ELETRÔNICOS .....</b>	<b>70</b>
5.1 ESTRUTURA LABORATORIAL PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES DE SUPPORTABILIDADE DIELÉTRICA.....	70
5.2 RESULTADOS OBTIDOS .....	73
5.3 CURVAS DE SUPPORTABILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS .....	73
5.4 DANOS FÍSICOS CAUSADOS AOS MEDIDORES .....	77
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	80
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	83
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>84</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica e a confiabilidade no fornecimento são tópicos recorrentes quando se fala sobre o sistema de distribuição de energia elétrica. Isso se deve pelo constante desenvolvimento industrial, que traz um grande desafio às distribuidoras em fornecer qualidade no suprimento de energia aos consumidores de forma sustentável e confiável.

O avanço da tecnologia e o advento da inserção de componentes eletrônicos nos mais diversos tipos de equipamentos, trouxe um aperfeiçoamento dos processos industriais, sendo responsável pela mudança no perfil das cargas, que em sua maioria são constituídas por componentes eletrônicos. Esses componentes, como mostrado em [1], são sensíveis às variações de tensão, fazendo com que sua operação não ocorra como o esperado ou, até mesmo, tornando-o inoperante.

Distúrbios que ocorrem frequentemente na rede elétrica, como por exemplo, os afundamentos, as elevações e as interrupções momentâneas e temporárias de tensão, são as principais intempestividades que comumente se verificam nas redes elétricas [2], sendo muitas vezes responsáveis por causar danos físicos irreversíveis ou má operação dos equipamentos elétricos.

Pesquisas feitas na área de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) se mostram cada vez mais presentes na literatura. Em [3], [4] e [5] são mostrados alguns estudos que apontam que o principal distúrbio comumente observado nos sistemas de distribuição de energia elétrica é conhecido como Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD).

Uma VTCD pode ser definida como uma alteração no valor eficaz da tensão, percebido como uma amplificação ou atenuação na magnitude desta grandeza elétrica, com uma duração que pode variar de ciclos até alguns minutos.

Para exemplificação da presença e do impacto de uma VTCD na rede elétrica, pode-se verificar pela pesquisa realizada em [3], que 68% do total de distúrbios registrados em uma determinada rede elétrica foram provenientes de eventos de VTCD. Em [4] é mostrado um estudo no qual aproximadamente 62% dos distúrbios registrados em redes de energia elétrica estão associados a eventos de afundamento momentâneo de tensão com duração inferior a 0,5s (30 ciclos). O trabalho indicado em [6] apresenta

comportamento de alguns equipamentos eletroeletrônicos quando estes estão sujeitos às elevações de tensão de curta duração, verificando-se em casos extremos danos irreparáveis aos mesmos.

Por muitos anos, os efeitos advindos das VTCDs eram completamente ignorados, pois não eram considerados motivos de preocupação, tanto para as concessionárias, quanto para os consumidores. Com o tempo, esse cenário se transformou, pois, como já mostrado, mais e mais equipamentos estão se tornando sensíveis às variações da magnitude da tensão. Percebe-se pelas pesquisas supracitadas, que a VTCD é um tipo de distúrbio frequentemente verificado nas redes de distribuição, sendo capaz de impactar em processos industriais e na operação de equipamentos, fazendo com que nos dias hoje, seja um tópico de extrema relevância dentro do âmbito da Qualidade de Energia.

Atualmente, a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos é provida de fontes chaveadas, cujo objetivo é converter em seu interior, a corrente alternada que alimenta o equipamento, em corrente contínua. Reconhecidamente, estes aparelhos, por utilizarem cada vez mais circuitos eletrônicos sensíveis, aliados à ocorrência de fenômenos advindos da natureza e outros, tem ocasionado impactos que podem ser determinantes na operação dos mais diversos equipamentos que compõem os seguimentos industriais, comerciais e residenciais de consumidores.

Assim como a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos, os medidores eletrônicos de energia elétrica ativa também estão sujeitos aos mesmos fenômenos que possam ocorrer na rede de suprimento. Dessa forma, esses distúrbios podem causar danos físicos permanentes ou funcionamento inadequado desse equipamento em questão. Contudo, na literatura técnica nacional e internacional não se encontram estudos relevantes acerca da sensibilidade e suportabilidade desses medidores em relação a eventos de variação de tensão.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo enriquecer o conhecimento técnico existente, incorporando análises e resultados associados com a sensibilidade e a suportabilidade de diferentes marcas e modelos de medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, utilizados para fins de faturamento em todo território nacional, assim como quantificar os prejuízos decorrentes desta sensibilidade/suportabilidade.

## 1.1 METODOLOGIA

Considerando o contexto apresentado, este trabalho realiza uma análise acerca da sensibilidade e suportabilidade de medidores eletrônicos de energia. Primeiramente, há de se reconhecer a inexistência de procedimentos normalizados que definam qualitativamente e quantitativamente os testes a serem efetuados.

Portanto, para este trabalho, será necessária a implementação de tais procedimentos, no intuito de realizar testes laboratoriais afim de obter as características dos medidores eletrônicos, quando os mesmos operam na presença das Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs).

Um grande impulso para a realização deste trabalho se deve, como já mencionado, ao motivo de não se encontrar na literatura técnica nacional e internacional, pesquisas visando a obtenção desses limites para medidores eletrônicos de energia elétrica.

Para alcançar tal objetivo, foram necessários dois tipos de ensaios laboratoriais, nos quais foram levantadas as características da maioria dos medidores eletrônicos encontrados no mercado, possibilitando:

- Estabelecer uma metodologia para o levantamento das características de suportabilidade e sensibilidade de tais equipamentos.
- Promover um novo tipo de estudo sobre a sensibilidade e suportabilidade de medidores de energia elétrica, visto que não há estudos feitos para este tipo de dispositivo na literatura.
- Verificar a não compatibilidade entre as curvas de sensibilidade e de suportabilidade obtidas, com as curvas ITIC e CBEMA, amplamente utilizadas como referências em estudos de suportabilidade e sensibilidade de equipamentos eletroeletrônicos baseados em fontes chaveadas.
- Demonstrar o impacto que as VTCDs promovem no processo de medição de energia elétrica, realizando-se uma análise do tempo que os mesmos ficam inoperantes devido aos afundamentos momentâneos de tensão, e quais são os danos verificados quando os mesmos estão sujeitos às elevações de tensão de curta duração.
- Analisar a influência dos capacitores internos das fontes desses medidores em relação à sua sensibilidade, como forma de atenuação dos impactos verificados quando da ocorrência de VTCDs.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução do tema a ser discutido, na qual é abordada a relevância do estudo e sobre sua originalidade frente a outros estudos realizados neste âmbito. Além disso, são apresentados os principais objetivos desta Dissertação, assim como a motivação para exploração do tema proposto.

O Capítulo 2 apresenta o Estado da Arte, onde são apontados os trabalhos e estudos de relevância acerca do tema, apresentando as contribuições de outros autores para a área de sensibilidade e suportabilidade de equipamentos perante distúrbios de tensão que ocorrem frequentemente na rede elétrica.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a compreensão das VTCDs e seus efeitos em circuitos eletrônicos. Este capítulo fornece as bases teóricas e os artifícios matemáticos necessários para quantificar a amplitude e duração de uma VTCD e permitir ao leitor compreender como se dá a caracterização das VTCDs e seus efeitos na fonte de alimentação de circuitos eletrônicos e qual a metodologia utilizada para o levantamento das curvas de suportabilidade dielétrica e sensibilidade operacional às tensões. Também são apresentadas as curvas de tolerância conhecidas e já publicadas na literatura.

Em seguida, no Capítulo 4, é realizada uma abordagem mostrando como os afundamentos e as interrupções, discutidos previamente no Capítulo 3, impactam no funcionamento de diversos modelos de medidores eletrônicos de energia elétrica. Neste capítulo são detalhados os ensaios realizados em laboratório com vistas à obtenção do comportamento dos medidores perante à tais fenômenos. Através de ensaios, foram levantadas as curvas de sensibilidade, além da quantificação do tempo de restabelecimento para cada medidor. Através das curvas, consegue-se identificar a região de operação deste equipamento frente aos afundamentos e interrupções. Com o tempo de restabelecimento, foi realizado um estudo de caso, estimando-se o tempo que cada medidor deixaria de registrar a energia consumida de acordo com um registro real de VTCD medido num sistema de uma distribuição real. Ademais, são apresentados os resultados obtidos para todos os medidores testados e, por fim, é feita uma avaliação da influência que os capacitores presentes nesses medidores têm em relação à sensibilidade

dos mesmos e como podem ser usados para atenuar os efeitos advindos dos afundamentos momentâneos de tensão.

No Capítulo 5 é realizada outra abordagem, onde são apresentados os efeitos que elevações de tensão de curta duração causam em diferentes medidores eletrônicos de energia elétrica. Este capítulo apresenta a estrutura física utilizada para a realização de testes visando o levantamento das curvas de suportabilidade dielétrica dos medidores eletrônicos e mostrará os resultados obtidos para todos os medidores testados, além de apresentar os danos causados aos medidores após a queima dos mesmos, com o intuito de averiguar quais os componentes que comumente se danificam devido as elevações de tensão para este equipamento em específico.

Por fim, no Capítulo 6 é apresentado o término da análise, ou seja, a sintetização de todos os resultados obtidos ao longo deste trabalho. Neste capítulo, as conclusões sobre a sensibilidade e suportabilidade dos medidores eletrônicos são estabelecidas de forma a contribuir com mais um novo estudo dentro do âmbito de sensibilidade e suportabilidade de equipamentos.

---

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DA ARTE

Todo o embasamento teórico, assim como o desenvolvimento analítico que possibilita a análise do comportamento dos distúrbios característicos que resultam na elevação ou afundamento momentâneo da magnitude da tensão, são apresentados em [1]. Além disso, também são apresentados métodos de atenuação, caracterização e resposta de equipamentos quando estes estão sujeitos a tensões de suprimento não-ideais.

A resposta de diferentes equipamentos frente à distúrbios que ocorrem na rede elétrica são amplamente difundidos na literatura técnica nacional e internacional. Dessa forma, é possível encontrar diversos estudos que apresentam a característica dos mais variados tipos de equipamentos eletroeletrônicos frente aos distúrbios supracitados. Em alguns deles, são apresentadas curvas de tolerância a um determinado tipo de fenômeno presente na rede elétrica. Tais curvas tem por objetivo indicar uma relação da sensibilidade ou suportabilidade dos equipamentos, na ocorrência de tais fenômenos. É possível identificar, deste modo, os limites operacionais de cada dispositivo, podendo-se fazer uma avaliação sobre a condição que determinado tipo de equipamento é capaz de continuar operando, mesmo estando sujeito à níveis indesejáveis de tensão na rede de suprimento.

Tratando-se simplesmente das curvas de tolerância, existem algumas que foram implementadas no passado e que são utilizadas até os dias atuais como referência para análise de sensibilidade ou suportabilidade de equipamentos eletrônicos, como são os casos das curvas CBEMA [7], ITIC [8] e SEMIF47 [9]. Tais curvas foram implementadas com o objetivo de avaliar a sensibilidade e suportabilidade dielétrica de equipamentos como computadores e semicondutores com o propósito de avaliar as condições operacionais de tais dispositivos em face aos eventos de tensão. Porém, é importante salientar que tais curvas não deveriam ser utilizadas como referência para todo e qualquer tipo de carga, como apontam os estudos realizados em [10] e [11], os quais apresentam críticas a tais curvas, mostrando seus pontos fracos e propondo alternativas para o levantamento de curvas acerca da susceptibilidade de equipamentos eletroeletrônicos.

Como forma a comprovar que as curvas usadas amplamente como referência não estabelecem uma relação fiel para a sensibilidade e suportabilidade de qualquer tipo de

---

dispositivo, torna-se indispensável que se faça o levantamento destas características dependendo do tipo de equipamento que está sendo utilizado, pois, o padrão para o estabelecimento dos limites dessas curvas muda de acordo com o tipo de carga e com a forma em que se dá o evento estudado (seja ele de afundamento ou elevação de tensão). Todas essas informações são relevantes para o levantamento e que, não estão contempladas nas curvas CBEMA, ITIC e SEMIF47, como indica [10], levando-se a aproximações equivocadas do que seriam os limites operacionais para determinado equipamento.

Uma alternativa para avaliar o grau de sensibilidade de equipamentos frente às VTCDs foi elaborada utilizando-se lógica difusa para tal, como apresentado em [12].

Tratando-se neste momento pontualmente da resposta de equipamentos eletroeletrônicos frente as variações de tensão de curta duração, pode ser verificado em [13] um estudo realizado sobre contadores e relés sendo alimentados por um gerador síncrono modificado para se obter afundamentos de tensão controlados nas três fases e obter ao final, curvas de sensibilidade para tais equipamentos, verificando também o custo efetivo para melhoria da performance de tais equipamentos frente as VTCDs.

Um dos primeiros estudos referentes à sensibilidade de equipamentos frente a fenômenos da rede elétrica foi apresentado em [14], o qual mostra o impacto na operação de computadores frente a distúrbios na rede elétrica. O estudo busca apresentar uma série de estudos de caso apresentando evidências na relação existente entre as interrupções de computadores devido à afundamentos momentâneos de tensão.

Outros estudos sobre esses mesmos dispositivos são mostrados em [15] e [16], onde são realizadas análises para avaliar a sensibilidade de computadores, contadores e lâmpadas. Os resultados obtidos para cada trabalho foram similares. A diferença entre ambos se deu no teste realizado nas lâmpadas, enquanto [15] mostrava o comportamento de lâmpadas de descarga, o [16] teve foco em lâmpadas fluorescentes e de vapor de mercúrio. Em [15] foi mostrado que dentre os equipamentos avaliados, o mais sensível foi a lâmpada de descarga, que se sensibiliza com um afundamento de amplitude igual a 80% do valor da tensão nominal e cuja duração para os piores casos estava entre 0,5-1 ciclo. Já os computadores mostraram ser sensíveis com um nível de tensão remanescente entre 50-60% e com duração de 100-150 ms. No caso dos contadores, foi mostrado que, normalmente, se sensibilizam com um afundamento de amplitude entre 40-50%. Em [16] foram encontrados valores bem próximos para contadores e computadores. No caso das

---

lâmpadas foi mostrado que, para as fluorescentes, sua operação começava a ser afetada quando ocorria um distúrbio o qual era capaz de fazer com que a tensão remanescente na rede fosse igual a 30% da tensão nominal, e, para as lâmpadas de vapor de mercúrio, um afundamento de amplitude igual a 40% e duração de 100 ms já era capaz de fazer com que a lâmpada se desligasse, mostrando-se que para um mesmo tipo de dispositivo, as respostas podem ser diferentes.

Em [17] e [18], foram realizadas análises para verificação do comportamento de inversores de frequência frente aos afundamentos de tensão. Foram conduzidos uma série de testes variando-se o tipo de distúrbio. As mudanças entre cada teste, se dava na quantidade de fases onde ocorria-se os distúrbios. Foram testados afundamentos em três fases, duas fases e em apenas uma fase. Os resultados mostraram que apesar do comportamento deste equipamento ser complexo, foi possível estabelecer uma representação genérica da sensibilidade de inversores de frequência para os mais variados tipos de afundamentos de tensão.

Seguindo essa mesma temática, em [19] pode-se verificar um estudo sobre a sensibilidade de inversores de frequência, CLPs, iluminação, computadores e contadores de motores de uma indústria e uma comparação com as curvas ITIC, CBEMA foi realizada.

Além dos estudos relatados até o momento, outro tipo de análise que é realizada dentro do âmbito da sensibilidade de equipamentos relaciona-se com a parada de processos industriais devido a atuação da proteção devido à ocorrência de uma VTCD. Para exemplificar isso, pode-se citar o trabalho feito em [20], onde seus autores analisaram a parada de processo de uma indústria automotiva e apresentaram algumas soluções para o problema, além de avaliar os prejuízos advindos desta parada. A causa do problema foi indicada como sendo a ocorrência de afundamentos de tensão, que culminaram na atuação dos dispositivos de proteção e na consequente parada do processo. Através de uma análise utilizando-se metodologia Kaizen, os autores concluíram que a melhor solução seria instalar um *Nobreak* na área da indústria que era mais prejudicada pelos afundamentos. Nota-se, que as variações de tensão podem vir a surtir efeitos negativos em plantas industriais onde necessita-se de uma tensão de suprimento quase que estacionária, em vista de que, com a automatização das cargas e dos processos, os dispositivos utilizados tendem a ser mais sensíveis às VTCDs por utilizar entre seus

---

componentes, circuitos eletrônicos, que tem a característica de ser mais susceptíveis as mudanças bruscas nas tensões de suprimento, conforme [1].

Outro trabalho realizado no âmbito de sensibilidade de equipamentos é mostrado em [21], onde foram abordados alguns estudos de caso envolvendo a má-operação de equipamentos de uma indústria. Com uma abordagem detalhada, este trabalho mostra o comportamento da sensibilidade de equipamentos como: resfriadores, controladores lógicos programáveis (CLPs), drivers de motores de corrente contínua e algumas ferramentas utilizadas para cortar, perfurar e processar materiais metálicos, mostrando mais uma vez, o efeito negativo resultando na parada de processos originado pelas VTCD.

Um outro estudo de caso foi demonstrado em [22], e inclui os resultados de medições de VTCDs que ocorreram em ambientes de consumidores residenciais e industriais. Através de algumas simulações, os autores conseguiram construir curvas de áreas de vulnerabilidade para uma instalação industrial. Além disso, foram propostas algumas medidas para atenuação dos afundamentos momentâneos de tensão através do uso de *Nobreaks on-line*.

Já em relação à estudos propondo uma avaliação da suportabilidade de equipamentos, alguns trabalhos foram publicados a fim de contribuir com a área de ressarcimento por danos elétricos, que têm apresentado um crescimento vertiginoso nos últimos tempos. Em [23], por exemplo, são apresentados os resultados de testes de sobretensões em vídeos-cassetes, televisores, DVDs e microcomputadores frente a impulsos de 4, 6 e 8 kV. O estudo forneceu informações sobre limites e desempenho de equipamentos para uma melhor compreensão sob os reais efeitos das sobretensões impulsivas na operação dos equipamentos.

Uma análise similar foi apresentada em [24], onde são investigados os principais distúrbios na qualidade da energia que podem causar danos em equipamentos eletrônicos. Neste artigo são apresentados os níveis aceitáveis de suportabilidade física dos dispositivos frente a distúrbios de tensão aplicados. O objetivo deste trabalho também se enquadra em prover dados técnicos para subsidiar a análise das solicitações de ressarcimento de consumidores, devido aos danos ocorridos em equipamentos eletroeletrônicos.

Já a dissertação de mestrado apresentada em [25], apresenta uma metodologia para elaboração de curvas de suportabilidade mais reais para microcomputadores, de forma a

não se basear na curva ITIC, além da realização de ensaios para testar a eficiência de dispositivos de atenuação como o Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS).

Além disso, a tese de doutorado indicada em [26] apresenta novas propostas para os limites de suportabilidade e sensibilidade quanto a tensão de suprimento para equipamentos da linha branca e televisor LED. Por fim, um outro trabalho realizado visando a análise da suportabilidade de equipamentos [6], apresenta um estudo onde diversos televisores, novos e antigos, foram submetidos a testes que simulariam distúrbios ocorridos na rede elétrica da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Todos estes trabalhos aqui apresentados proveram uma gama de respostas dos mais variados tipos de equipamentos, estando os mesmos sujeitos às VTCDs, além de mostrar a aproximação equivocada em se fazer uso de curvas como CBEMA, ITIC para indicar a característica de sensibilidade e suportabilidade de inúmeros equipamentos.

Entretanto, apesar de todos os trabalhos especificarem e discutirem com excelência os aspectos acerca das características de vários equipamentos frente às VTCDs, há uma escassez, tanto na literatura nacional, quanto internacional a respeito da característica de equipamentos utilizados para medir grandezas, como no caso deste trabalho, medidores eletrônicos de energia. A influência que tais fenômenos podem causar a este tipo de equipamento não foi encontrada em nenhum trabalho científico, onde, não só o mal funcionamento há de receber destaque, como também os prejuízos acarretados por não ser possível realizar a medição de determinada grandeza corretamente. Neste contexto, essa Dissertação objetiva apresentar o levantamento de uma série de curvas de sensibilidade e suportabilidade para os mais diversos modelos de medidores eletrônicos disponíveis no mercado e que são incorporados nas redes de distribuição das diversas concessionárias de energia do mundo todo.

O capítulo seguinte aborda a conceituação teórica a respeito das variações de tensão de curta duração, assim como o desenvolvimento analítico associado com as grandezas envolvidas na sensibilidade e suportabilidade deste tipo de equipamento.

---

## CAPÍTULO 3

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos teóricos e analíticos a respeito das VTCDs. De forma a abranger a temática proposta neste trabalho, esta seção objetiva abordar a definição e a metodologia para caracterização e quantificação das VTCD, além de mostrar através de equacionamentos, como ocorre a má operação dos dispositivos eletroeletrônicos frente a ocorrência de tais distúrbios. Além disso, são apresentadas as curvas conhecidas e já publicadas sobre a sensibilidade e suportabilidade de equipamentos.

