

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

Lúcio José da Motta

**ANÁLISE DA IMUNIDADE DE FONTES DE COMPUTADOR
FRENTE A DISTORÇÕES HARMÔNICAS E
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.**

Itajubá

2021

LÚCIO JOSÉ DA MOTTA

**ANÁLISE DA IMUNIDADE DE FONTES DE TENSÃO
FRENTE A DISTORÇÕES HARMÔNICAS E
AFUNDAMENTOS DE TENSÃO.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Paulo Fernando Ribeiro

Coorientador: Prof. Fernando Nunes Belchior

Itajubá

2021

Dedico este trabalho à minha mãe, de quem procuro seguir os exemplos e ensinamentos, a pessoa que mais sonhou com este momento e não mediu esforços para proporcionar a concepção de quem sou hoje.

Aos meus filhos, fontes de inspiração e a quem desejo ser exemplo, amigo, herói verdadeiro...

AGRADECIMENTOS

A produção deste trabalho só foi possível graças ao apoio de várias pessoas, a quem devo os mais sinceros agradecimentos.

Primeiramente, ao orientador, professor Paulo Ribeiro, por proporcionar a oportunidade de realizar este trabalho e depositar confiança em realizá-lo, mesmo diante dos atrasos na entrega de cada versão e longos períodos sem contatá-lo.

Também agradeço ao professor Fernando Belchior, que me incentivou a fazer o mestrado e sugeriu este trabalho junto ao prof. Paulo. Agradeço as discussões técnicas, a maioria via *whatsapp*.

Não posso deixar passar despercebido o agradecimento aos professores do GQEE, que também me apoiaram e disponibilizaram o espaço laboratorial e equipamentos. Assim como o prof. José Carlos Grillo, que cedeu o registrador de temperaturas e contribuiu com sugestões no início dos testes.

Mesmo distante é imprescindível agradecer ao Sr. Alex McEachern, que fez valiosas contribuições para a realização dos artigos frutos deste trabalho, e que assim deram aporte ao mesmo.

Agradeço aos meus pais, responsáveis pela minha existência e pela pessoa que sou. Na maneira simples de viver, ensinaram-me um caminho de caráter, honestidade, educação, dedicação, do trabalho como fonte de enriquecimento não só financeiro, mas intelectual e profissional. À minha mãe, que sempre torceu, me incentivou a estudar e lutar pelo melhor.

Aos meus filhos, Pedro Lucas e Helena, minhas inspirações, e à minha esposa Renata, que me acompanhou durante toda a trajetória no mestrado, e sempre me esperou cuidando das crianças e da casa, enquanto tecia este trabalho, por vezes chegando tarde em casa.

Ao companheiro Fernando Jung, que esteve junto durante todo o mestrado e nas várias noites no laboratório ajudando nos testes e escrita de artigos. Pessoa dedicada e que sem sua ajuda, este trabalho estaria longe de terminar.

Agradeço ainda a todos que, direta e indiretamente, contribuíram para que este momento, além de tornar-se possível, se concretizasse.

Muito obrigado.

RESUMO

Fontes de alimentação para dispositivos eletrônicos são cada vez mais um segmento significativo da carga total em redes de energia, as quais muitas podem impactar na qualidade da energia elétrica, assim como podem sofrer com os distúrbios presentes na mesma. Desta forma, muitos padrões e recomendações foram e estão sendo desenvolvidos para melhorar a compatibilidade entre redes elétricas e dispositivos eletrônicos, incluindo padrões que definem limites para distorção e afundamentos de tensão.

Neste viés, este trabalho apresenta algumas normas e recomendações pertinentes a distorções harmônicas, assim como recomendações para testes de imunidade de equipamentos submetidos a afundamentos de tensão. Diante disto, foram realizados testes experimentais em um ambiente controlado de laboratório com fontes de computadores, onde os parâmetros básicos foram registrados para permitir uma análise detalhada da condição de alimentação sob diferentes excitações de tensão. Portanto, em uma primeira etapa foi verificado a compatibilidade e imunidade destes objetos de testes frente a altos níveis de harmônicos de tensão e posteriormente, este fenômeno associado a afundamentos de tensão de até 50% da tensão nominal.