#### 3.1 DEFINIÇÕES

As Variações de Tensão de Curta Duração por definição, são desvios significativos na amplitude do valor eficaz de tensão durante um intervalo de tempo estipulado de acordo com normas internacionais e/ou nacionais. Em geral, as VTCDs são associadas a faltas no Sistema Elétrico de Potência (SEP), falhas em equipamentos de proteção, chaveamentos, entrada e saída de cargas, etc.

Atualmente, existem diferentes terminologias utilizadas para classificação das VTCDs, as quais possuem nuances em relação ao tempo de duração dos eventos e amplitude, alterando-se de acordo com o tipo de norma considerada. A recomendação IEEE 1159 [27] classifica os eventos de tensão de curta duração quanto à magnitude como sendo: elevação (*swell*), afundamento (*sag*) ou interrupção (*interruption*), onde a intensidade da VTCD é avaliada como sendo a maior (elevação) ou menor tensão (afundamento ou interrupção) registrada durante a ocorrência do distúrbio. A IEEE também leva em consideração a duração do evento, classificando-os como: instantâneo, momentâneo ou temporário, conforme ilustra a Tabela 1, onde “c” representa a duração em ciclos e “s” representa a duração em segundos.

Tabela 1 - Classificação das VTCD, de acordo com a IEEE 1159.

Classificação		Magnitude ( $m$ )	Duração ( $d$ )
Instantâneo	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,8 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d \leq 30 \text{ c}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
Momentâneo	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,4 \text{ pu}$	$30 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} \leq m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d \leq 3 \text{ s}$
Temporário	Elevação	$1,1 \text{ pu} < m \leq 1,2 \text{ pu}$	$3 \text{ s} < d \leq 60 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 \text{ pu} < m \leq 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	

No Brasil, a principal referência sobre o assunto é representada pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [28]. Este documento, elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), têm o objetivo de estabelecer os procedimentos relativos à Qualidade da Energia Elétrica (QEE), definindo as terminologias, indicadores e metodologias, além de definir os valores de referência para os indicadores.

No contexto das VTCDs, o PRODIST inclui os eventos instantâneos na categoria dos eventos momentâneos, conforme mostra a Tabela 2. Dentre a classificação dada pela ANEEL têm-se a Variação Momentânea de Tensão, que é o tipo de variação com duração inferior a três segundos e a Variação Temporária de Tensão, a qual varia entre três segundos e três minutos.

Tabela 2 - Classificação dos tipos de VTCD pelo Módulo 8 do PRODIST.

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude de tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência</b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

### 3.2 PARÂMETROS DE ANÁLISE DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Quando se deseja realizar um estudo detalhado do impacto do afundamento ou elevação de tensão sobre uma carga específica, é importante analisar a forma de onda do distúrbio no tempo, mostrando seus eventuais desequilíbrios de módulo de fase e assimetrias angulares [1].

Para os propósitos deste trabalho, onde, na aplicação dos testes, serão gerados eventos em apenas uma única fase, serão desconsiderados os desequilíbrios, a assimetria e o comportamento dinâmico do fenômeno. Nesta dissertação, serão levados em conta, a magnitude, a duração e a frequência da ocorrência.

O item 8.2.2 do Módulo 8 do PRODIST estabelece em consonância com a normas europeias [29]-[30] os equacionamentos para caracterização de um evento individual de VTCD. As expressões utilizadas para determinação da amplitude e duração de um evento individual de VTCD, além da frequência de ocorrência do mesmo, são indicadas pelas Equações (1), (2) e (3), respectivamente:

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$V_e$  é a amplitude do evento de VTCD (em %);

$V_{res}$  é a tensão eficaz residual do evento de VTCD (em Volt);

$V_{ref}$  é a tensão eficaz de referência (em Volt).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (2)$$

Onde:

$\Delta t_e$  é a duração do evento de VTCD (em milissegundos ou ciclos);

$t_f$  é o instante final do evento de VTCD;

$t_i$  é o instante inicial do evento de VTCD.

$$f_e = n \quad (3)$$

Sendo:

$f_e$  a frequência de ocorrência de eventos de VTCD;

$n$  a quantidade de eventos de VTCD registrados no período de avaliação.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

A detecção e a caracterização dos eventos de VTCD deverão ser realizados, de acordo com [31], por meio de instrumentos de medição que considerem como parâmetro de referência, uma tensão fixa ou uma tensão média deslizando, calculada de acordo com a expressão (4).

$$V_{ref(n)} = 0,9967 \times V_{ref(n-1)} + 0,0033 \times V_{(12RMS)} \quad (4)$$

Sendo:

$V_{ref(n)}$  é o valor calculado da tensão de referência;

$V_{ref(n-1)}$  é o valor prévio da tensão de referência;

$V_{(12RMS)}$  é o valor da tensão eficaz média de 12 ciclos mais recente.

De acordo com [32], para cada evento de VTCD, deve-se considerar a variação momentânea ou temporária da tensão eficaz em um determinado barramento ou ponto de conexão. Dessa forma, é importante que se defina um método de registro da tensão eficaz ao longo do tempo. Para o cálculo do valor eficaz de tensão, é necessário se utilizar como base, os valores discretos amostrados diretamente da tensão instantânea, conforme mostrado pela Equação 5.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (5)$$

Sendo:

$N$  o número de amostras da tensão instantânea por ciclo da tensão fundamental;

$v_i$  a  $i$ -ésima amostra da tensão instantânea em cada ciclo;

$V_{rms}$  o valor eficaz calculado para uma janela de 1 ciclo de duração.

As referências [31] e [32] consideram que a Equação 5 deve ser aplicada a cada ciclo da tensão instantânea, a partir da passagem por zero. A diferença entre elas se dá na atualização (ou deslizamento de janela). Em [32], é mostrado que a atualização deve ser feita a cada  $\frac{1}{2}$  ciclo. Já em [31], estabelece duas formas possíveis de deslizamento, de acordo com a classe do medidor. Para os medidores Classe A, a atualização deve ser feita a cada  $\frac{1}{2}$  ciclo e, para os medidores Classe S, pode ser feita a cada 1 ou  $\frac{1}{2}$  ciclo. Em algumas referências, as terminologias  $V_{rms(1)}$  e  $V_{rms(1/2)}$  são utilizadas para identificar o modo de atualização do cálculo da tensão eficaz.

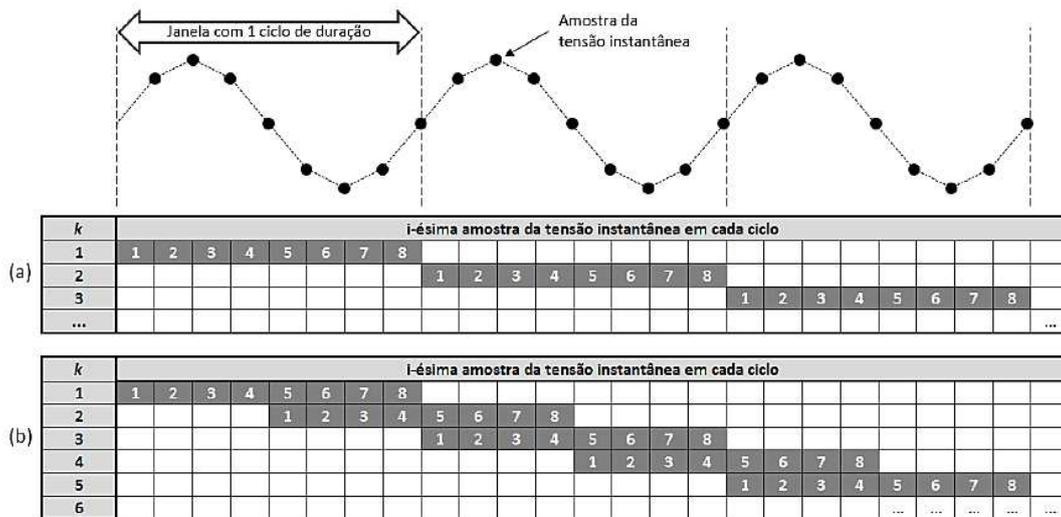


Figura 1 - Exemplo de cálculo do valor eficaz considerando-se uma taxa amostral de 8 amostras por ciclo, sendo: (a) deslizamento a cada ciclo e (b) deslizamento da janela a cada 1/2 ciclo.

Em relação a quantificação da duração de um evento, em [32] recomenda-se utilizar diferentes limites para se obter o instante inicial e final de uma VTCD. O limite final deve ser um valor igual ao usado para o limite inicial, acrescido (ou subtraído, no caso de Elevações Momentâneas de Tensão) de uma parcela conhecida como histerese. Essa terminologia não deve ser confundida com o fenômeno da histerese magnética, responsável pelo atraso entre a densidade de fluxo e o campo magnético em materiais ferromagnéticos. A parcela de histerese é necessária quando existem eventos nos quais a tensão comporta-se de forma oscilante em torno do limiar de identificação do instante final do evento, podendo resultar na caracterização de múltiplos eventos quando, na realidade, se trata de um único evento de VTCD. A Figura 2 ilustra a aplicação da histerese na caracterização de eventos de afundamentos e elevações momentâneas de tensão.

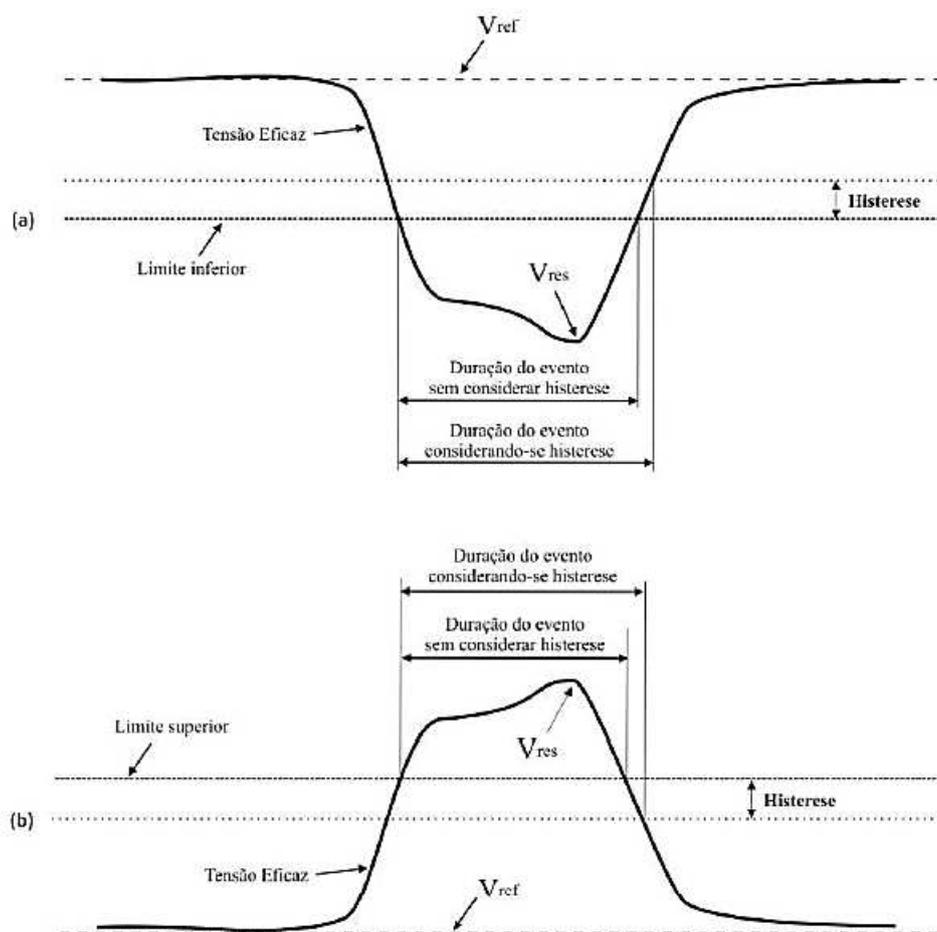


Figura 2 - Caracterização de eventos de VTCD com e sem a consideração de histerese em: (a) eventos de afundamento de tensão e (b) eventos de elevação momentânea de tensão.

A utilização da histerese não é relatada explicitamente no PRODIST, porém, no item 9.1.3 deste documento, estabelece-se que os instrumentos de medição devem atender aos requisitos mínimos estabelecidos por [31]. Dessa forma, o valor típico utilizado pelos medidores para esse parâmetro é igual a 2% da tensão de referência ( $V_{ref}$ ).

Ao final destas considerações, é possível se obter a amplitude do evento e a duração do mesmo e, com isso, caracterizá-lo de acordo as classificações dadas pelas normas de referência (Tabela 1 ou Tabela 2).

### 3.4 OS EFEITOS DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO SOBRE A FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

Com a evolução da indústria, mais e mais equipamentos estão sendo, atualmente, constituídos por complexos circuitos eletrônicos e microprocessadores, os quais, trazem uma otimização dos processos e um ganho na performance de tais equipamentos. Por outro lado, ao ser constituído de tais circuitos eletrônicos, estes equipamentos acabam por se tornar mais sensíveis aos diversos fenômenos associados com a qualidade da onda da tensão.

A fonte de alimentação de alguns equipamentos eletrônicos, a exemplo dos medidores de energia elétrica, é normalmente constituída por uma ponte retificadora a diodos, capacitores e um controlador de tensão, conforme mostrado na Figura 3.

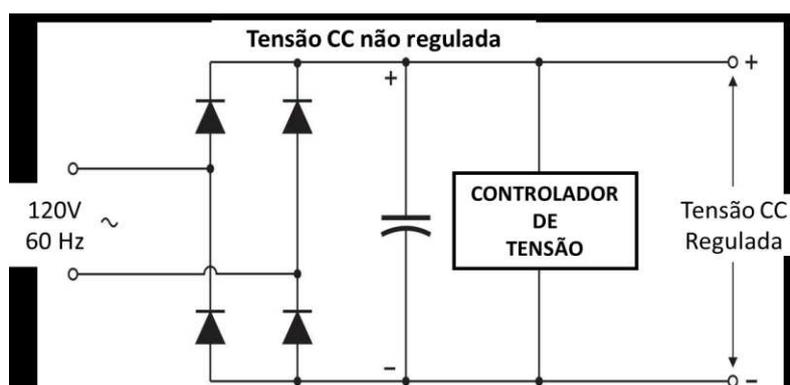


Figura 3 - Configuração básica de uma fonte de alimentação monofásica de um circuito eletrônico.

O comportamento da tensão não regulada no lado de corrente contínua, para o circuito apresentado na Figura 3, quando da ocorrência de um evento de afundamento momentâneo de tensão, sem nenhuma carga conectada ao retificador, foi levantado em laboratório e os resultados são mostrados na Figura 4.

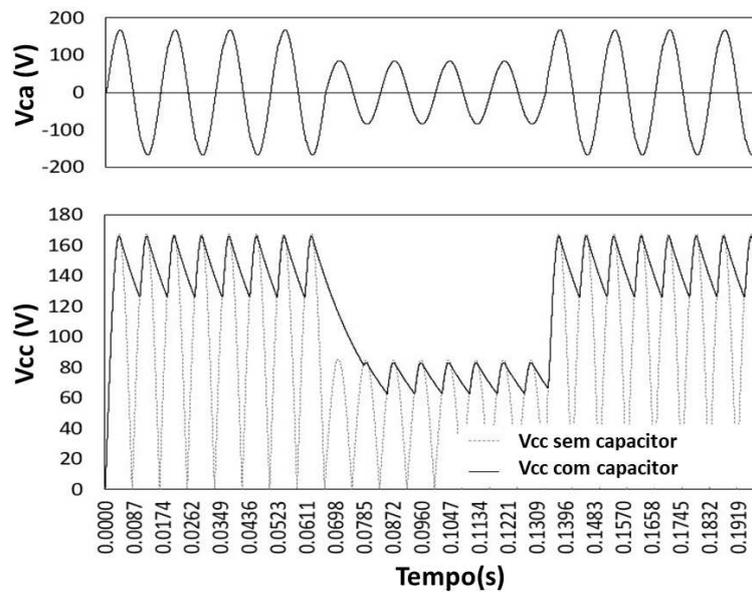


Figura 4 - Efeito de um afundamento de tensão no lado da tensão cc não regulada sob a condição de não ter carga.

Como pode ser verificado na Figura 4, quando se dá o início do evento de afundamento momentâneo de tensão no lado de *ca*, a tensão *cc* não regulada diminui consideravelmente e retorna ao seu valor nominal após o término do evento. Em condições de carga, a amplitude do afundamento da tensão *cc* não regulada é dependente da carga ( $P$ ) conectada ao retificador, da amplitude da tensão *cc* pré-existente ( $V_0$ ) e da capacitância do capacitor eletrolítico ( $C$ ). Nesse sentido, a abordagem analítica apresentada em [1] pode ser utilizada para compor a relação matemática existente entre essas grandezas. Considerando-se que a energia no lado *cc* ( $\frac{1}{2}CV^2$ ), após o início do evento de afundamento momentâneo de tensão, seja igual à energia acumulada antes do início do evento ( $\frac{1}{2}CV_0^2$ ) menos a energia consumida pela carga ( $P_t$ ), tem-se:

$$\frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}CV_0^2 - P_t \quad (6)$$

Manipulando-se a Equação 6, pode-se encontrar:

$$V^2 = \frac{\frac{1}{2}CV_0^2}{\frac{1}{2}C} - \frac{P_t}{\frac{1}{2}C} = V_0^2 - \frac{2}{C}P_t \quad (7)$$

Ou ainda,

$$V = \sqrt{V_0^2 - \frac{2P}{C}t} \quad (8)$$

Reescrevendo a Equação (8), pode-se obter:

$$V = \sqrt{\frac{V_0^2}{V_0^2} \times \left(V_0^2 - \frac{2P}{C}t\right)} = V_0 \sqrt{1 - \frac{2P}{CV_0^2}t} \quad (9)$$

Onde  $V$  representa a magnitude da tensão  $cc$  não regulada em um determinado instante  $t$  após o início do evento de afundamento momentâneo de tensão.

Antes da ocorrência do evento de afundamento momentâneo de tensão, em condições normais de operação, a variação de tensão não regulada no lado de corrente contínua é, em geral, muito pequena, de tal forma que a Equação (9) pode ser linearizada admitindo-se  $V = V_0$ , resultando, dessa forma:

$$V = V_0 \sqrt{1 - \frac{2P}{CV_0^2}t} \approx V_0 \left(1 - \frac{2P}{CV_0^2}t\right) \quad (10)$$

A tensão de *ripple* é definida como sendo a diferença entre a máxima e a mínima tensão verificada no lado de tensão contínua não regulada, de tal forma que seu valor máximo ocorre em  $t = 0$  e seu valor mínimo em  $t = T/2$ , onde  $T$  representa o período de um ciclo da frequência fundamental. Assim, a partir de (10), tem-se:

$$\begin{aligned} V_{ripple} &= V(0) - V\left(\frac{T}{2}\right) = \\ &= V_0(1 - 0) - V_0 \left(1 - \frac{2P}{CV_0^2} \frac{T}{2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

Resultando,

$$V_{ripple} = \frac{PT}{CV_0} \quad (12)$$

Por fim, reescrevendo (8) em termos de (12), resulta em:

$$V = V_0 \sqrt{1 - \frac{2V_{ripple}}{V_0 T}t} \quad (13)$$

De acordo com (13), a magnitude da tensão *cc* não regulada, em um determinado instante  $t$  após o início do evento de afundamento momentâneo de tensão, possui uma relação direta com a amplitude da tensão de *ripple* existente, a qual, por sua vez, depende da topologia do circuito retificador.

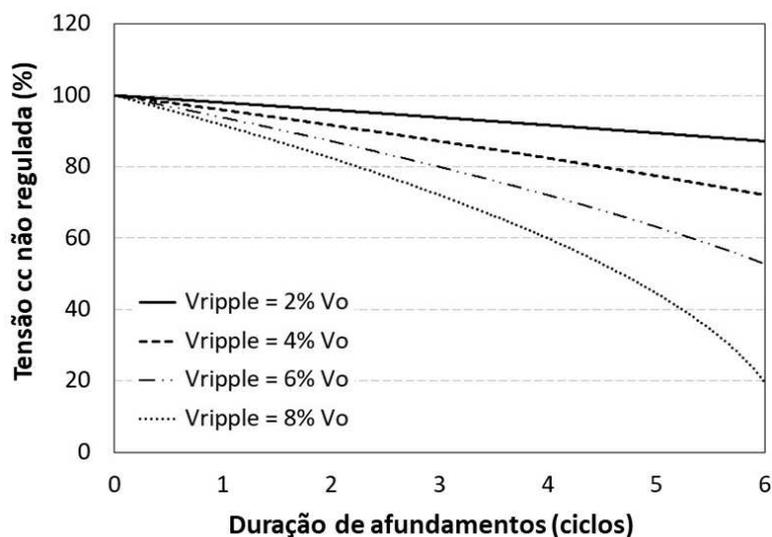


Figura 5 - Tensão *cc* não regulada imediatamente após a ocorrência de um afundamento de tensão.

Analisando a Figura 5, identifica-se que, quanto maior for a amplitude da tensão de *ripple* no lado de tensão *cc* não regulada do retificador, mais rápido será o decaimento da tensão ao longo do tempo após o início de um evento de afundamento momentâneo de tensão.

Em termos práticos, considerando-se agora os circuitos eletrônicos dos medidores de energia elétrica, tem-se que o *reset* desses equipamentos apresenta relação com a mínima tensão *cc* regulada entregue pela fonte de alimentação segundo a qual os seus elementos semicondutores conseguem operar normalmente. Basicamente, o principal componente presente nos dos medidores eletrônicos é um circuito integrado de alta precisão ao qual são incorporados os protocolos necessários para quantificação da energia elétrica a partir dos sinais de tensão e corrente. Nesse sentido, a Figura 6 apresenta a região de sensibilidade para a maioria dos circuitos integrados encontrados nos medidores de energia elétrica. Verifica-se que, para circuitos de alimentação com classe de 5V, os medidores irão apresentar um mau funcionamento sempre que a tensão regulada *cc* cair

abaixo de 4V, independentemente do tempo em que a tensão permanecer abaixo desse valor.

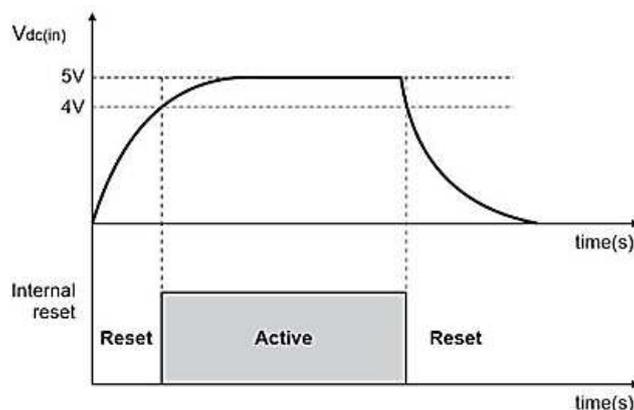


Figura 6 - Região de sensibilidade comumente verificada em circuitos integrados de medidores eletrônicos de energia elétrica. Fonte: [33].

Verifica-se que o tempo de reinicialização de cada medidor de energia elétrica, após a ultrapassagem da barreira de reset de seus circuitos integrados (conforme mostrado na Figura 6), irá depender das características específicas das diversas topologias dos circuitos eletrônicos desses medidores.

No próximo item, uma importante análise será realizada acerca da influência que os capacitores eletrolíticos, presentes entre os componentes dos medidores eletrônicos, têm em relação a sensibilidade dos mesmo, devida à sua relação inversamente proporcional com a tensão de *ripple*, e que acarreta em um decaimento maior ou menor em face aos eventos de afundamentos e interrupções de tensão, de acordo com o capacitor eletrolítico utilizado, mostrando que este componente, pode ser utilizado como forma a atenuar o mau funcionamento dos circuitos integrados durante a ocorrência dos afundamentos de tensão.

### 3.5 A INFLUÊNCIA DE CAPACITORES NA SENSIBILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS

A análise da topologia das fontes de suprimento utilizadas pelos mais diversos modelos e marcas de medidores de energia elétrica, converge para duas topologias específicas: fonte de suprimento isolada e fonte de suprimento não-isolada, como mostrado na Figura 7.

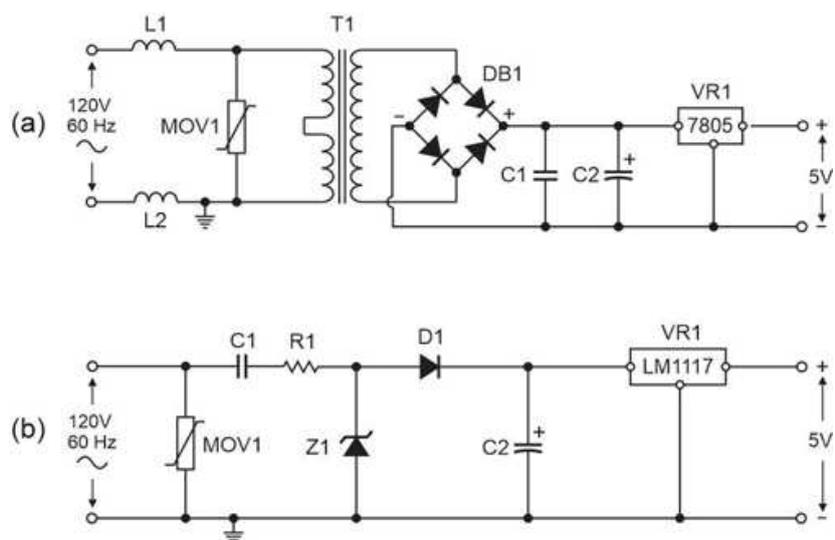


Figura 7 - Topologias de fontes de alimentação comumente encontradas em medidores eletrônicos de energia elétrica sendo: (a) Fonte isolada e (b) Fonte não-isolada

Como já verificado na Equação 13, assim como na Figura 5, a taxa de decaimento da tensão *cc*, após a ocorrência de um afundamento momentâneo de tensão, depende da amplitude da tensão de *ripple*. Ao mesmo tempo, conforme mostrado pela Equação 12, a tensão de *ripple* é dependente da capacitância alocada antes do regulador de tensão da fonte de alimentação.

De forma a comprovar esta relação, foi montado em laboratório um circuito que resumisse a operação da parte eletrônica de um medidor. Este circuito é suprido por uma fonte programável que insere em um dado instante, um afundamento na tensão, com o intuito de verificar a resposta da mesma após sua retificação, pois o circuito eletrônico é alimentado com tensão contínua. Foram testadas a resposta de 4 diferentes capacitores que variavam de  $47 \mu F$  até  $680 \mu F$ .

A Figura 8 mostra os resultados de testes realizados em laboratório considerando-se as duas topologias de fontes de alimentação comumente encontradas em medidores eletrônicos de energia elétrica, para diferentes valores das capacitâncias  $C2$  indicadas nas Figuras 7(a) e 7(b).

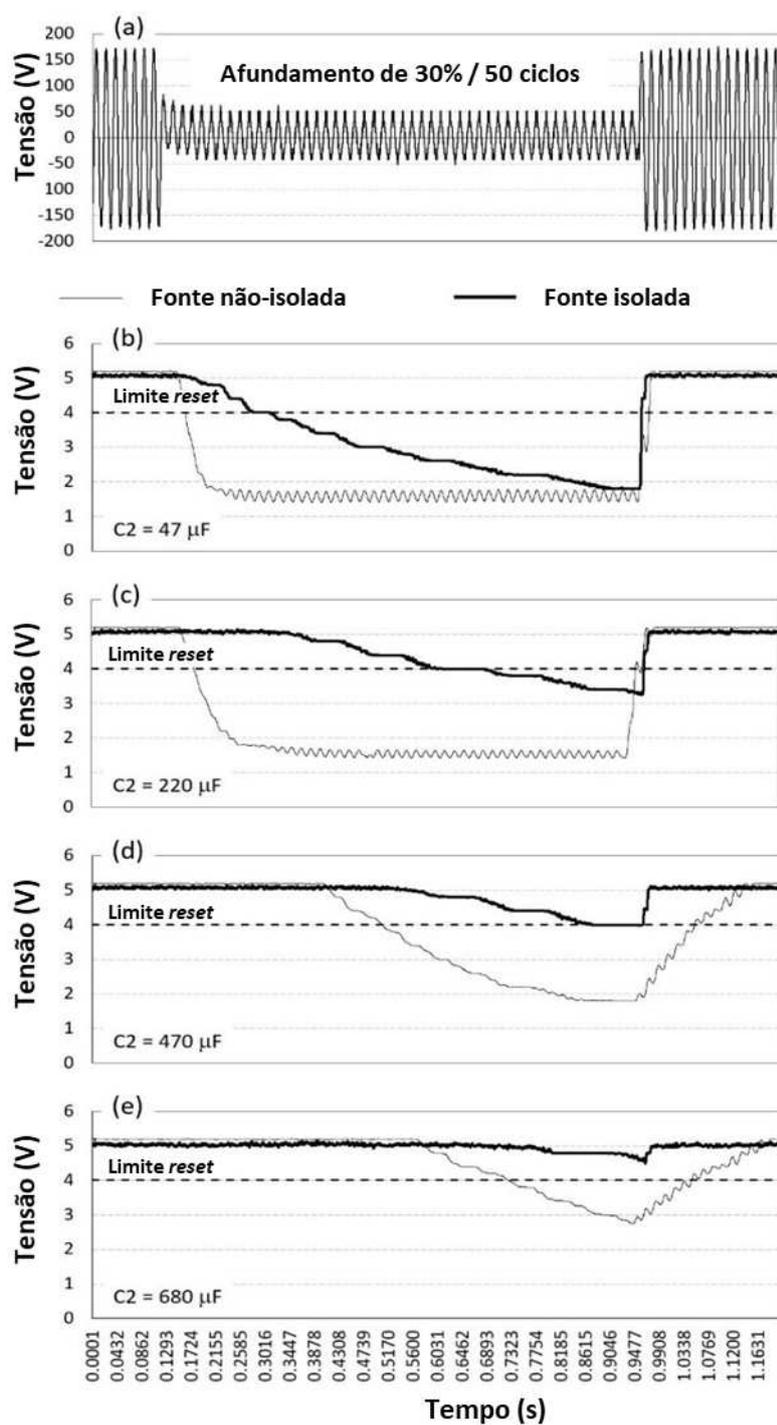


Figura 8 - A influência na resposta da tensão da fonte de suprimento isolada na presença de diferentes tipos de capacitores sendo: (a)  $C2 = 42\mu\text{F}$ , (b)  $C2 = 47\mu\text{F}$ , (c)  $C2 = 220\mu\text{F}$ , (d)  $C2 = 470 \mu\text{F}$  e (e)  $C2 = 680\mu\text{F}$

Como pode ser visto na Figura 8, quanto maior o valor da capacitância  $C2$ , mais lento será o decaimento da tensão no barramento cc ou, em outras palavras, menos sensível será o equipamento eletrônico frente às ocorrências de afundamentos

momentâneos de tensão. Isso se deve ao fato de quanto maior a capacitância  $C_2$ , maior será a energia armazenada no mesmo e, conseqüentemente, maior será o tempo necessário para o decaimento da tensão no barramento cc. No caso específico da Figura 8(e), considerando uma capacitância  $C_2$  igual a  $680 \mu F$ , a tensão regulada no lado de corrente contínua da fonte de alimentação, para um evento com 30% de tensão residual e 50 ciclos de duração, permaneceria sempre acima do limiar de 4V para as fontes de alimentação do tipo isolada (Figura 7(a)), não ocasionando o reset do medidor eletrônico associado à mesma. Ao mesmo tempo, todos os medidores constituídos por fontes de alimentação do tipo não-isoladas registrariam uma ação de reset quando da ocorrência do mesmo evento de afundamento momentâneo de tensão no lado de *ca*. Verifica-se pelos resultados obtidos na Figura 8 que, para o afundamento descrito anteriormente, apenas os capacitores de  $470$  e  $680 \mu F$ , a tensão se manteve acima dos 4V, fazendo com que, na hipótese da ocorrência deste afundamento, o medidor continuasse operando normalmente.

Dessa forma é importante salientar que, para regiões onde há grande ocorrência de afundamentos de tensão, seria uma boa prática a utilização de medidores com circuito eletrônicos mais robustos. Isso significa dizer que os mesmos deverão possuir capacitores eletrolíticos capazes de manter a tensão em níveis toleráveis, para que não ocorra o *trip* e, conseqüentemente, a perda de registro da informação sobre energia consumida.

### 3.6 LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES

Ao passo que se têm definida a metodologia de cálculo e caracterização das VTCD e seus efeitos nas fontes de alimentação de circuitos eletrônicos, verifica-se a necessidade da obtenção dos limites operacionais dos medidores eletrônicos frente a estes distúrbios. Sendo assim, esta seção encontra-se direcionada para a obtenção de tais limites, considerando-se, todavia, as questões diretamente relacionadas com as tensões presentes na rede de suprimento.

Destaca-se que, no que tange às tensões de suprimento dos dispositivos eletroeletrônicos, cabe observar que a correlação operacional destes com as tensões de rede pode ser ocorrer de duas maneiras. A primeira 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. Em outro extremo, têm-se 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, devido aos efeitos aqui denominados por níveis de sensibilidade às tensões.

Visando realizar a verificação das condições supra propostas, mas com foco em adquirir a resposta destas características para medidores eletrônicos de energia elétrica, é estabelecida uma metodologia para sistematizar, na forma de curvas de suportabilidade e sensibilidade às tensões, a qual deverá ser aplicada individualmente a cada medidor. Feita a proposição do processo de definição dos padrões ora postos, é feita proposta de estrutura física laboratorial para execução de testes com vistas à obtenção das características operacionais de tais medidores, ao qual será melhor abordada nos capítulos posteriores.

Embora se reconheça a existência de procedimentos para o estabelecimento de curvas de suportabilidade de diversos produtos empregados no mercado, há de se destacar a inexistência de padrões de suportabilidade a serem obedecidos pelos fabricantes de aparelhos eletroeletrônicos, como por exemplo, os medidores [34]. Neste sentido, são necessárias estratégias para a definição dos limites superiores (suportabilidade dielétrica) e inferiores (sensibilidade à tensão), temas estes que serão tratados de forma individual.

### 3.6.1 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA

A curva representativa dos limites superiores de suportabilidade, é indicada na Figura 9 [35], onde é apresentada a correlação entre os níveis de tensão responsáveis pela ruptura do isolamento em função do tempo de exposição do medidor a um determinado valor de tensão.

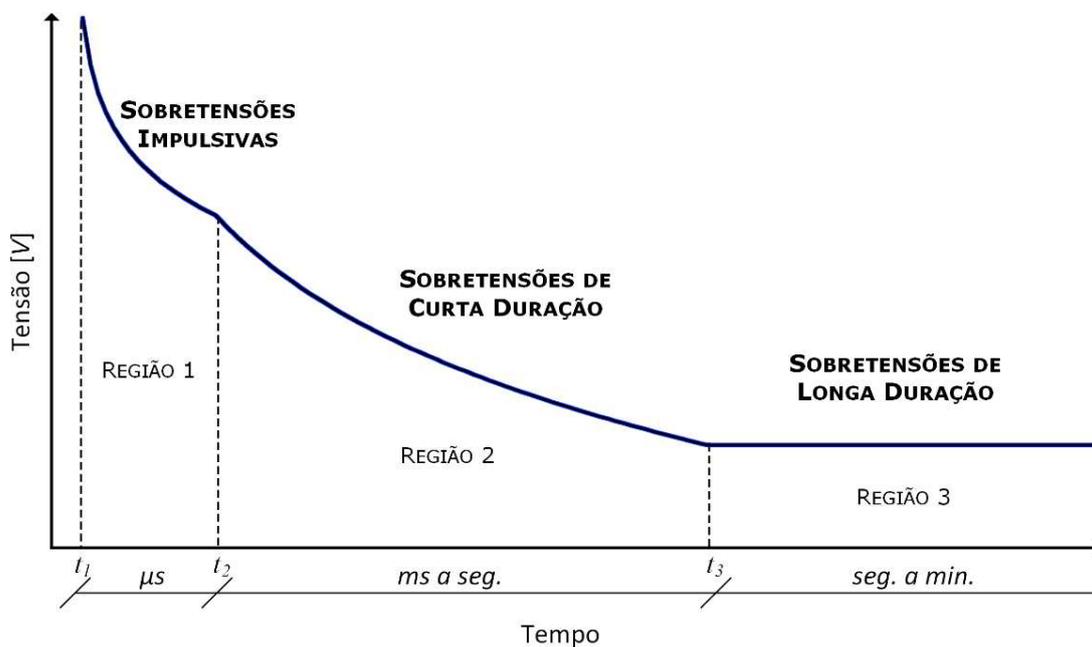


Figura 9 - Curva típica para a suportabilidade de tensão.

A curva ilustrada na Figura 9, indica a existência de três regiões, cada qual aplicável a fenômenos típicos manifestados nas redes elétricas e com características distintas. A Região 1 é destinada a representar os fenômenos transitórios impulsivos, já a Região 2 compreende os distúrbios de natureza transitória de maior duração (oscilações, elevações temporárias, etc.) e, por fim, a Região 3, representativa das sobretensões em 60 Hz associada com fenômenos de longa duração ou mesmo regime permanente. Estas regiões buscam 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 de perdas de carga e outros.

Verifica-se que o traçado da Região 1 envolve tempos da ordem de  $\mu s$ , e a Região 3, intervalos de cerca de alguns segundos e minutos. Optou-se, portanto, pela utilização de funções logarítmicas para a representação matemática das curvas de suportabilidade, conforme indicado pela Equação 14. 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 na forma de uma função logarítmica.

$$V(t) = \alpha \cdot \log t + \beta \quad (14)$$

Onde a função  $V(t)$  representa o comportamento variável do valor eficaz da tensão de suprimento do medidor, iniciando com maiores níveis e sendo, gradualmente reduzidos, de acordo com a natureza do fenômeno ocorrido.

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

$$\alpha = \frac{V(t_2) - V(t_1)}{\log t_2 - \log t_1} \quad (15)$$

$$\beta = V(t_1) - \alpha \cdot \log t_1 \quad (16)$$

Os demais seguem a mesma particularidade, utilizando-se da Equação 14 com os seus coeficientes determinados nos termos estabelecidos pelas Equações 15 e 16 acima.

### 3.6.2 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAÇÃO DOS LIMITES DA SENSIBILIDADE ÀS TENSÕES

Partindo-se para o outro extremo, da caracterização dos limites a sensibilidades operacionais dos medidores quanto da ocorrência de afundamentos e interrupções da tensão de alimentação, foram, basicamente, estabelecidas as 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 nas premissas estabelecidas, foram viabilizados meios para testes de desempenho com medidores eletrônicos alimentados, num primeiro momento, supridos com tensão nominal. Na sequência foram utilizadas tensões associadas com variações compreendidas entre 0% e 90% do valor nominal, com durações de 0,1 a 10000 ciclos. Devido a duração compreender um grande número de ciclos, optou-se pela utilização de uma escala logarítmica, de forma similar à metodologia empregada para a caracterização da suportabilidade dos medidores. Ao passo que o medidor se sensibilizasse, era demarcado um ponto em um sistema cartesiano, obtendo-se ao final dos 10000 ciclos, o

comportamento do equipamento em relação à sua sensibilidade perante os afundamentos e interrupções de tensão. O algoritmo utilizado para o levantamento das curvas está ilustrado no fluxograma da Figura 10.

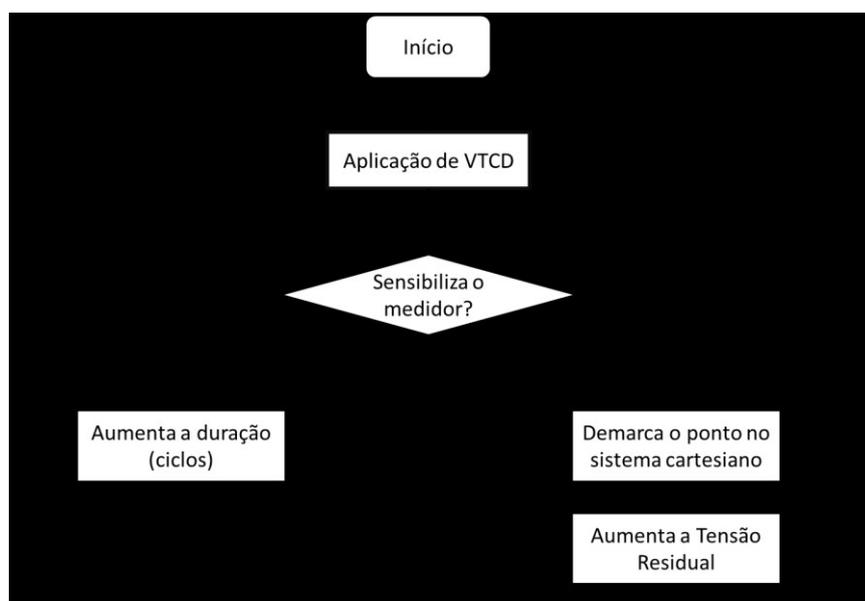


Figura 10 - Fluxograma representativo do processo iterativo para demarcação de pontos na curva de sensibilidade.

Para confirmar a sensibilidade do medidor eletrônico, foi necessário a utilização de um leitor de pulsos, onde se encontrava conectado em sua saída, um osciloscópio para verificar visualmente o comportamento dos pulsos luminosos, como é indicado na Figura 11.

O leitor de pulso por sua vez, processa os sinais luminosos, convertendo-os em um sinal que é interpretado pelo conversor de pulso, traduzindo-o em um valor de potência medida. No caso deste trabalho, a utilização do leitor e conversor de pulsos foi tão somente necessária para confirmar o *trip* dos medidores no momento em que o mesmo estivesse submetido a uma VTCD, através da visualização no osciloscópio, não importando neste momento, a potência medida.



Figura 11 - Conversor de pulsos conectado a um osciloscópio para registro de pulsos luminosos.