Com base na temperatura, tensão de saída (CC), corrente consumida e do funcionamento das fontes de alimentação, este trabalho demonstra que estes dispositivos podem tolerar distorções harmônicas de tensão muito maiores do que os limites típicos recomendados (até 10 vezes mais). Também foi verificado que as fontes de alimentação com controle de fator de potência (PFC) toleram níveis ainda mais altos de distorção de tensão, além de apresentarem melhor desempenho e consumirem menor corrente harmônica do que os *designs* de fonte de alimentação tradicionais. Os resultados mostram que diferentes formas de onda podem afetar o desempenho da carga, principalmente quando ocorrem concomitantemente a afundamentos de tensão, todavia nenhum dano foi observado para este caso.

A partir deste trabalho é factível pensar que as regulamentações, principalmente as que tangem as distorções harmônicas, necessitem de estudos e atualizações mais frequentes, haja vista a existência de diversos modelos de equipamentos, além da melhoria no *design* dos mesmos. Também fica evidente a necessidade de mais investigação com diferentes tipos e topologias de fontes de alimentação para uma avaliação abrangente de seu desempenho, além de avaliar a compatibilidade junto às normas e recomendações, tendo em vista que os atuais limites para distorções harmônicas podem ser considerados bastante severos quanto aos objetos avaliados.

Palavras chave: Qualidade da energia elétrica, distorção harmônica, afundamentos de tensão, fontes de alimentação.

ABSTRACT

Power supplies for electronic devices are increasingly a significant segment of total load in power systems, many of which can impact on the power quality, as well as can suffer from the disturbances present in it. Thus, many standards and recommendations been and are being developed to improve the compatibility between power systems and electronic devices, including standards that define limits for harmonic distortions and voltage sags.

In this bias, this work shows some standards and recommendations pertinent of harmonic distortion, as well standards for immunity tests of devices submitted to voltage sags. In face this, experimental tests were realized with computers power supplies in controlled environment laboratory, where the basic parameters were recorded to permit detailed analysis of the power condition under different voltage excitations. Thus, in first step was checked the compatibility and immunity this equipment under test up high levels of voltage harmonic and posteriorly, this phenomena associated to voltage sag up 50% of the nominal voltage.

Based on temperature, output voltage (DC), consumption current and function of power supplies, this work proves that this device can supported harmonic voltage distortion much larger than commons limits recommended (up 10 times more). Beside was certificated that the power supplies with power factor corrector (PFC) supported much more high voltage distortion levels, besides to have better performance and consumption less harmonic current than traditional design of power supplies. The results show that different waveform can affect the performance of load, principally when occur concomitantly the voltage sags, however any failure was observed for this case.

From this work is feasible to think that the regulations, principally those concern the harmonic distortion, need more frequently studies and updates, considering the existence of many models of devices, in addition the better design in it. Also stay clear the necessity more investigation with different kinds and topology of power supplies for the comprehensive evaluation their performance, besides to evaluate the compatibility with the standards and recommendations, considering that the present harmonic distortion limits can be considerate much severe as to the evaluated objects.