O tempo médio entre os pulsos luminosos varia de acordo com a constante  $K_H$  de cada medidor eletrônico, que representa um valor de energia consumida para cada pulso luminoso emitido, e a potência medida pelo equipamento testado. Esse tempo médio é calculado conforme explicitado na Equação 17.

$$T_{\text{médio}} = \frac{3600 \cdot K_H}{P} \quad (17)$$

Onde:

$T_{\text{médio}}$  é o tempo médio entre os pulsos;

$K_H$  a constante de Watt-Hora por pulso;

$P$  a potência medida pelo equipamento testado.

Uma vez submetidos aos distúrbios de afundamento e interrupções, obteve-se a característica da curva de sensibilidade de cada medidor eletrônico, que será apresentada nos próximos capítulos.

### 3.6.3 CURVAS DE SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA E SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES CONHECIDAS E JÁ PUBLICADAS NA LITERATURA

Equipamentos eletroeletrônicos apresentam diferentes respostas em face às VTCD. Para caracterizar o impacto que uma dada VTCD exerce sobre os equipamentos, são levantadas as curvas de sensibilidade e/ou suportabilidade por classes de cargas, de modo a caracterizar o desempenho médio dessas cargas sob condições que seriam classificadas como VTCD. Uma vez conhecidas tais curvas, elas podem ser utilizadas para identificar a região de operação normal do equipamento.

Diferentes curvas foram propostas ao longo do tempo, para descrever a operação de diferentes tipos de equipamentos na área de informática e na fabricação de elementos semicondutores. Esta seção tem por fim, apresentar alguns destes exemplos encontrados na literatura.

Dentre as mais utilizadas neste meio, uma de grande destaque é a curva CBEMA (*Computer and Business Manufactures Association*) [7]. Esta curva foi criada afim de servir como guia para os fabricantes de equipamentos na área de informática e relaciona as variações de tensão e respectivas durações suportáveis e envolvem questões associadas com os limites dielétricos e operacionais, como indicado na Figura 12.

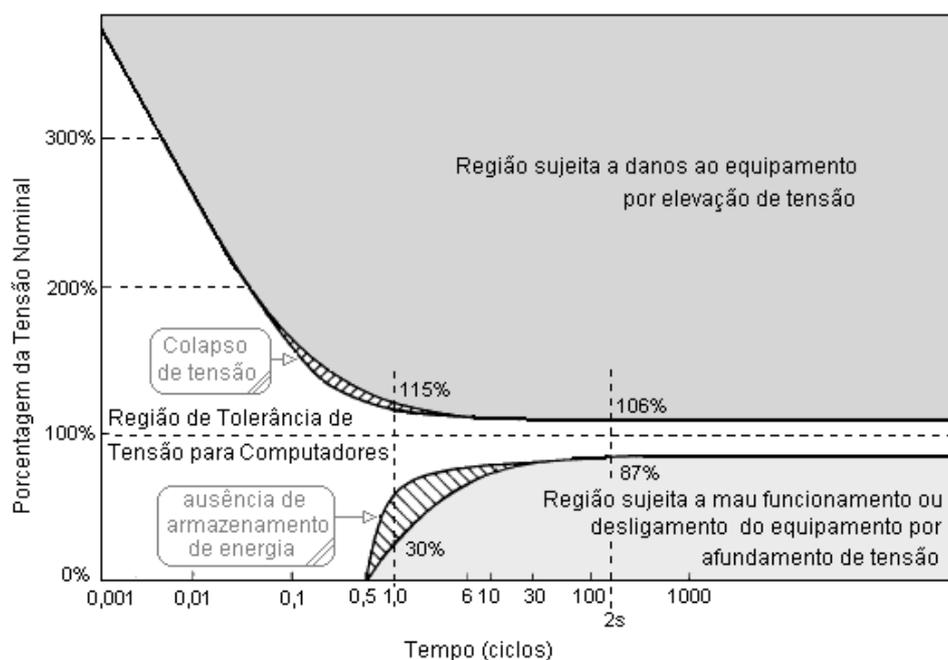


Figura 12 - Curva CBEMA: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores.

Em 1997 foi proposta uma nova versão para os limites anteriormente estabelecidos por [7]. O resultado ficou conhecido como curvas CBEMA/ITIC ou simplesmente ITIC [8] (*Information Technology Industry Council*). A curva é mostrada na Figura 13.

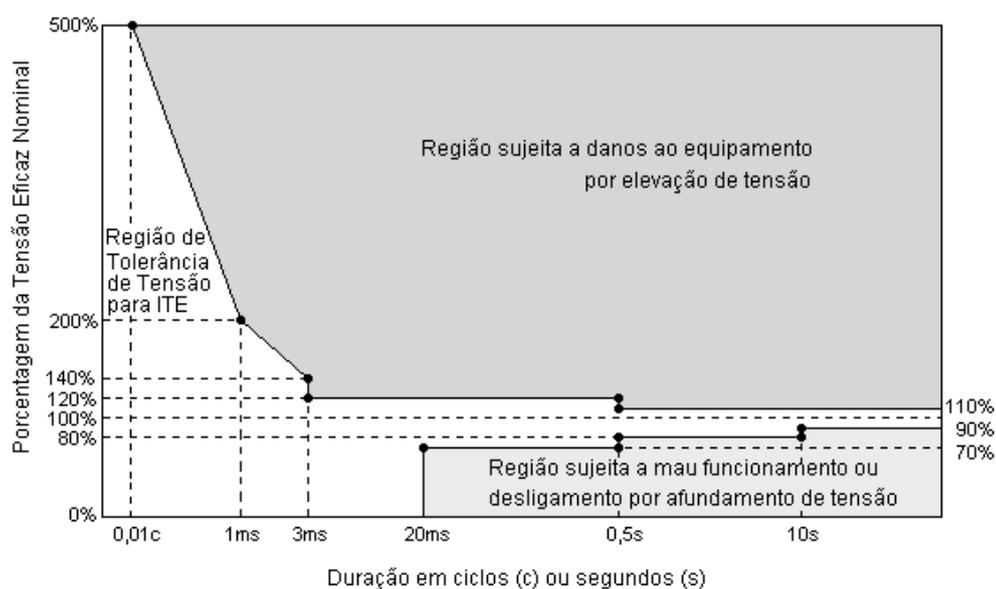


Figura 13 - Curva ITIC: Limites de suportabilidade e sensibilidade para microcomputadores.

Apesar de ter sido originalmente derivada de ensaios e experiências atreladas à área de tecnologia da informação, a curva anterior é amplamente utilizada para caracterização de diversos tipos de equipamentos eletroeletrônicos. 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 equipamentos presentes nas instalações elétricas, incluindo-se os medidores eletrônicos de energia, cerne desta dissertação.

Outra curva de sensibilidade de equipamentos é apresentada pela *Semiconductor Equipment and Materials International* – SEMI. A SEMI é uma associação mundial de indústrias produtoras de semicondutores, que propõe a utilização do documento *Standard SEMI F47 – 0706* [9]. Neste documento, são definidos padrões de tolerância frente aos afundamentos e interrupções de tensão para processos industriais onde são fabricados equipamentos semicondutores. A curva SEMI F47 é ilustrada na Figura 14.

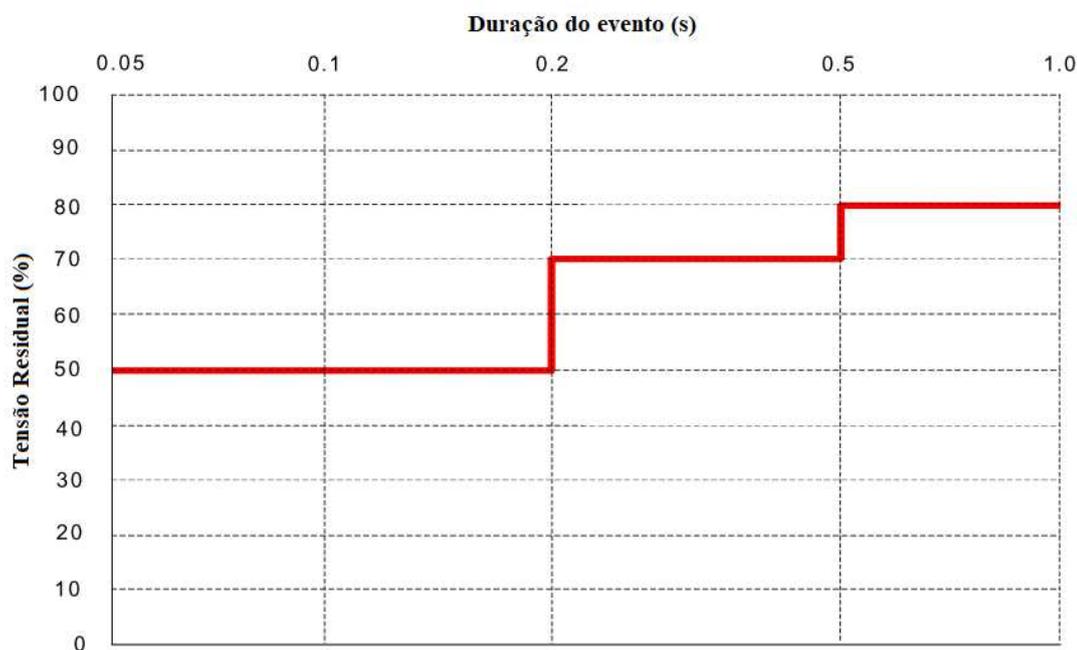


Figura 14 - Curva SEMI F47: Curva de sensibilidade para processos industriais de fabricação de semicondutores.

A empresa distribuidora AES Sul também desenvolveu trabalhos publicados em parceria com centros de pesquisas. Os resultados obtidos apresentam os limites de suportabilidade para alguns equipamentos eletrodomésticos, como indicado na Figura 15. A título de comparação, também se encontra inserida na figura, a curva CBEMA. As

indicações em vermelho estão atreladas com televisores novos, enquanto que o resultado em verde expressa equipamentos usados.

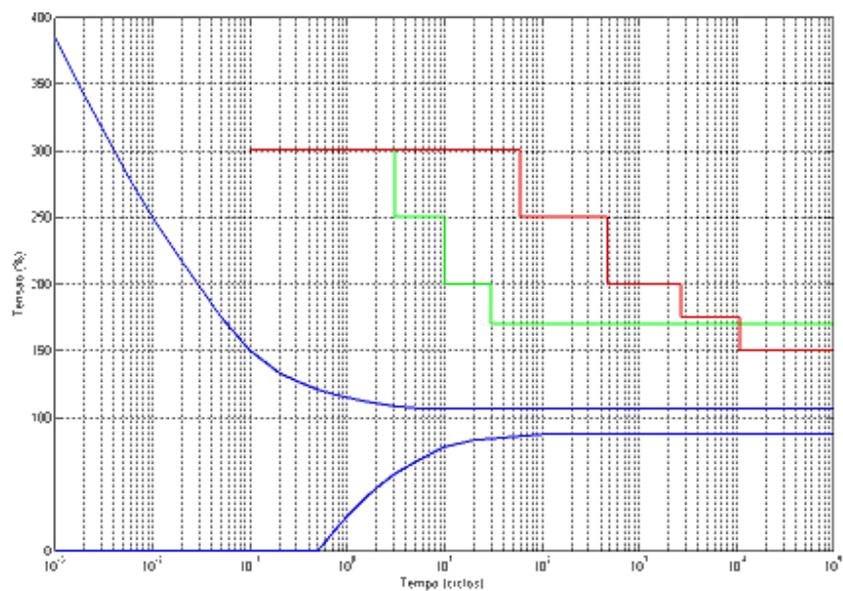


Figura 15 - Curva AES SUL: Limites de suportabilidade para televisores a tubo – novos e usados.

À luz do exposto segue que esta dissertação avança no sentido de realizar trabalhos com objetivos similares aos acima, considerando, todavia, medidores eletrônicos de energia elétrica, como detalhado nos Capítulos 4 e 5.

## CAPÍTULO 4

### SENSIBILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS

Os efeitos dos afundamentos e interrupções de tensão já apresentados no Capítulo 3 mostram o impacto que este tipo de distúrbio é capaz de causar nos mais diversos tipos de equipamentos, causando a interrupção da operação dos mesmos, fazendo-se necessário o levantamento da característica dos equipamentos quando os mesmos se encontram submetidos a uma tensão de suprimento com atenuações em seu valor eficaz.

Neste sentido, os medidores eletrônicos também estão susceptíveis a estes distúrbios, uma vez que, em sua composição, encontra-se um circuito integrado, responsável pelo processamento e cálculos, como por exemplo, da potência elétrica, da energia consumida, da tensão eficaz, da frequência da rede, etc. Este componente, quando sujeito a uma tensão de suprimento fora da sua faixa de operação, como apresentado na seção 2.4, acaba por sofrer o processo conhecido popularmente como *reset*, que é quando acontece o desligamento do dispositivo, impossibilitando a realização dos devidos cálculos, fazendo com que não sejam emitidos os pulsos luminosos no intervalo esperado. Portanto, se faz necessário o levantamento da característica de sensibilidade para este tipo de equipamento, uma vez que o mesmo se encontra sujeito ao mau funcionamento devido os distúrbios que acontecem diariamente na rede de distribuição.

Em consonância com a metodologia da subseção 3.6.2, esse capítulo mostrará a execução dos ensaios laboratoriais para o levantamento das curvas de sensibilidade para uma série de medidores e os resultados encontrados para este tipo de equipamento.

Ademais, este capítulo trará informações acerca do tempo em que os medidores levaram para voltar às condições normais de operação. Ao se obter tal informação, será utilizado um exemplo real de registro de VTCD para verificar quantas vezes cada medidor se sensibiliza caso estivesse inserido na zona onde o registro de VTCD foi realizado, obtendo-se no final, o tempo que cada medidor deixou de registrar a energia elétrica consumida da rede de distribuição.

#### 4.1 ESTRUTURA LABORATORIAL PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES DE SENSIBILIDADE OPERACIONAL ÀS TENSÕES

Com a intenção em reproduzir a estratégia descrita na subseção 3.6.2, a qual consiste em aplicar afundamentos e interrupções de tensões em frequência de 60 Hz com durações definidas, foram utilizados os recursos laboratoriais apresentados nas Figuras 16 e 17.

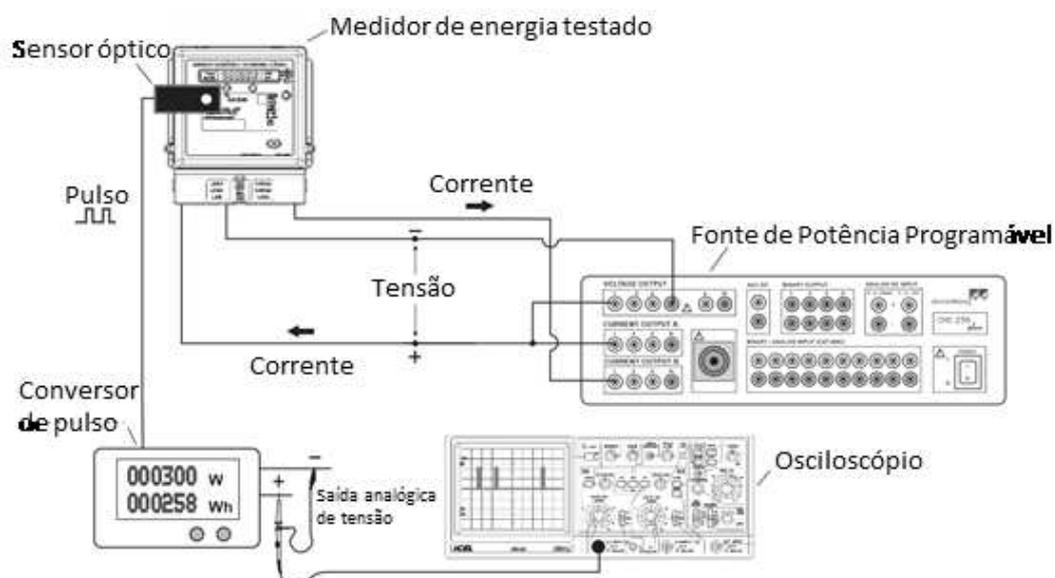


Figura 16 - Estrutura a ser montada em laboratório para execução de testes para levantamento da curva de sensibilidade de medidores eletrônicos.

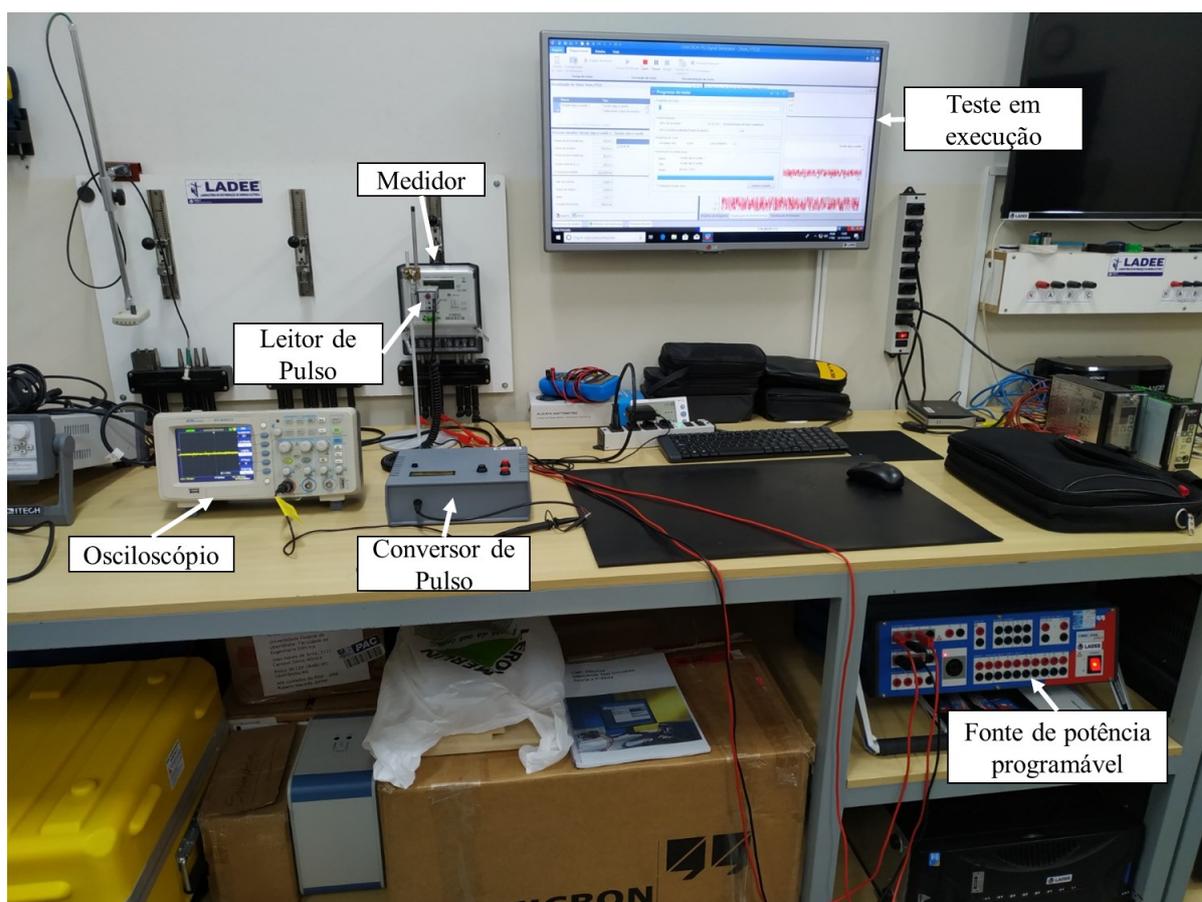


Figura 17 - Estrutura física utilizada para realização de testes de sensibilidade de medidores eletrônicos.

Cabe ressaltar que a fonte de potência utilizada foi o modelo CMC 256 Plus da OMICRON. Esse modelo é capaz de simular diferentes distúrbios, sendo neste caso, utilizada para simular afundamentos e interrupções na tensão de fornecimento do medidor.

#### 4.2 CARACTERÍSTICAS DO TESTE PARA LEVANTAMENTO DA CURVA DE SENSIBILIDADE DOS MEDIDORES

Na configuração da fonte programável, foi colocado como padrão uma corrente de 10 A e a tensão sendo 120 ou 240V, dependendo do modelo do medidor. Sabendo-se da tensão e corrente de entrada do medidor, é possível calcular a potência medida pelo mesmo, através do produto entre tensão e corrente, totalizando 1200W ou 2400W, dependendo do valor da tensão de fornecimento. Inserindo-se este valor na Equação 17 e

de posse do valor da constante  $K_H$  dos medidores, é possível calcular o tempo médio entre os pulsos para a condição normal de operação dos medidores.

Para o levantamento da característica da sensibilidade de medidores foram efetuados ensaios num total de 32 medidores. Grande parte desses medidores possui a constante  $K_H$  com valor igual a 1. Dessa forma, ao inserir este valor de exemplo na Equação 17, obtêm-se, para a maioria dos medidores, um tempo médio entre pulsos de 3 segundos para medidores com tensão de 120V e 1,5 segundos quando aplicada uma tensão de 240V.

A tensão imposta aos medidores se deu entre os terminais da fase A e neutro, que passa por um divisor resistivo, para chegar aos terminais da fonte eletrônica uma tensão de 5V. Na ocorrência do distúrbio, o valor eficaz da tensão da fase A têm seu valor alterado, causando também, alterações no valor da tensão na entrada da fonte eletrônica, podendo levar ao *trip* do circuito eletrônico do medidor dependendo da amplitude e duração do evento.

Todos os afundamentos e interrupções simulados na fonte de potência programável foram ajustados para iniciar no instante que a onda de tensão passa por zero, caracterizando um distúrbio que ocorreu em 0° da onda de tensão.

O teste inicia-se simulando uma interrupção de 0,1 ciclo de duração e ao passo que o medidor se sensibiliza, incrementa-se o valor da tensão residual e assim dá-se a execução do fluxograma apresentado na Figura 10 da subseção 3.6.2 desta dissertação.

### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS

Uma vez definidas e estabelecidas as estruturas laboratoriais, os medidores eletrônicos foram então submetidos às situações envolvendo a aplicação de tensões com as características impostas na subseção 3.6.2 obtendo-se as respostas apresentadas neste capítulo.

#### 4.3.1 CURVAS DE SENSIBILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS

Serão apresentados neste momento as curvas encontradas para todos os medidores testados. Foram levantadas, no total, 32 curvas de sensibilidade, englobando-se a maioria dos medidores eletrônicos disponibilizados no mercado. A denotação utilizada para

diferenciar os medidores se deu da seguinte forma: letra seguido de número. A letra indica o fabricante do medidor e o número indica o modelo do medidor para determinado fabricante.

A Figura 18 apresenta as curvas obtidas para os medidores eletrônicos do Fabricante A. Nota-se uma grande discrepância entre os resultados encontrados, comprovando-se que até mesmo para o mesmo fabricante, verificam-se respostas diferentes quanto à sensibilidade perante interrupções ou afundamentos de tensão. Além disso, a Figura 18 apresenta dois medidores que se destacam, um por sua robustez (Medidor A.01) e outro por ser extremamente sensível (Medidor A.02).

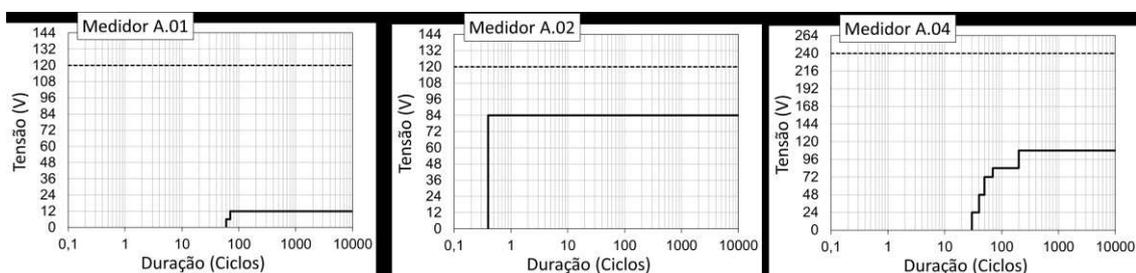


Figura 18 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante A.

O medidor A.02 apresenta uma grande área de sensibilidade, tendo o início de seu mau funcionamento com interrupções que ocorrem com duração de 0,4 ciclo, e sua tensão residual se estende até o nível de 84V, valor este que representa 70% do valor nominal. Dessa forma, qualquer evento que ocorra abaixo de sua curva, irá sensibilizá-lo.

Já o medidor A.01 apresenta robustez perante os fenômenos associados à redução do valor eficaz de tensão. Verifica-se que sua curva de sensibilidade inicia com interrupções de 60 ciclos de duração e sua amplitude chega no máximo a 12V, representando uma sensibilidade para eventos onde a tensão residual chega a um patamar igual a 10% do valor nominal.

A Figura 19 apresenta as curvas encontradas para os medidores do Fabricante B. Para o caso deste fabricante, foram encontradas curvas idênticas em relação à sensibilidade para os medidores B.03, B.04 e B.05, para os quais a curva se iniciou para interrupções com duração de 7 ciclos, e a tensão residual se estendeu até um patamar representativo de 65% da tensão nominal. Para qualquer evento compreendido abaixo

deste valor de tensão residual e com duração maior ou igual a 7 ciclos resultará no *trip* do circuito eletrônico presente dentro destes medidores.

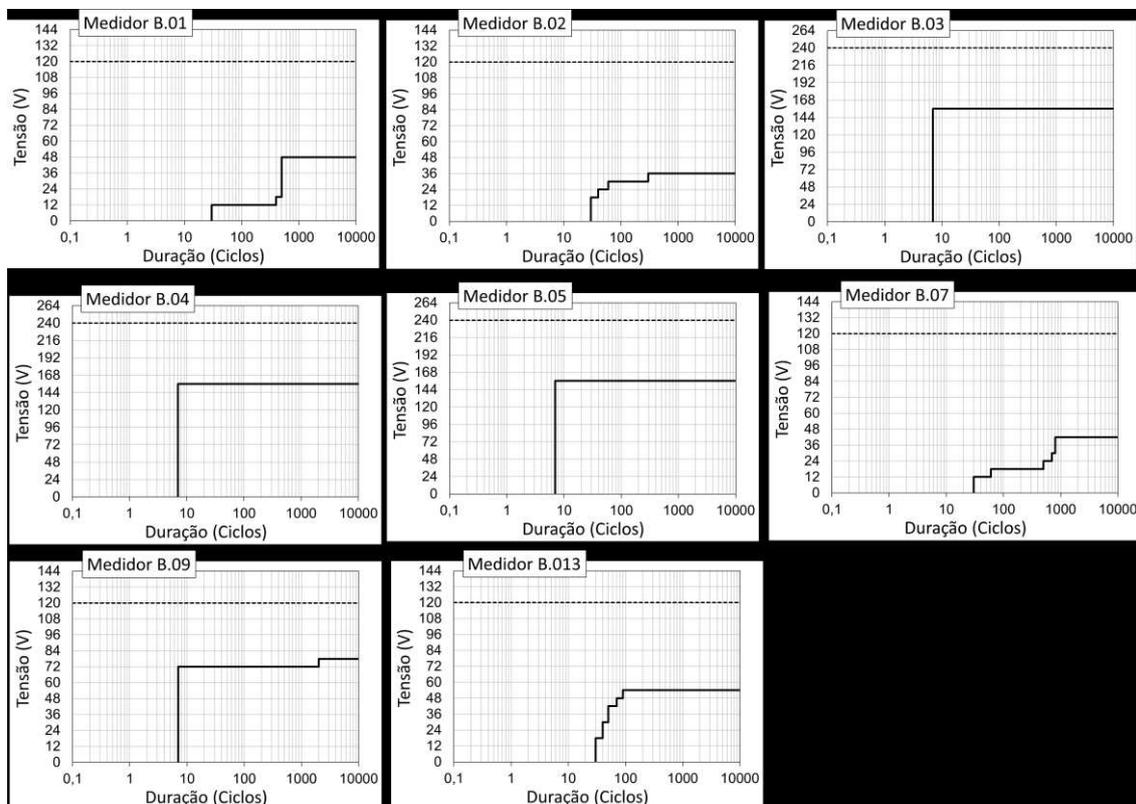


Figura 19 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante B.

Resposta semelhante foi encontrada para o medidor B.09, com a diferença de que este medidor opera numa tensão nominal de 120V. Para este medidor, interrupções com duração igual ou acima de 7 ciclos resultam no desligamento do medidor. Sua curva se estende até um patamar onde a tensão residual chega a 60% do valor nominal, até eventos de 2000 ciclos. A partir deste ponto, o medidor começa a se sensibilizar com eventos com tensão residual igual à 65% da tensão nominal.

Para os medidores B.01, B.07 e B.013, as curvas iniciam-se com interrupções com duração de 30 ciclos, porém, atingem patamares diferenciados, para durações diferentes.

Para o Fabricante C, foram obtidas as respostas apresentadas na Figura 20, onde destaca-se a robustez do medidor C.06 que inicia sua curva de sensibilidade com interrupções de duração igual a 60 ciclos e sua amplitude, chega, a no máximo, 20% da tensão nominal. Outro destaque, cabe ao medidor C.02, que possui a maior sensibilidade dos medidores do Fabricante C, tendo o início de sua curva para interrupções de 30 ciclos

de duração e sua amplitude chega até um valor de tensão residual igual a 55% do valor nominal.

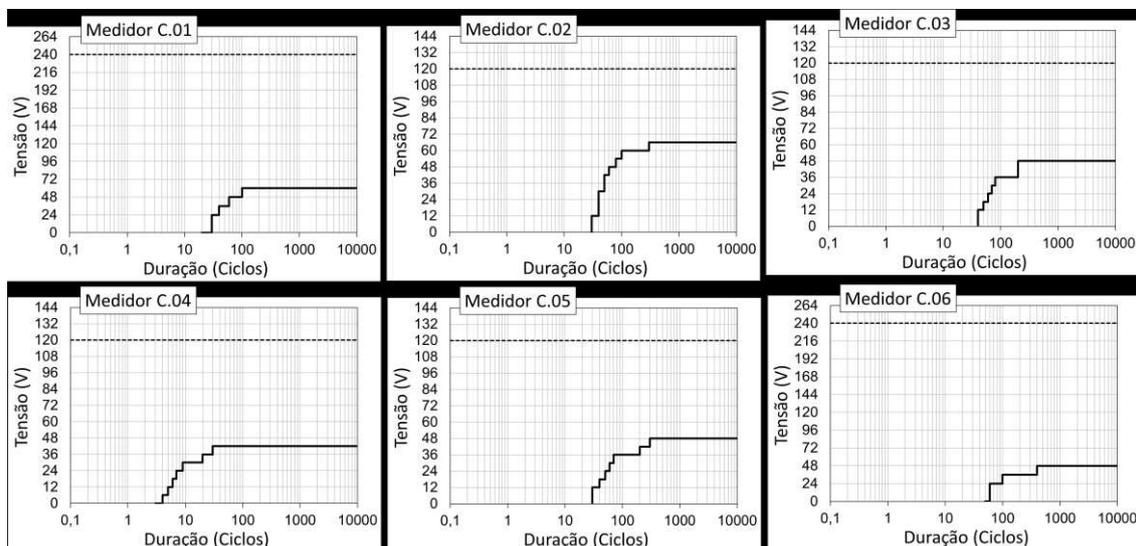


Figura 20 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante C.

A Figura 21 apresenta os resultados encontrados para os medidores do Fabricante D. Verifica-se uma robustez para os medidores D.01 e D.04, que iniciam suas curvas com interrupções com 9 ciclos de duração, porém, abrangem uma área, onde o máximo que a tensão residual alcança, representa 20% do valor nominal. Isso implica em dizer que todos os afundamentos onde a tensão não reduza a este valor, não irão interferir na operação destes medidores.

Cabe destacar a curva dos medidores D.02 e D.03 por possuírem robustez em relação a duração dos eventos, tendo o início de suas curvas em 90 ciclos, e também em relação a amplitude, chegando no máximo, respectivamente, a uma tensão residual de 45% e 40% dos valores nominais de tensão.

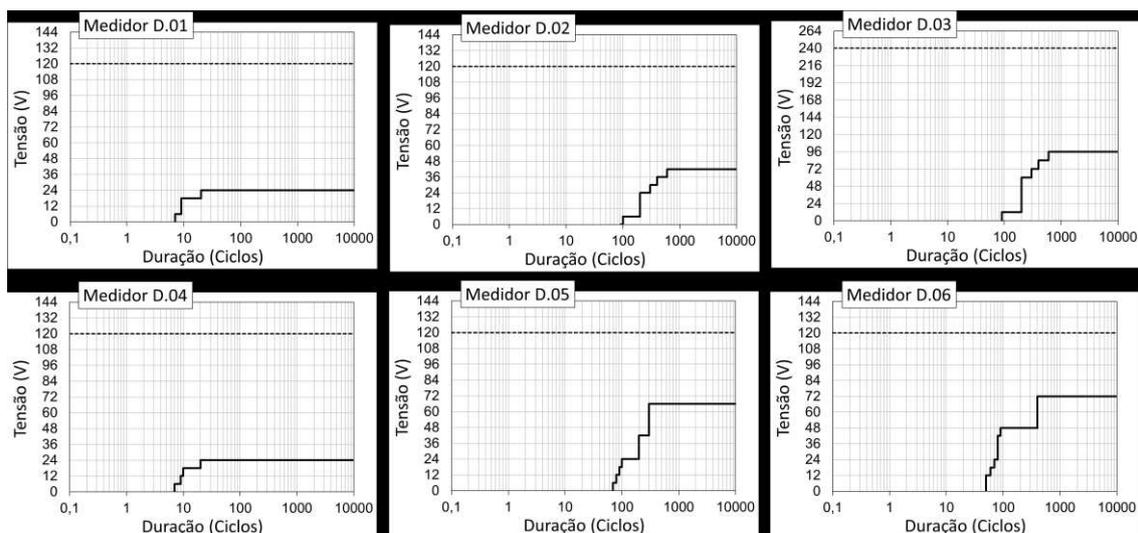


Figura 21 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante D.

Para os medidores do Fabricante E, suas curvas são apresentadas na Figura 22. As respostas encontradas mostram uma grande discrepância de um medidor para outro, mostrando mais uma vez, a necessidade do levantamento de tais curvas para este tipo de equipamento.

O medidor E.02 inicia sua curva para interrupções com 20 ciclos de duração e alcança para esta mesma duração um patamar de tensão residual igual a 60% da nominal, ou seja, qualquer evento com duração acima de 20 ciclos, onde ocorrem-se afundamentos que a tensão reduza seu valor eficaz para 60% do valor nominal iram ocasionar o *trip* do circuito eletrônico do medidor.

Já o medidor E.03 têm sua curva iniciando com interrupções iguais a 100 ciclos, sendo este o medidor mais robusto em relação a duração. Cabe ressaltar também que a amplitude da curva chega a um valor representativo de 30% do valor nominal da tensão de suprimento.

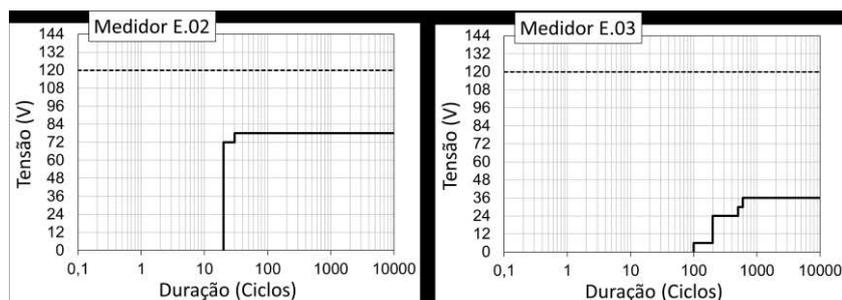


Figura 22 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante E.

O Fabricante G, com a curva de seus medidores apresentada na Figura 23, mostra que grande parte das curvas apresentadas, possuem uma grande área de sensibilidade, tendo início com interrupções de 2 ou 3 ciclos de duração. Já em relação a tensão residual, para o medidores G.03 e G.04, chega a 70% da tensão nominal, já para os medidores G.01 e G.02, alcançam, respectivamente, 65% e 60%.

O medidor G.05 é definido como o medidor mais robusto dentre os medidores do Fabricante G, tendo o início de sua curva para interrupções igual a 2 ciclos, assim como os outros medidores, porém, sua tensão residual chega, a no máximo, 30% do valor da tensão nominal.

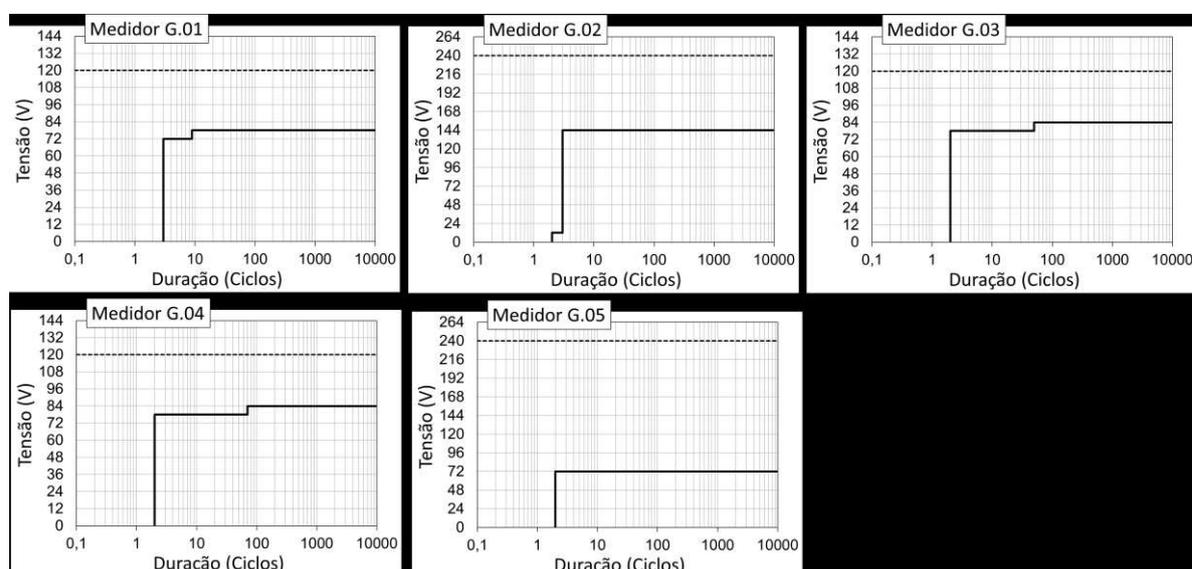


Figura 23 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante G.

Por fim, têm-se as curvas estabelecidas para os medidores do Fabricante I. Suas respostas, apresentadas na Figura 24, foram similares, tendo o início de suas curvas, em 4 ciclos para o medidor I.01 e 3 ciclos para o medidor I.02. Em relação a tensão residual, ambos chegam a amplitude de 30% da tensão nominal para eventos que ocorrem com duração de 30 ciclos.

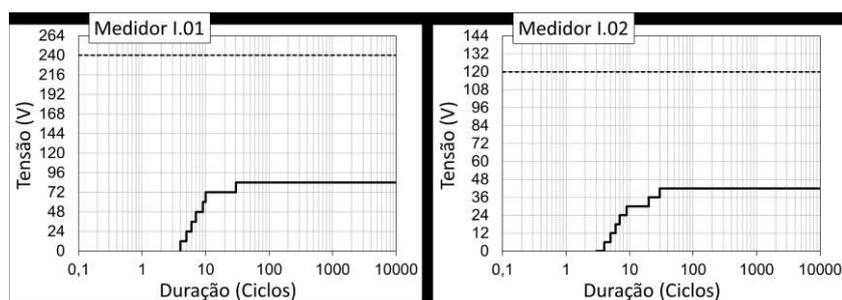


Figura 24 - Curvas de sensibilidade dos medidores eletrônicos do fabricante I.

Em suma, todas as curvas de sensibilidade foram aqui apresentadas. Dentre elas, a curva do medidor A.02 e as curvas do Fabricante G tiveram as maiores áreas, definindo as maiores zonas de susceptibilidade dentre todos os 32 medidores. O medidor mais sensível, dentre todos, foi o A.02, por apresentar uma curva que se inicia para interrupções de 0,4 ciclo de duração e a tensão residual alcança um patamar igual a 70% da tensão nominal. Já em relação a robustez, verificou-se pelos resultados obtidos que o modelo mais robusto foi o A.01. Portanto, há de se destacar a grande discrepância encontrada nos resultados para um mesmo fabricante.

Passasse, neste momento, para etapa de encontrar o tempo de restabelecimento de cada medidor, afim de averiguar qual o medidor leva mais tempo para restabelecer sua operação normal.

#### 4.3.2 TEMPO DE RESTABELECIMENTO DE MEDIDORES

Em consonância com o apresentado na subseção 3.6.2, através do uso do osciloscópio, verificou-se o *trip* do circuito eletrônico de cada medidor eletrônico submetido às VTCD.

Para encontrar o tempo de restabelecimento de cada medidor, foi padronizada uma interrupção que pudesse causar o *trip* do circuito eletrônico de todos os medidores. Dessa forma, foi configurada uma interrupção com duração de 100 ciclos, que seria aplicada a cada medidor para se obter o tempo de restabelecimento dos mesmos. Através do osciloscópio, foram visualizados os intervalos entre pulsos, na condição onde o medidor operava sob tensão nominal, e na inserção de uma interrupção na tensão de suprimento.

A Figura 25 ilustra os dois intervalos de pulsos mencionados: durante a operação normal, têm-se o intervalo entre pulsos ( $\Delta t_1$ ), calculado de acordo com a Equação 17, e

o intervalo ( $\Delta t_2$ ), que indica o tempo que o medidor levou para emitir um novo pulso, depois da ocorrência do distúrbio.