Keywords: Power quality, harmonic distortion, voltage sags, power supplies.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Limites para distorção da tensão - IEEE 519-2014..... | 30 |
| Tabela 2 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120 V a 69 kV - IEEE 519-2014. | 31 |
| Tabela 3 - Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa e média tensão - EN50160..... | 32 |
| Tabela 4 - Níveis de compatibilidade para harmônicos individuais de tensão para redes de baixa tensão (em porcentagem do valor eficaz da fundamental) - IEC 61000-2-2. | 34 |
| Tabela 5 - Limites para as componentes harmônicas de corrente por classe de equipamento - IEC 61000-3-2. | 36 |
| Tabela 6 - Níveis indicativos para tensões harmônicas no planejamento (em porcentagem da tensão fundamental) de sistemas em MT, AT e EAT - IEC 61000-3-6. | 38 |
| Tabela 7 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) - PRODIST-M8..... | 39 |
| Tabela 8 - Limites globais inferiores da distorção de tensão em porcentagem da tensão fundamental - ONS..... | 40 |
| Tabela 9 - Limites individuais para os indicadores DTHI e DTHTS95% - ONS. | 40 |
| Tabela 10 - Resumo dos limites para harmônicos de tensão. | 43 |
| Tabela 11- Classificação e características dos afundamentos de tensão. | 46 |
| Tabela 12 - Quedas de tensão necessárias para os testes de imunidade em por cento da tensão nominal - SEMI-F47-0706. | 50 |
| Tabela 13 - Nível e duração propostos para testes de afundamentos de tensão - IEC 61000-4- 11. | 52 |
| Tabela 14 - Pontos de teste recomendados para afundamentos de tensão do Tipo I e II – IEEE 1668-2017..... | 54 |
| Tabela 15 - Pontos de teste recomendados para afundamentos de tensão do Tipo III – IEEE 1668-2017..... | 55 |
| Tabela 16 - Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base conforme tensão nominal – PRODIST-M8..... | 59 |
| Tabela 17 - Comparação entre magnitude e duração propostas pela SEMI-F47, IEC 61000-4- 11 e IEEE1668..... | 61 |
| Tabela 18 - Tolerância para os níveis de tensão de saída para fonte ATX..... | 70 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 19 - Dados de placas dos dois modelos de fontes avaliadas..... | 73 |
| Tabela 20 - Valores ôhmicos dos elementos resistivos utilizados nas saídas das fontes e potência total teórica..... | 78 |
| Tabela 21 - Valores medidos na operação das fontes em stand by e com carga. | 80 |
| Tabela 22 - Temperatura registrada após tempo de estabilização. | 80 |
| Tabela 23 - Sinais de saída das fontes: tensão e corrente. | 81 |
| Tabela 24 - Níveis de correntes harmônicas para alimentação com sinal senoidal..... | 85 |
| Tabela 25 - Grandezas avaliadas para as componentes harmônicas individuais: fonte A1. | 94 |
| Tabela 26 - Grandezas avaliadas para as componentes harmônicas individuais: fonte B1..... | 96 |
| Tabela 27 - Grandezas avaliadas para as fontes A1 e B2 durante testes com defasamento angular das componentes harmônicas. | 115 |
| Tabela 28 - Tensão de saída das fontes A1 e B2 durante testes com defasamento angular das componentes harmônicas..... | 115 |
| Tabela 29 - Temperatura média dos canais de entrada e saída das fontes A1 e B2 durante testes com defasamento angular das componentes harmônicas. | 118 |
| Tabela 30 - Corrente RMS e pico das fontes A1 e B2 antes dos afundamentos. | 119 |
| Tabela 31 - Valores médios antes e após a sequência de afundamentos para fonte A1..... | 127 |
| Tabela 32 - Valores médios antes e após a sequência de afundamentos para fonte B2. | 128 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1- Somatório de sinais senoidais com diferentes frequências | 26 |
| Figura 2 - Afundamento em porcentagem da Tensão Nominal: forma de onda e sinal RMS.. | 45 |
| Figura 3 - Porção da curva CBEMA usada para designação de equipamentos [2]. | 48 |
| Figura 4 - Curva ITI (revisada em 2000) [32] | 49 |
| Figura 5 - Curva SEMI F47-0706 (adaptado de 33).. | 51 |
| Figura 6 - Níveis recomendados para testes de afundamentos do Tipo I e Tipo II, adaptado de [30]..... | 56 |
| Figura 7 - Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas [26]..... | 58 |
| Figura 8 - Total de computadores em uso no Brasil em milhões de unidades [35]..... | 64 |
| Figura 9 - Circuito esquemático de uma fonte linear [36]..... | 65 |
| Figura 10 - Circuito esquemático de uma fonte chaveada [36]..... | 66 |
| Figura 11 - Configuração do conector de 24 pinos das fontes ATX [45]. | 69 |
| Figura 12 - Representação da bancada de testes..... | 74 |
| Figura 13 - Bancada de testes. | 76 |
| Figura 14 - Sistema de resfriamento da carga CC (resistência). | 77 |
| Figura 15 - Forma de onda da tensão (preto) e corrente da fonte A1 (azul) e B1 (vermelho) operando com carga..... | 83 |
| Figura 16 - Espectro harmônico de corrente e THD_I das fontes A1 e A2. | 83 |
| Figura 17 - Espectro harmônico de corrente e THD_I das fontes B1 e B2. | 84 |
| Figura 18 - Fonte A1: A) visão geral dos componentes B) imagem termográfica (operando com carga). | 86 |
| Figura 19 - Fonte B1: A) visão geral dos componentes B) imagem termográfica (operando com carga). | 86 |
| Figura 20 - Intervalo de tempo entre consecutivos afundamentos de tensão. | 89 |
| Figura 21 - Formas de onda das fontes do tipo A e B sem carga e sinal senoidal. | 92 |
| Figura 22 - Formas de onda das fontes do tipo A e B com carga e sinal senoidal. | 93 |
| Figura 23 - Sinal de tensão e corrente para 12% de distorção de 3ª e 13ª ordens harmônicas. | 95 |
| Figura 24 - Sinal de tensão e corrente para 12 % de distorção de 3ª e 13ª ordens harmônicas. | 97 |
| Figura 25 - Corrente eficaz e THD_I para distorção de 12%. | 98 |