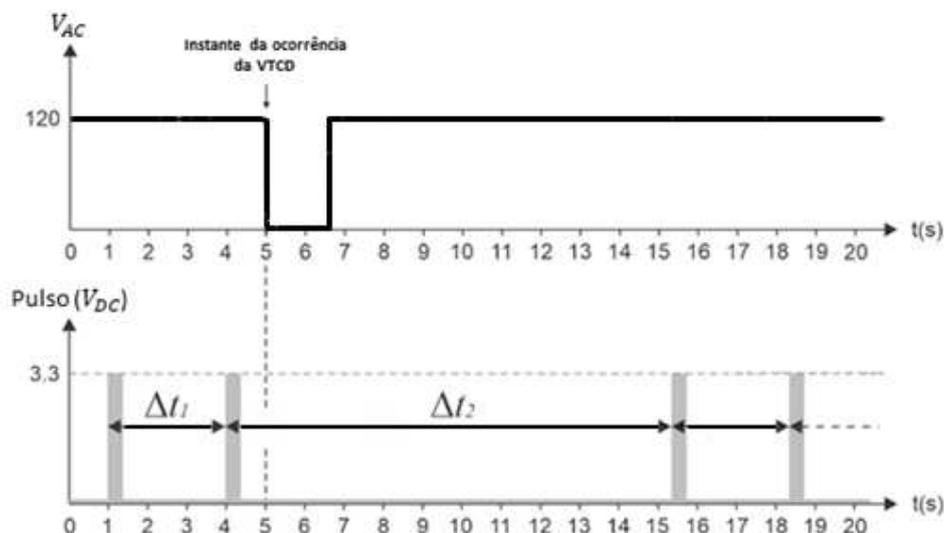


Figura 25 - Intervalo entre pulsos para as seguintes condições: operação normal ( $\Delta t_1$ ) e após a ocorrência da VTCD ( $\Delta t_2$ ).

Através da fonte de potência programável foi possível iniciar a interrupção na tensão no momento mais próximo após o intervalo de pulsos  $\Delta t_1$  dos medidores, de forma que, o intervalo de tempo  $\Delta t_2$ , não englobasse um tempo, onde, teoricamente, o medidor ainda estaria registrando a energia consumida. A diferença entre os dois intervalos ( $\Delta t_2$  e  $\Delta t_1$ ), descontando-se o tempo da interrupção (que varia de acordo com o início de cada curva de sensibilidade), resulta no tempo de restabelecimento dos medidores. De forma a caracterizar um tempo de restabelecimento mais preciso, também foi levado em conta, o fato de que a maioria dos medidores se sensibiliza para interrupções de duração bem menores que 100 ciclos, dessa forma, ao se descontar o tempo da interrupção, também se verificou a necessidade de fazer um acréscimo, relativo à diferença entre os 100 ciclos e o tempo onde se inicia a curva de sensibilidade de cada medidor. O tempo de restabelecimento, logo, pode ser calculado através da Equação 18.

$$t_{res} = \Delta t_2 - \Delta t_1 - t_i + t_{iniciocurva} \quad (18)$$

Onde:

$t_{res}$  é o tempo de restabelecimento de cada medidor;

$\Delta t_2$  é o intervalo entre pulsos após a ocorrência da interrupção;

$\Delta t_1$  é o intervalo entre pulsos antes da ocorrência da interrupção;

$t_i$  é o tempo de duração da interrupção (que foi padronizada como 100 ciclos);

$t_{iniciocurva}$  é o tempo onde inicia a curva de sensibilidade de cada medidor eletrônico.

Os intervalos entre pulsos para cada medidor são então apresentados na Tabela 3 e os tempos de restabelecimento encontrados através da Equação 10, estão ilustrados na Figura 26.

Tabela 3 - Intervalos de tempo entre pulsos antes ( $\Delta t_1$ ) e após ( $\Delta t_2$ ) o distúrbio em segundos.

Medidor	$\Delta t_1$ (s)	$\Delta t_2$ (s)
A.01	1,875	7,069
A.02	3,75	12,909
A.04	1,875	4,725
B.01	3	6,551
B.02	3	12,671
B.03	1,5	8,846
B.04	3	10,274
B.05	1,5	8,148
B.07	3	9,544
B.09	3	10,382
B.013	3	6,568
C.01	3	9,536
C.02	6	15,563
C.03	6	15,52
C.04	3	6,578
C.05	3	6,439
C.06	1,5	4,993
D.01	3	9,757
D.02	3	9,305
D.03	1,875	5,36
D.04	3	7,89
D.05	3	6,434
D.06	3	7,76
E.02	15	21,434
E.03	3,75	10,916
G.01	3	8,246
<b>G.02</b>	<b>1,5</b>	<b>13,927</b>
G.03	3	8,634
G.04	3	8,547
G.05	3	8,231
I.01	1,5	5,078
I.02	3	6,578

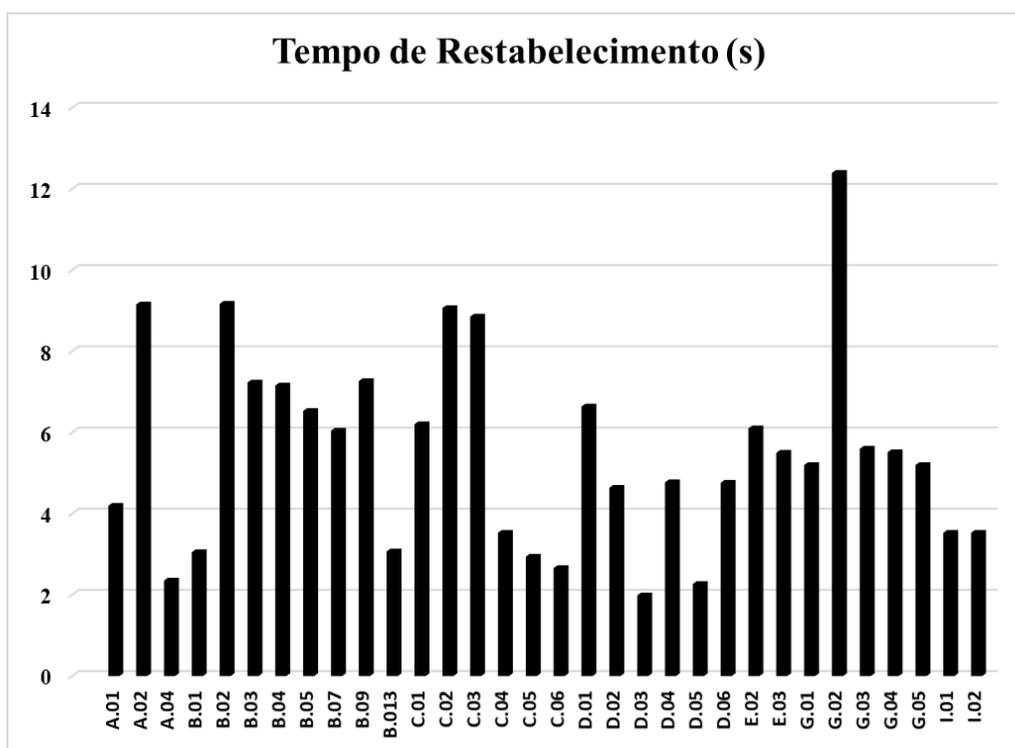


Figura 26 - Tempos de restabelecimento dos medidores eletrônicos em segundos.

Em relação aos tempos de restabelecimento apresentados na Figura 26, destaca-se o tempo encontrado para o Medidor G.02, que leva um tempo igual a 12,39s para restabelecer sua operação, sendo o maior entre todos os tempos encontrados.

Há de se destacar o tempo do Medidor A.02, que além de ser considerado o medidor com a maior área de vulnerabilidade perante os afundamentos e interrupções, é o terceiro medidor que mais demora para se estabelecer sua operação normal, levando 9,15s, atrás somente do já apresentado, Medidor G.02, e do Medidor B.02 (9,17s).

Em relação aos fabricantes, foi realizada a média entre os tempos de restabelecimento para verificar qual dentre eles têm os maiores tempos. O resultado é apresentado na Tabela 4.

*Tabela 4 - Média de tempos de restabelecimento por fabricante em segundos.*

<b>Fabricante</b>	<b>Média de restabelecimento (s)</b>
A	5,23
B	6,19
C	5,54
D	4,18
E	5,80
G	6,78
I	3,53

Verifica-se pela Tabela 4, que o maior tempo de restabelecimento, na média, são dos medidores do Fabricante G, seguido, respectivamente, dos Fabricantes B, E, C, A, D e I.

#### 4.3.3 ESTUDO DE CASO PARA VERIFICAÇÃO DO TEMPO SEM MEDIÇÃO UTILIZANDO EXEMPLO REAL DE REGISTROS DE VTCD

Ao passo que se tem definidas as curvas de sensibilidade para a maioria dos medidores eletrônicos disponibilizados no mercado, faz-se nesse momento, uma avaliação dos mesmo em face a um registro de medição real adquirido através de uma campanha de medição realizada pelo grupo Energisa, através de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento. Foram selecionados um total de 12 pontos de medição onde foram registrados para cada ponto, as ocorrências de VTCD, num período de 7 dias.

De modo a correlacionar os registros obtidos com as curvas de sensibilidade apresentadas na subseção 3.3.1, foram expurgados, os registros de elevações de tensão, fazendo-se uso apenas dos registros de interrupções e afundamentos em cada ponto de medição. O total de registros, com os expurgos já realizados, para cada ponto, é apresentado na Tabela 5.

*Tabela 5 - Total de registros de afundamentos e interrupções para cada ponto de medição.*

<b>Afundamentos e interrupções de curta duração registrados em cada ponto de medição</b>											
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
1834	141	65	1321	7	26	25	1382	7618	6420	2060	32

Cada registro possui o valor da amplitude do evento e sua respectiva duração e, com esta informação, é possível fazer uma sobreposição destes registros nas curvas de sensibilidade de cada medidor, de modo a verificar, quantos eventos seriam capazes de sensibilizar os medidores eletrônicos e assim, calcular-se qual o tempo sem medição para cada um. Além disso, todos os pontos de medição foram levantados em locais onde a tensão de fornecimento era igual a 120 V, e, portanto, não foi possível realizar a sobreposição sobre as curvas dos medidores cuja tensão de operação é de 240V.

Para os casos dos pontos com mais de 1000 registros de afundamentos e interrupções, a distribuidora informou que foram encontradas falhas em conectores ao longo do circuito de baixa tensão, o que explica a grande quantidade de eventos registrados em um período de tempo de apenas 7 dias. De qualquer forma, ressalta-se que falhas em conectores, especialmente em redes aéreas, são bastante comuns em sistemas de distribuição.

Para exemplificar a sobreposição de registros nas curvas de sensibilidade, foi utilizado como referência, o ponto de medição enumerado como “1” na Tabela 5. Ao se realizar a sobreposição dos registros sobre a curva de cada medidor, foram obtidos os resultados ilustrados pelas Figuras (27-33), dispostas de maneira a identificar os resultados obtidos para os medidores de cada fabricante. Os pontos que se encontram dentro da curva são capazes de sensibilizar o medidor em questão, já os pontos fora da mesma, os quais não possuem preenchimento, não afetam de nenhum modo, sua operação.

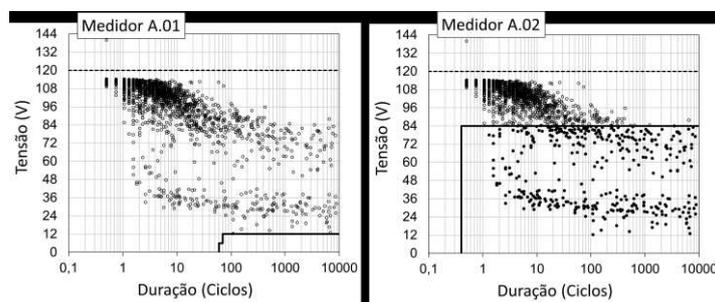


Figura 27 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante A sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

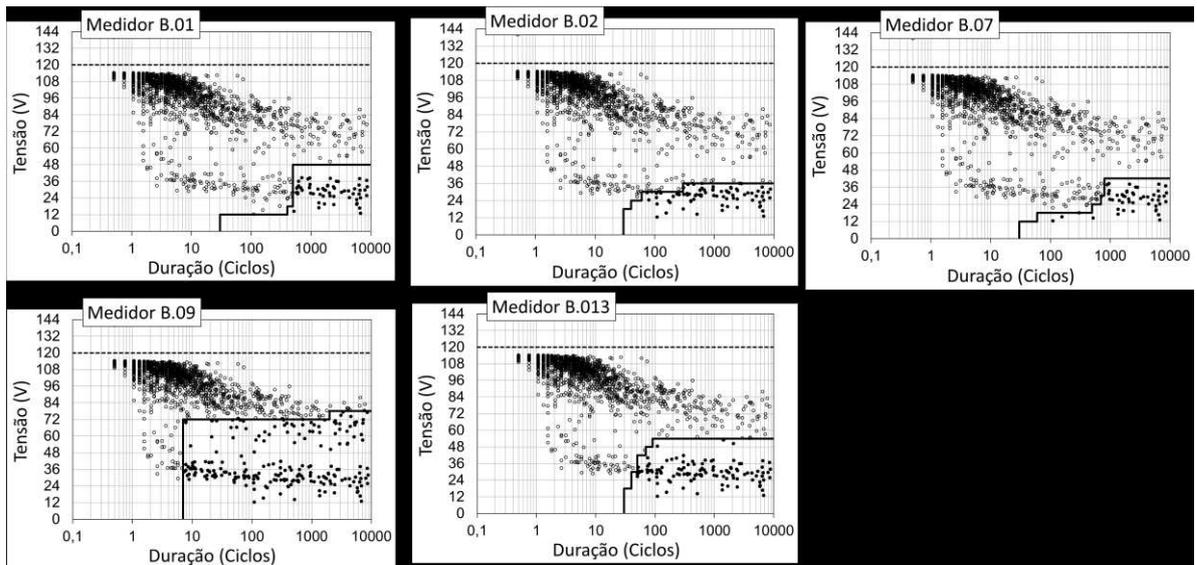


Figura 28 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante B sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

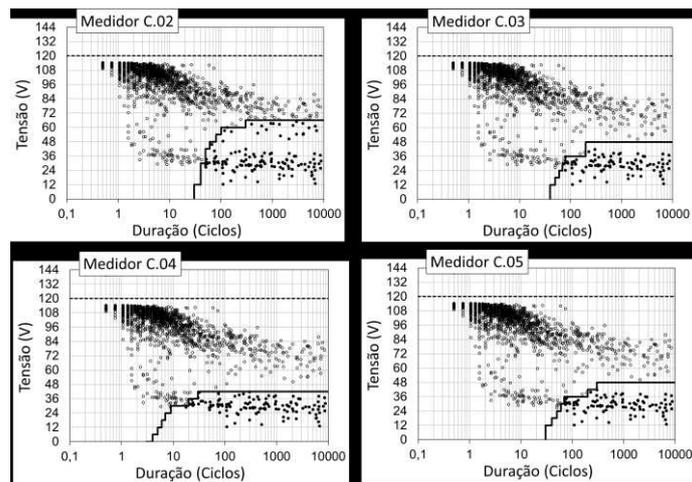


Figura 29 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante C sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

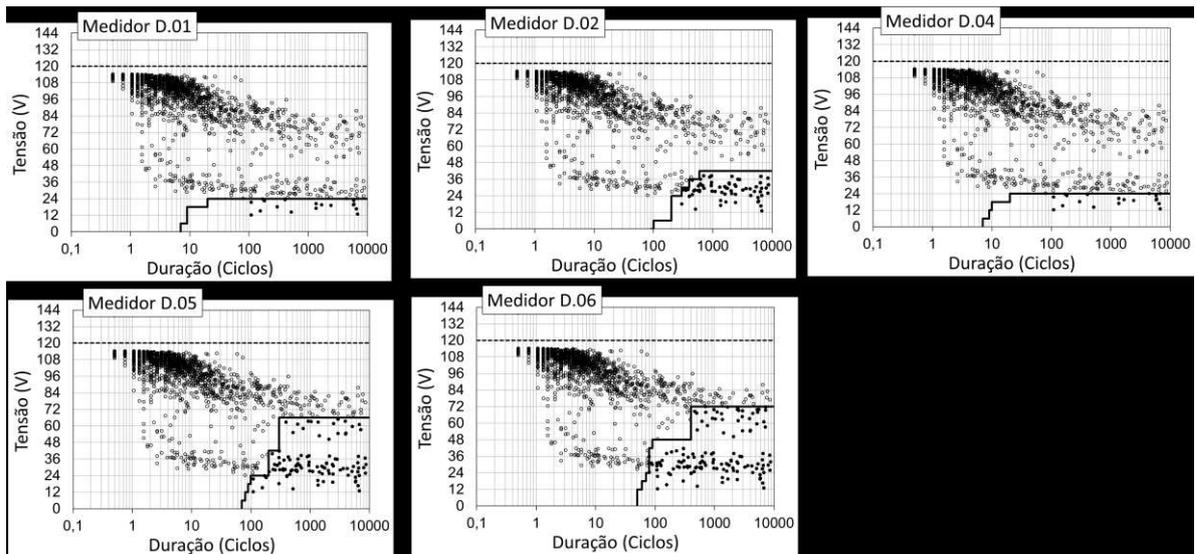


Figura 30 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante D sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

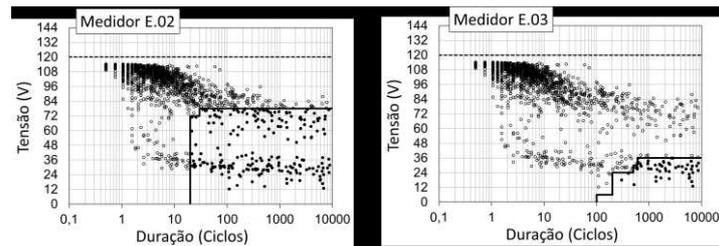


Figura 31 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante E sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

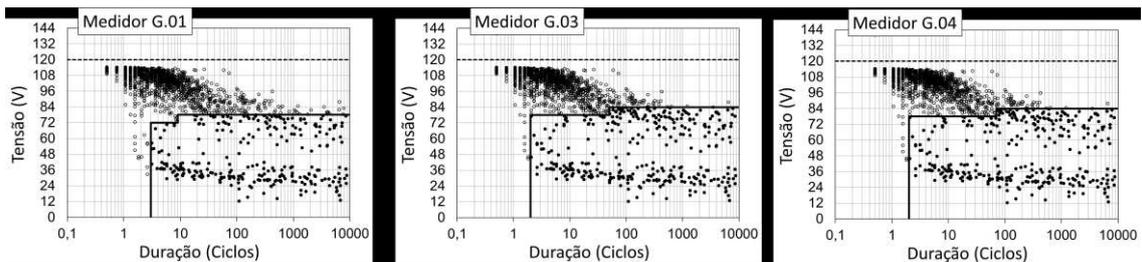


Figura 32 - Curvas de sensibilidade dos medidores do fabricante G sobrepostas por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

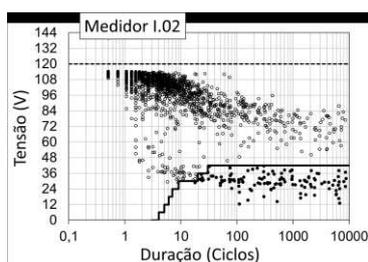


Figura 33 - Curva de sensibilidade dos medidor do fabricante I sobreposta por eventos de VTCD registradas em ponto de medição real.

Foi desenvolvido um algoritmo computacional que pudesse ser capaz de contabilizar a quantidade de eventos capazes de sensibilizar cada medidor. Com isso, foi obtido o resultado apresentado na Tabela 6, que estratifica cada ponto de medição, e mostra a quantidade de vezes que cada medidor se sensibiliza, na hipótese onde o mesmo se encontrara inserido dentro na zona onde ocorreram os pontos de medição.

Tabela 6 - Número de vezes que ocorreria o desligamento do circuito eletrônico de cada medidor para cada ponto de medição onde se registraram eventos de VTCD num alimentador real.

Medidor	Pontos de Medição											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A.01	1	12	7	32	2	3	4	2	0	1	4	3
A.02	394	89	50	86	3	26	16	27	24	15	43	18
B.01	58	29	10	38	2	3	5	2	0	1	6	3
B.02	77	41	13	39	2	3	5	2	1	1	7	3
B.07	51	37	9	38	2	3	5	2	0	1	5	3
B.09	221	52	28	58	2	5	11	13	3	7	21	6
B.013	113	41	13	39	2	3	5	2	1	1	7	3
C.02	132	39	13	39	2	3	5	2	1	1	7	3
C.03	97	38	11	36	2	3	4	2	1	1	7	3
C.04	122	52	32	66	3	5	11	3	1	5	8	5
C.05	101	38	13	39	2	3	5	2	1	1	7	3
D.01	18	47	22	58	2	5	8	3	0	4	5	3
D.02	69	33	6	30	2	3	3	2	0	1	6	3
D.04	18	49	22	58	2	5	8	3	0	4	5	3
D.05	103	36	7	32	2	3	4	2	0	1	7	3
D.06	131	38	8	35	2	3	4	2	1	1	7	3
E.02	218	43	17	45	2	3	9	12	2	3	17	5
E.03	51	33	6	30	2	3	3	2	0	1	6	3
G.01	275	63	43	70	3	9	15	17	11	13	35	12
G.03	335	72	47	80	3	15	16	17	16	13	38	15
G.04	330	72	47	80	3	15	16	17	16	13	38	15
I.02	122	52	31	66	3	5	11	3	0	5	8	5

Com a informação da quantidade de vezes que cada medidor se sensibiliza para os eventos registrados em cada ponto de medição, foi calculado o tempo que os mesmos ficariam sem registrar a energia elétrica consumida, baseado nos tempos apresentados na Tabela 3. Com isso, foram levantados os tempos em minutos sem medição de cada medidor, os quais são apresentados na Tabela 7.