| | |
|--|-----|
| Figura 26 - Tensão de saída para 12% de distorção harmônica. | 99 |
| Figura 27 - Temperatura na entrada e saída das fontes alimentadas com 12% de distorção harmônica. | 100 |
| Figura 28 - Variáveis monitoradas em testes com distorção composta por 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a componentes harmônicas: fonte A1. | 101 |
| Figura 29 - Variáveis monitoradas em testes com distorção composta por 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a componentes harmônicas: fonte B1. | 102 |
| Figura 30 - Variáveis monitoradas em testes com distorção composta por 3 ^a , 5 ^a e 7 ^a componentes harmônicas: fonte B2. | 102 |
| Figura 31 - Tensão de saída (CC) da fonte A1 durante os testes com distorção harmônica. . | 103 |
| Figura 32 - Variação de temperatura durante os testes com distorção harmônica: fonte A1. . | 104 |
| Figura 33 - Tensão de saída (CC) da fonte B1 durante os testes com distorção harmônica. . | 105 |
| Figura 34 - Variação de temperatura durante os testes com distorção harmônica: fonte B1. . | 105 |
| Figura 35 - Evolução da avaria ocorrida na fonte B1 de 30% de distorção até a queima. | 107 |
| Figura 36 - Imagem termográfica da fonte B1 com 43% de THD _v | 107 |
| Figura 37 - Tensão de saída (CC) da fonte B2 durante os testes com distorção harmônica. . | 109 |
| Figura 38 - Variação de temperatura durante os testes com distorção harmônica para fonte B2. | 109 |
| Figura 39 - Evolução do THD _I das fontes A1, B1 e B2 para diferentes percentuais de distorção do sinal de tensão. | 110 |
| Figura 40 - Espectro harmônico de corrente e THD _I das fontes A1, B1 e B2 para 40% de THD _v | 111 |
| Figura 41 - Forma de onda de corrente das fontes A1, B1 e B2 para 40% de THD _v | 113 |
| Figura 42 - Oscilografia das fontes A1 e B2 para distorção com defasagem angular das componentes harmônicas: A) 0°; B) 90°; C) 180°. | 117 |
| Figura 43 - Corrente máxima (CA) no início do afundamento - 1° meio ciclo. | 120 |
| Figura 44 - Corrente máxima (CA) durante o afundamento de tensão. | 121 |
| Figura 45 - Corrente RMS (CA) e sinais de saída (CC) das fontes A1 e B2 no primeiro afundamento para 80% da tensão nominal. | 122 |
| Figura 46 - Corrente RMS (CA) e sinais de saída (CC) das fontes A1 e B2 no primeiro afundamento para 50% da tensão nominal. | 123 |
| Figura 47 - Variação do sinal CC durante afundamento em 50% da tensão nominal com 30% de THD _v : fonte A1. | 124 |