*Tabela 7 – Tempo em minutos que cada medidor ficaria sem registrar a quantidade de energia consumida devido ao desligamento do circuito eletrônico devido aos eventos registrados de VTCD em um alimentador real.*

Medidor	Pontos de Medição											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>A.01</b>	0,07	0,84	0,49	2,24	0,14	0,21	0,28	0,14	0,00	0,07	0,28	0,21
<b>A.02</b>	60,10	13,58	7,63	13,12	0,46	3,97	2,44	4,12	3,66	2,29	6,56	2,75
<b>B.01</b>	2,95	1,47	0,51	1,93	0,10	0,15	0,25	0,10	0,00	0,05	0,31	0,15
<b>B.02</b>	11,77	6,27	1,99	5,96	0,31	0,46	0,76	0,31	0,15	0,15	1,07	0,46
<b>B.07</b>	5,14	3,73	0,91	3,83	0,20	0,30	0,50	0,20	0,00	0,10	0,50	0,30
<b>B.09</b>	26,76	6,30	3,39	7,02	0,24	0,61	1,33	1,57	0,36	0,85	2,54	0,73
<b>B.013</b>	5,78	2,10	0,66	1,99	0,10	0,15	0,26	0,10	0,05	0,05	0,36	0,15
<b>C.02</b>	19,94	5,89	1,96	5,89	0,30	0,45	0,76	0,30	0,15	0,15	1,06	0,45
<b>C.03</b>	14,31	5,61	1,62	5,31	0,30	0,44	0,59	0,30	0,15	0,15	1,03	0,44
<b>C.04</b>	7,17	3,06	1,88	3,88	0,18	0,29	0,65	0,18	0,06	0,29	0,47	0,29
<b>C.05</b>	4,95	1,86	0,64	1,91	0,10	0,15	0,24	0,10	0,05	0,05	0,34	0,15
<b>D.01</b>	1,99	5,20	2,43	6,42	0,22	0,55	0,89	0,33	0,00	0,44	0,55	0,33
<b>D.02</b>	5,33	2,55	0,46	2,32	0,15	0,23	0,23	0,15	0,00	0,08	0,46	0,23
<b>D.04</b>	1,43	3,90	1,75	4,61	0,16	0,40	0,64	0,24	0,00	0,32	0,40	0,24
<b>D.05</b>	3,89	1,36	0,26	1,21	0,08	0,11	0,15	0,08	0,00	0,04	0,26	0,11
<b>D.06</b>	10,39	3,01	0,63	2,78	0,16	0,24	0,32	0,16	0,08	0,08	0,56	0,24
<b>E.02</b>	22,16	4,37	1,73	4,58	0,20	0,31	0,92	1,22	0,20	0,31	1,73	0,51
<b>E.03</b>	4,67	3,02	0,55	2,75	0,18	0,27	0,27	0,18	0,00	0,09	0,55	0,27
<b>G.01</b>	23,82	5,46	3,72	6,06	0,26	0,78	1,30	1,47	0,95	1,13	3,03	1,04
<b>G.03</b>	31,27	6,72	4,39	7,47	0,28	1,40	1,49	1,59	1,49	1,21	3,55	1,40
<b>G.04</b>	30,32	6,62	4,32	7,35	0,28	1,38	1,47	1,56	1,47	1,19	3,49	1,38
<b>I.02</b>	7,17	3,06	1,82	3,88	0,18	0,29	0,65	0,18	0,00	0,29	0,47	0,29

Verifica-se que os maiores tempos se deram para os eventos registrados no ponto de medição “1”, traduzindo-se em um ponto de medição onde as VTCD foram mais severas, fazendo com que, dentre os medidores cujas tensão nominal era 120V, os que ficariam mais tempo sem registrar a energia consumida, seriam os medidores A.02, G.03 e G.04, demorando, respectivamente, 60,10 min, 31,27 min e 30,32 min desligados num período de uma semana.

Nesse contexto, ressalta-se, ainda, que mesmo um único evento de afundamento momentâneo de tensão originado nos níveis de tensão mais elevados dos sistemas de distribuição, poderia ocasionar o reset de milhares de medidores eletrônicos de energia elétrica, totalizando um volume significativo de energia ativa não medida. E essa energia

---

elétrica ativa não medida certamente iria promover um incremento no cálculo das perdas nesses sistemas de distribuição, uma vez que haveria um montante real de energia consumida, porém, não quantificada pelos medidores eletrônicos de energia elétrica.

#### 4.3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo sintetizou os procedimentos relacionados à obtenção de limites de sensibilidade operacional às tensões para os medidores eletrônicos de energia. Dentro deste escopo, as atividades desenvolvidas constituíram-se em ações voltadas, num primeiro momento, para a realização de ensaios em laboratório para o levantamento das curvas de sensibilidade de cada um dos trinta e dois medidores testados, obtendo-se dessa forma a caracterização dos limites inferiores admissíveis para as tensões de suprimento que garantam a normalidade operacional dos medidores.

Com vistas à obtenção dos tempos de restabelecimento de cada medidor, se deu a utilização de um leitor de pulsos, conectado à um osciloscópio, para mostrar de maneira visual o comportamento dos pulsos, num primeiro momento, para uma situação normal de operação e, na ocorrência de um distúrbio, seja ele um afundamento ou uma interrupção.

Fazendo-se uso da Equação 17, obteve-se os tempos de restabelecimento para cada medidor, para que, posteriormente, fosse possível a realização de um estudo de caso, onde foram utilizados registros de afundamentos de tensão levantados durante uma campanha de medição realizado pelo grupo Energisa. De posse desses registros, foi criada uma sobreposição destes eventos, sobre as curvas de sensibilidade dos medidores cuja tensão de operação era igual à 120V. Foram utilizados no total 12 pontos de medição, afim de mostrar um comparativo entre eles e, ao final, obter o tempo em minutos que os medidores eletrônicos deixaram de registrar a energia elétrica consumida no intervalo de uma semana. Verificou-se um dos modelos de medidores, caso inserido na área onde foi realizado o primeiro ponto da campanha de medição, o mesmo deixaria de registrar a energia elétrica consumida, por um intervalo de 1 hora no período de uma semana.

## CAPÍTULO 5

### SUPPORTABILIDADE DIELÉTRICA DE MEDIDORES ELETRÔNICOS

De modo a se obter os limites superiores relacionados à suportabilidade dielétrica, este capítulo sintetiza os procedimentos realizados em laboratório para o levantamento das curvas de suportabilidade dielétrica de alguns modelos de medidores eletrônicos.

Em concordância com a metodologia apresentada na subseção 3.6.1, foram elaborados testes a serem implementados em laboratório, com vistas à obtenção do traçado característico da Região 3 da curva de suportabilidade apresentada na subseção 3.6.1. Devido às limitações laboratoriais, não foi possível realizar o levantamento das Regiões 1 e 2, caracterizadas por se tratarem de regiões cujos fenômenos característicos são transitórios impulsivos, como por exemplo descargas atmosféricas, onde seria necessário um tipo de equipamento específico para simular este tipo de situação. Dessa forma, todos os resultados que serão apresentados no decorrer deste capítulo, irão englobar somente a Região 3 da curva de suportabilidade, que trata de fenômenos ocorridos para frequência de 60 Hz (frequência de operação da rede).

Ademais, serão apresentados os efeitos causados aos componentes dos medidores eletrônicos, com o objetivo de verificar qual dentre eles, é aquele que comumente tem suas propriedades físicas modificadas devido à ocorrência de eventos relacionados a elevação do valor de tensão eficaz da rede de suprimento do equipamento.

#### 5.1 ESTRUTURA LABORATORIAL PARA OBTENÇÃO DOS LIMITES DE SUPPORTABILIDADE DIELÉTRICA

Em consonância com as metas estabelecidas na subseção 3.6.1, para o levantamento dos limites de suportabilidade, com destaque ao reconhecimento das características próprias das três regiões já ressaltadas, os recursos laboratoriais adequados para a realização dos testes, nos termos requeridos para a Região 3 são aqui explicitados.

Para o levantamento da característica dos medidores eletrônicos nessa região, foi montada a estrutura laboratorial apresentada nas Figuras 34-35, que mostram a utilização de um variac (autotransformador com regulação de espiras no secundário) que, de um lado, é conectado à rede CA de tensão igual a 220V e do outro, conectado ao secundário

de um transformador cuja relação de transformação é de 13800/220V. Dessa forma, ao variar a tensão do secundário, resulta-se na alteração da tensão do primário, onde foi inserido o medidor eletrônico.

A conexão foi feita de forma a alimentar os terminais de fase e neutro do medidor, onde a faixa de tensão de alimentação dos medidores foi imposta entre 300V e 1100V. Para assegurar que o medidor fosse energizado somente no momento em que o valor eficaz de tensão se encontrasse igual ao valor requerido para a realização do teste, foi necessária a utilização de dois contatores, que iriam fechar seus contatos somente no instante em que uma botoeira fosse acionada, garantindo-se que o medidor não fosse afetado enquanto o valor da tensão era ajustado pelo variac.

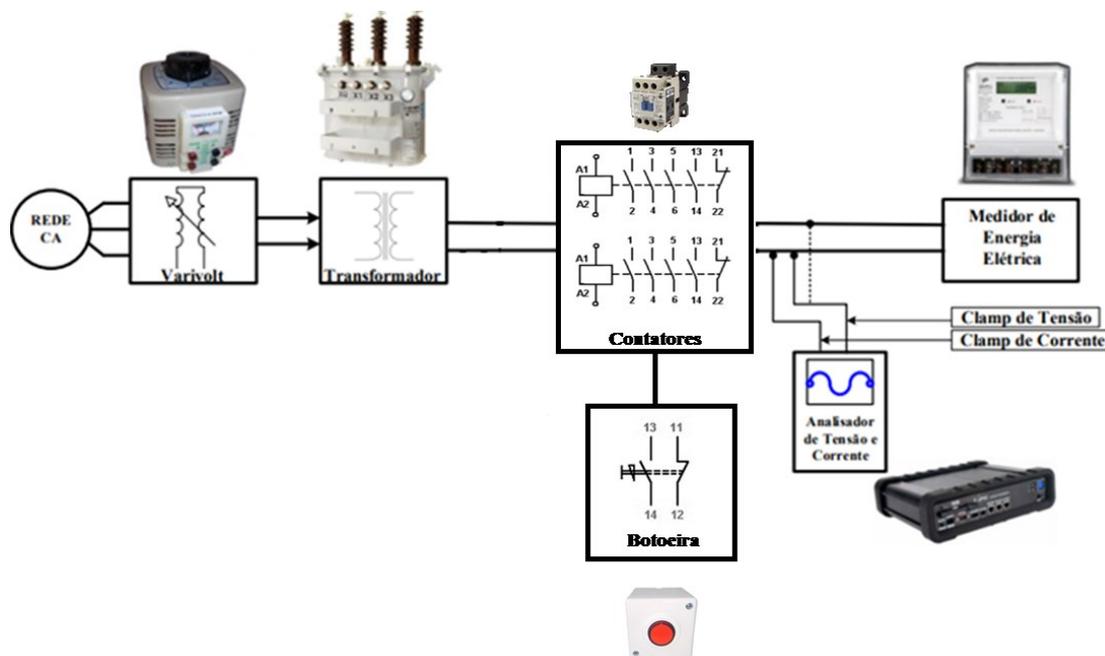


Figura 34 - Circuito proposto para obtenção da curva de suportabilidade dos medidores eletrônicos.

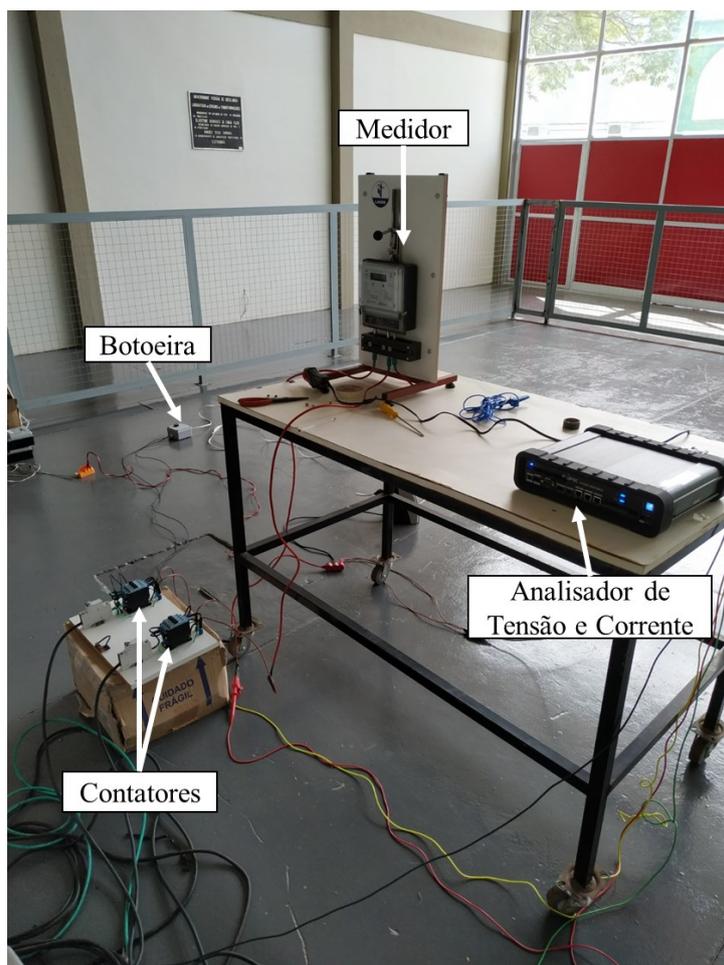


Figura 35 - Teste para levantamento da curva de suportabilidade sendo executado.

Com a estrutura laboratorial montada, inseriu-se ao circuito um medidor de Qualidade da Energia para registro das formas de onda da tensão e corrente. O modelo utilizado em questão trata-se do G4500 BLACKBOX, da ELSPEC.

Dessa forma, deram-se início aos testes para obtenção da curva característica da Região 3 da curva de suportabilidade. Todos os resultados foram registrados no medidor de Qualidade e posteriormente tratados para serem apresentados na próxima seção desta dissertação.

## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS

Uma vez definidas e estabelecidas as estruturas laboratoriais, os medidores eletrônicos 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 a Região 3.

Para o levantamento da curva, foram realizados testes em 4 modelos de medidores que foram cedidos pelo Grupo Energisa para a realização de ensaios destrutivos e não tinham nenhuma finalidade comercial. Foram efetuados testes entre 3 e 5 medidores de cada modelo, onde, para cada medidor, foi aplicado um valor de tensão eficaz diferente. Para cada ensaio, foram registradas as curvas de tensão e corrente e com isso, seria possível extrair o tempo em que cada medidor continuava operando antes de ter suas propriedades físicas alteradas devido à ruptura do isolamento de seus componentes. Após a coleta de dados, foi possível fazer o levantamento das curvas de cada modelo, que serão apresentadas na próxima seção.

## 5.3 CURVAS DE SUPORTABILIDADE DE MEDIDORES ELETRÔNICOS

Esta seção se destina a apresentar as curvas encontradas para os quatro modelos de medidores testados. Todos os modelos aqui apresentados terão a mesma denotação da subseção 3.3.1 onde foram apresentadas as curvas de sensibilidade dos medidores. Pode-se notar que as denotações dos medidores aqui apresentados serão iguais às já apresentadas anteriormente, devido aos modelos submetidos ao teste de suportabilidade serem iguais aos já apresentados no Capítulo 3.

São apresentados na Tabela 8 os resultados do teste de suportabilidade dielétrica para o medidor A.02. Com base nesses resultados e com o auxílio das Equações 14 a 16, foi levantada a curva de suportabilidade apresentada na Figura 36.

Com base na curva apresentada, verifica-se para este medidor, a possibilidade de continuar operando para tensões até próximo do valor de 600V. Todos os medidores aqui apresentados, durante a realização dos testes, apresentaram comportamento similar a este, tendo suas características físicas modificadas somente a partir de elevações onde a tensão chegava a um patamar maior que 600V.

Tabela 8 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor A.02.

Tensão (V)	Duração (s)
623	3,955
677	0,710
735	0,224

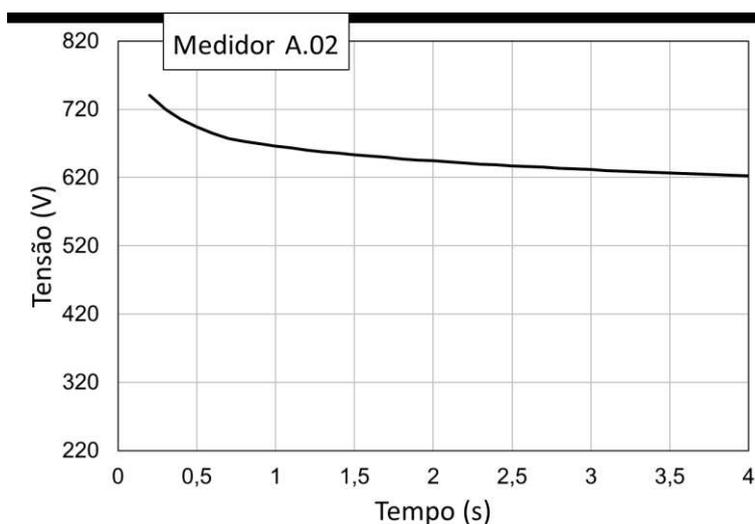


Figura 36 - Curva de suportabilidade do Medidor A.02.

Para o medidor B.07 foram registrados os valores encontrados na Tabela 9 e sua curva característica de suportabilidade é apresentada na Figura 37. Verifica-se um aspecto semelhante ao da Figura 36, no que tange ao limiar inferior, iniciando num patamar de 600V. Já em seu limite superior, foi possível verificar a suportabilidade sob condições de operação próxima a 920V.

Tabela 9 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor B.07.

Tensão (V)	Duração (s)
925,9	0,033
862	0,048
808	0,082
699	0,04
602	10,93

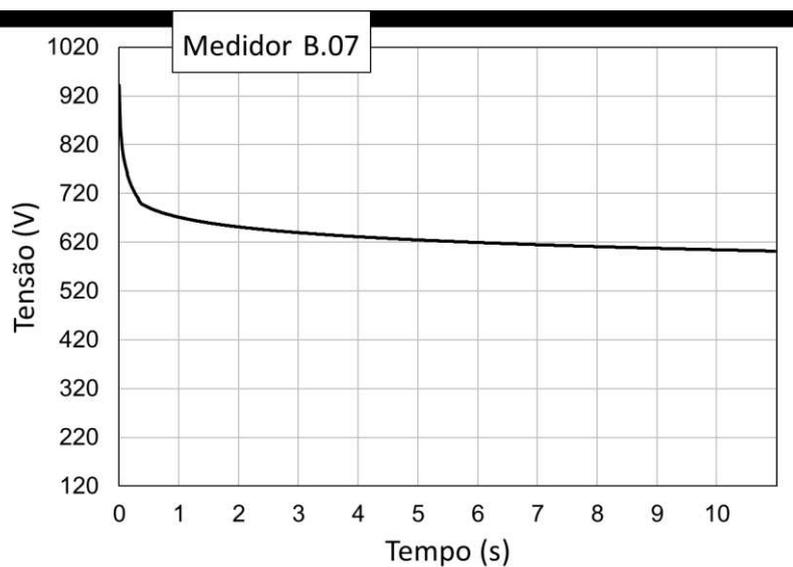


Figura 37 - Curva de suportabilidade do Medidor B.07.

Já para o medidor D.01, foram levantados os registros mostrados na Tabela 10, onde pode-se notar que, diferentemente dos outros medidores, o limiar inferior deste ficou na faixa de 720V. A curva de suportabilidade do medidor D.01, por sua vez, é apresentada na Figura 38, onde nota-se uma característica diferente aos demais quando se trata do limitar da tensão inferior, que neste caso inicia-se a partir de 785V.

Tabela 10 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor D.01.

Tensão (V)	Duração (s)
897	0,027
888	0,033
785	0,044

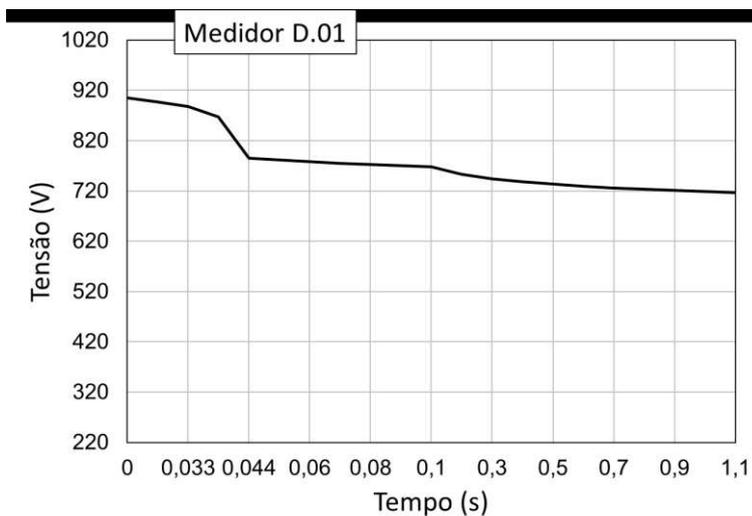


Figura 38 - Curva de suportabilidade do Medidor D.01.

Por fim, foram obtidos os registros para o Medidor G.03, cujos valores são indicados na Tabela 11 e sua curva de suportabilidade é apresentada na Figura 39. Nesta Figura é possível identificar alguns patamares que nas outras não foi possível, como, por exemplo, valores de tensão acima de 1100V. Pode-se verificar também, um comportamento parecido ao dos outros medidores, tendo seu limiar inferior iniciando em 600V.

Tabela 11 - Resultados obtidos para os ensaios de suportabilidade dielétrica realizados no Medidor G.03.

Tensão (V)	Duração (s)
1151	0,48
1007	0,8
794	1,939
706	19,71
611	134,13

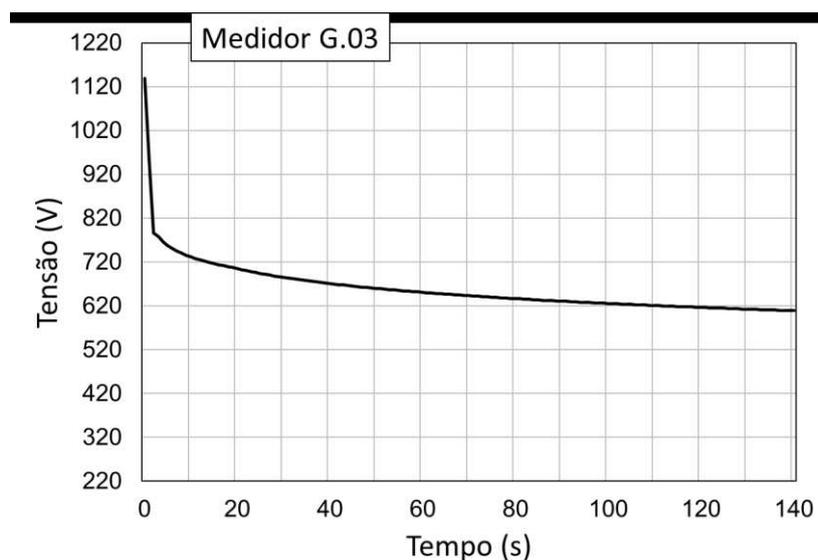


Figura 39 - Curva de suportabilidade do Medidor G.03.

#### 5.4 DANOS FÍSICOS CAUSADOS AOS MEDIDORES

Após a realização dos ensaios destrutivos e com as curvas de suportabilidade já levantadas, os medidores não teriam posteriormente nenhum uso significativo e dessa forma, aproveitou-se a oportunidade para verificar em seu interior, quais seriam os componentes que mais sofreram danos devido à ocorrência de elevações de tensão.

As Figuras 40-43 retratam os danos causados em cada um dos quatro medidores que foram levantadas as curvas de suportabilidade. Verifica-se a similaridade entre os danos causados, provando-se que, na ocorrência de elevações de tensão na rede, para os circuitos eletrônicos dos medidores, o componente que comumente se danifica são os varistores. Além dos varistores, na Figura 43, mostra também um dano no resistor que está em série com o varistor, causado provavelmente pela sobrecorrente na atuação do varistor.

No circuito eletrônico do medidor, os varistores tem por função a de servir de retaguarda do restante dos componentes eletrônicos, que por sua vez, também são limitados de acordo com o nível de tensão presente na rede elétrica. De forma a atenuar os riscos advindos da queima dos medidores na ocorrência de elevações de tensão, o primeiro componente a se deteriorar, realmente deveria ser o varistor.

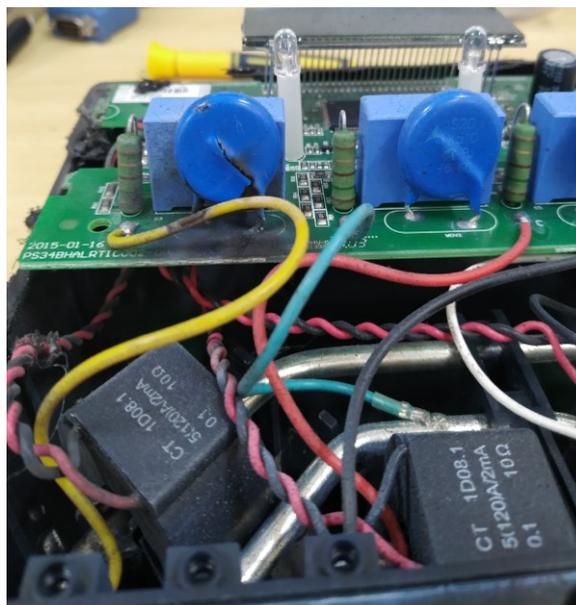


Figura 40 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor D.01 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.

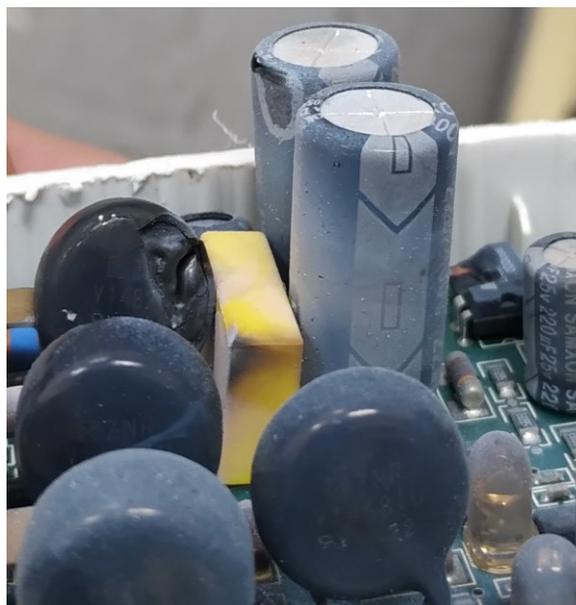


Figura 41 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor B.07 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.



Figura 42 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor A.02 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.

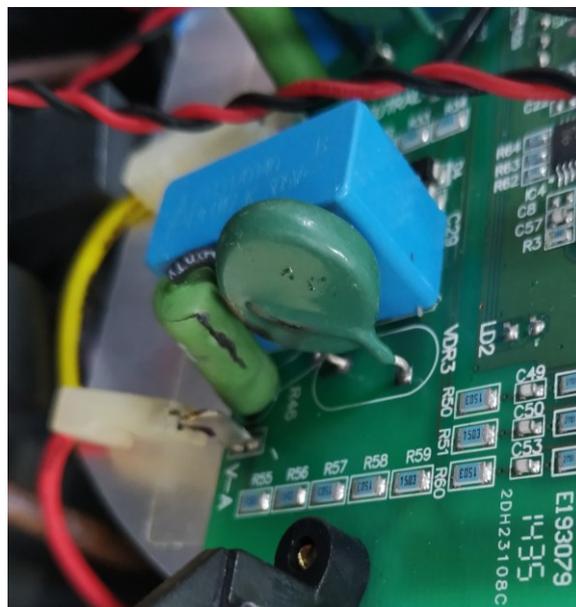


Figura 43 - Dano causado ao circuito eletrônico do medidor G.03 através do ensaio de suportabilidade dielétrica.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os procedimentos realizados para o levantamento dos limites de suportabilidade dielétrica de quatro modelos de medidores eletrônicos às elevações de tensão. Dentro deste escopo, as atividades desenvolvidas constituíram-se em ações voltadas, num primeiro momento, para a realização de ensaios em laboratório para o levantamento da Região 3 da curva de suportabilidade de cada um dos quatro modelos testados, obtendo-se dessa forma a caracterização dos limites superiores admissíveis para as tensões de suprimento que mantenham a operação dos medidores, sem nenhum dano ao mesmo.

Com vistas à obtenção das curvas de suportabilidade, foi necessário realizar a queima de vários medidores de um mesmo modelo. Estes medidores foram cedidos para teste, e não teriam finalidade comercial. Dessa forma, para cada modelo, foram levantados entre três a cinco pontos de cada curva de suportabilidade apresentada na seção 5.3.

Por fim, aproveitando-se a oportunidade em que os medidores após os ensaios destrutivos não teriam mais finalidade e seriam descartados, optou-se por abrir os mesmos e verificar em seu interior, quais foram os danos físicos verificados no circuito eletrônico dos mesmos. Em todos os casos, o componente que se danificou foi o varistor, componente esse que serviria para a proteção dos demais componentes dos medidores em face às mudanças na tensão de suprimento.

Com isso, passasse neste momento, para o capítulo das conclusões que retratará de maneira resumida, todo o exposto ao longo deste documento, fazendo uma sintetização dos resultados obtidos e colocando em evidência a relevância do tema dentro do âmbito da Qualidade de Energia Elétrica.

---

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

No Capítulo 1 desta Dissertação foi apresentado o contexto do trabalho desenvolvido, com foco em estabelecer a relevância do assunto nos estudos de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e, concomitantemente, destacar a originalidade da proposta deste trabalho frente a outros realizados no âmbito da sensibilidade e suportabilidade de equipamentos. Também foram apresentados alguns estudos buscando salientar a mudança na composição dos equipamentos elétricos, fazendo com que estes, se tornem dispositivos mais sensíveis frente às VTCD. Ainda neste capítulo, foram apresentados todos os objetivos propostos para este trabalho que, em suma, tratavam-se de estabelecer uma metodologia para o levantamento das características de suportabilidade e sensibilidade de medidores eletrônicos e assim promover ensaios com o objetivo de fazer o levantamento das curvas características de suportabilidade e sensibilidade frente às VTCD para esse tipo de equipamento.

Em seguida, o Capítulo 2 buscou delinear o ponto de contribuição de vários estudos realizados na área de sensibilidade e suportabilidade de equipamentos elétricos, fazendo menção a diversos estudos envolvendo os mais variados tipos de cargas elétricas, sujeitas a diversas condições de tensão de suprimento, com o objetivo de levantar a característica dessas cargas e realizar comparações com as curvas conhecidas e já publicadas na área, sendo as mais conhecidas, a curva CBEMA, ITIC e SEMI-F42.

A abordagem realizada no Capítulo 3 possibilitou a compreensão teórica a respeito dos termos a serem discutidos e analisados nesta Dissertação. A discussão no tocante às teorias que regem o mundo das Variações de Tensão de Curta Duração, seus equacionamentos e a forma de classificá-las. Além disso, foram apresentados os equacionamentos que permitiram avaliar quais seriam as grandezas envolvidas no que tange a sensibilidade de equipamentos elétricos e o que de fato, poderia influenciar e ocasionar o *trip* do circuito eletrônico dos medidores. Dessa forma foi mostrado durante o decorrer do capítulo, a influência que os capacitores possuem quando utilizados no circuito eletrônicos de medidores e como eles são utilizados de forma a atenuar os efeitos advindos dos afundamentos de tensão. Na parte que tange a suportabilidade de equipamentos, foram apresentados os equacionamentos necessários para se fazer o

---

levantamento das curvas e como se dá a divisão entre as três regiões que envolvem a curva de suportabilidade dielétrica e quais são os fenômenos elétricos que estão associados a cada região.

No Capítulo 4, foi apresentada a estrutura laboratorial necessária para a execução de testes relacionados à sensibilidade de medidores eletrônicos e a metodologia utilizada para o levantamento da curva de cada um dos 32 medidores ensaiados. Dentre as curvas levantadas, um dos modelos testados apresentou o traço de sua curva iniciando com eventos que ocorriam na ordem de 0,4 ciclos e com uma tensão residual igual a 70% da tensão nominal, mostrando ser o medidor mais sensível dentre todos os testados. Além das curvas, foram levantados também os tempos de restabelecimento dos medidores após o seu *trip* causado pelos afundamentos de tensão. Nesta parte foi verificada que um dos modelos ensaiados tinha um tempo de restabelecimento igual a 12,39 segundos, sendo este o maior tempo encontrado entre os 32 medidores testados. É importante salientar que o medidor mais sensível entre todos, teve o terceiro maior tempo de restabelecimento. Este medidor, cuja conotação utilizada nesta dissertação como “Medidor A.02” se sensibiliza para eventos de afundamento de tensão na ordem de 0,4 ciclos e seu tempo de restabelecimento é igual a 9,15 segundos.

Após obter todos os tempos de restabelecimento, foi avaliado um estudo de caso, utilizando-se um conjunto de medições disponibilizadas pelo Grupo Energisa, que consistia de 12 pontos de medição espalhados pela área de concessão da distribuidora para avaliar os casos de afundamentos de tensão que estavam ocorrendo em sua rede. Esses pontos de medição foram registrados cada um, com uma semana de duração. Com isso, este estudo de caso, teve como premissa, avaliar como seria o comportamento dos medidores ensaiados se estivessem sujeitos aos 12 pontos de medição registrados. Dessa forma verificou-se que o pior dos casos envolveu o ponto de medição “1” que para um dos modelos testados, em um registro de 7 dias, iria ficar sem registrar cerca de 60 minutos de medição.

No Capítulo 5 foi mostrada a estrutura laboratorial necessária para o levantamento da curva de suportabilidade dielétrica de 4 modelos de medidores. Para cada curva, foram registrados entre 3 a 5 pontos, dependendo do modelo. Todas as curvas apresentavam somente a Região 3 da curva de suportabilidade apresentada no Capítulo 2, devido às limitações laboratoriais que impediam de simular os fenômenos elétricos englobados nas outras duas regiões. Depois de fazer o levantamento das curvas, e visto que, os medidores

danificados não teriam mais nenhuma utilidade significativa, aproveitou-se a oportunidade para verificar dentro de cada um, quais seriam os componentes que teriam sido danificados na ocorrência das elevações de tensão. Sendo assim, um exemplar de cada medidor ensaiado foi aberto e em todos os casos, o componente que se danificou foi o varistor, o que já era de se esperar, visto que, ele tem por função, fazer a proteção do circuito eletrônico quando se ocorre distúrbios que acarretam na alteração das tensões de suprimento.

Verificou-se ao longo desta dissertação as nuances que envolvem a sensibilidade e suportabilidade de medidores eletrônicos de energia elétrica e a importância ao avaliar o impacto das VTCD em tais medidores, visto que, isso acarreta em um prejuízo para as distribuidoras de forma geral. Destaca-se que este estudo, feito para este tipo específico de equipamento, não foi encontrado tanto na literatura nacional, quanto internacional, fazendo deste trabalho um acréscimo bibliográfico no que tange a sensibilidade e suportabilidade de equipamentos elétricos.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma análise mais aprofundada do impacto sobre as perdas na distribuição causadas pela perda de registro de medição advindas da ocorrência de VTCDs.
- Verificar o comportamento da corrente elétrica durante as VTCDs e seus impactos sobre os medidores eletrônicos.
- Fazer uma correlação com o Fator de Impacto (FI) – grandeza que caracteriza a severidade da incidência de eventos de VTCDs contemplada no Módulo 8 do PRODIST.

---

**REFERÊNCIAS**

- [1] M. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*. New York, 2000.  
<https://doi.org/10.1109/9780470546840>
- [2] W.Kennedy, *Power Quality Primer*. McGraw-Hill, 2000.
- [3] V. E. Wagner, A. A. Andreshak, and J. P. Staniak, “Power Quality and Factory Automation”, *IEEE*, vol. 26, no. 4, pp. 620–626, 1990.  
<https://doi.org/10.1109/28.55984>
- [4] W. W. Carter, “Control of Power Quality in Modern Industry”, *IEEE*.  
<https://doi.org/10.1109/TEXCON.1989.36798>
- [5] H. G. Sarmiento and E. Estrada, “A voltage sag study in an industry with adjustable speed drivers”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 85–89, 1994.  
<https://doi.org/10.1109/2943.476593>
- [6] C. J. De Ávila, “Curvas de Suportabilidade Dielétrica e Térmica para Televisores integradas ao APR e ao Banco de Dados da Cemig Distribuição S . A .”, 2011.
- [7] IEEE, *IEEE Standard 446-IEEE Recommended Practice For Emergency And Standby Power Systems For Industrial And Commercial Applications*.
- [8] Technical Committee 3 (TC3) of the Information and T. I. Council, "ITIC (CBEMA) curve Application Note."
- [9] P. S. Lab, “Voltage Sag Immunity Testing for Semiconductor Tool Manufacturers Application Note.” 2017.
- [10] J. Kyei, S. Member, R. Ayyanar, and G. Heydt, “The Design of Power Acceptability Curves,” vol. 17, no. 3, pp. 828–833, 2002.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.1022811>
- [11] C. P. Gupta and J. V Milanovic, “Probabilistic Assessment of Equipment Trips due to Voltage Sags,” vol. 21, no. 2, pp. 711–718, 2006.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.855447>
- [12] S. Member, F. Member, and B. Columbia, “A fuzzy logic application to represent load sensitivity to voltage sags,” pp. 60–64, 1998.  
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.1998.759840>
- [13] E. R. Collins and M. Ieee, “A Three-phase Sag Generator for Testing Industrial Equipment,” pp. 526–532, 1996. <https://doi.org/10.1109/61.484138>
- [14] D. O. Kovol, “Computer Performance Degradation Due To Their Susceptibility To

- 
- Power Supply Disturbances,” <https://doi.org/1989.0.1109/IAS.1989.96878>
- [15] P. Pohjanheimo and M. Lehtonen, “Equipment Sensitivity to Voltage Sags - Test Results for Contactors, PCs and Gas Discharge Lamps,” *IEEE*, pp. 559–563, 2002. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2002.1221496>
- [16] S. Hardi and I. Daut, “Sensitivity of low voltage consumer equipment to voltage sags,” *PEOCO 2010 - 4th Int. Power Eng. Optim. Conf. Progr. Abstr.*, no. June, pp. 396–401, 2010. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2010.5559179>
- [17] S. Ž. Djokić, J. J. M. Desmet, G. Vanalme, J. V. Milanović, and K. Stockman, “Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 375–383, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.832353>
- [18] E. R. Collins, “Effects of Voltage Sags on AC Motor Drives,” pp. 1–7, 1997. <https://doi.org/10.1109/TEXCON.1997.598533>
- [19] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj, “Voltage Sags in Industrial Systems,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 2, pp. 397–403, 1993. <https://doi.org/10.1109/28.216550>
- [20] A. R. Di Fazio, V. Duraccio, P. Varilone, and P. Verde, “Voltage sags in the automotive industry: Analysis and solutions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 110, pp. 25–30, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.01.004>
- [21] M. Samotyj and D. Mueller, “Voltage Sag Analysis Case Studies,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 4, pp. 1083–1089, 1994. <https://doi.org/10.1109/28.297926>
- [22] C. J. Melhorn, T. D. Davis, and G. E. Beam, “Voltage sags: Their impact on the utility and industrial customers,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34, no. 3, pp. 549–558, 1998. <https://doi.org/10.1109/28.673725>
- [23] H. R. P. . de Oliveira, N. C. de Jesus, and M. L. B. Martinez, “Análise comparativa do desempenho e suportabilidade de equipamentos eletro-eletrônicos frente a solicitações de sobretensões impulsivas,” *VI SBQEE*, no. s, pp. 1–6, 2005.
- [24] M. D. Teixeira et al., “Valuation for Standard Power Quality Limits Acceptable to Avoid Damages in Appliances,” *WSEAS Trans. Circuits Syst.*, vol. 4, no. 5, 2005.
- [25] E. A. Martins, “Elaboração de Curvas de Suportabilidade para Microcomputadores e Estudos de Desempenhos de Dispositivos Mitigadores para Subsidiar PIDs,” 2012.
- [26] P. H. O. Rezende, “Contribuições para os Estudos Computacionais de

- 
- Ressarcimento por Danos Elétricos: Limites de Suportabilidade e Induções Eletromagnéticas”, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.  
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2017.34>
- [27] IEEE, “IEEE Standard 1159: Recommended Practice Monitoring Electric Power Quality,” 1995.
- [28] Aneel, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica,” 2018.
- [29] IEC, “Electromagnetic compatibility (EMC): Part 4-5: Testing and measurement techniques: Surge immunity test,” IEC Std 61000-4-5, 1995.
- [30] IEC - International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4: Testing and Measurements Techniques - Section 11: Voltage Dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.” 2004.
- [31] IEC - International Electrotechnical Commission, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4.30: Testing and measurement techniques - Power Quality Measurement Methods,” 2008.
- [32] IEEE PES, “IEEE Guide for Voltage Sag Indices,” 2014.
- [33] Analog Devices, “Energy Metering IC with Pulse Output,” pp. 1–20, 2009.
- [34] 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.
- [35] I. N. Gondim, J. A. F. Barbosa Jr, 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,” pp. 651–659, 2012.