| | |
|--|-----|
| Figura 48 - Corrente máxima (CA) durante o término do 1º afundamento de tensão (subida). | 125 |
| Figura 49 - Corrente de retorno no término do terceiro afundamento em 50% da tensão nominal com 40% de THD _v | 126 |
| Figura 50 - Evolução da temperatura durante afundamentos de tensão com sinal senoidal e 40% de THD _v : fonte A1..... | 130 |
| Figura 51 - Evolução da temperatura durante afundamentos de tensão com sinal senoidal e 40% de THD _v : fonte B2. | 131 |
| Figura 52 - Representação da sequência de afundamentos de tensão relacionados aos destaques das Figura 50 e Figura 51..... | 132 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------------------|---|
| AMT | Afundamento momentâneo de tensão; |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica; |
| AT | <i>Advanced technology</i> ; |
| AT | Alta tensão; |
| ATT | Afundamento temporário de tensão; |
| ATX | <i>Advanced technology extended</i> ; |
| BT | Baixa tensão; |
| CA | Corrente alternada; |
| CBEMA | <i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i> ; |
| CC | Corrente contínua; |
| CD | <i>Compact disc</i> ; |
| CENELEC | <i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i> ; |
| CLP | Controlador lógico programável; |
| DTHI | Distorção de tensão harmônica individual; |
| DTHTS95% | Percentil 95% da distorção de tensão harmônica total; |
| DTT ₃ 95% | Percentil 95% da distorção harmônica total para componentes múltiplas de 3; |
| DTT95% | Percentil 95% da distorção harmônica total; |
| DTT ₁ 95% | Percentil 95% da distorção harmônica total para componentes ímpares não múltiplas de 3; |
| DTT _p 95% | Percentil 95% da distorção harmônica total para componentes pares não múltiplas de 3; |
| DVD | <i>Digital video disc</i> ; |
| EAT | Extra alta tensão; |
| FD | Fator de deslocamento; |
| FI | Fator de impacto; |
| FP | Fator de potência; |
| HVSI | <i>Harmonic Voltage safety indices</i> ; |
| IEC | <i>International Electrotechnical Commission</i> ; |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ; |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia; |

| | |
|------------------|---|
| ITI | <i>Information Technology Industry Council;</i> |
| LED | <i>Light emitting diode;</i> |
| MIGDI | Microsistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica; |
| MT | Média tensão; |
| NTC | <i>Negative temperature coefficient;</i> |
| OT | Objeto de teste; |
| P95 | Percentil 95%; |
| P99 | Percentil 99%; |
| PAC | Ponto de acoplamento comum; |
| PFC | <i>Power fator corrector;</i> |
| PRODIST | Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional; |
| pu | por unidade; |
| PWM | <i>Pulse width modulation;</i> |
| QEE | Qualidade da energia elétrica; |
| RMS | <i>Root Mean Square;</i> |
| SEMI | <i>Semiconductor Equipment Materials International;</i> |
| SIGFI | Sistema individual de geração de energia elétrica com fontes intermitentes; |
| Std | <i>Standard;</i> |
| TDD | <i>Total demand distortion;</i> |
| THD | <i>Total harmonic distortion</i> (distorção harmônica total); |
| THD _I | Distorção harmônica total de corrente; |
| THD _V | Distorção harmônica total de tensão; |
| TI | Tecnologia da informação; |
| TUG | Tomada de uso geral; |
| UPS | <i>Uninterruptible power system;</i> |
| USBS | <i>Uninterruptible secondary battery system;</i> |
| VTCD(s) | Variação(ões) de tensão de curta duração. |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 2 | ESTADO DA ARTE | 19 |
| 3 | PANORAMA GERAL: CONHECENDO OS HARMÔNICOS, AFUNDAMENTOS DE TENSÃO, REGULAMENTAÇÕES E FONTES DE COMPUTADORES | 25 |
| 3.1 | HARMÔNICOS | 25 |
| 3.2 | NORMAS E RECOMENDAÇÕES | 28 |
| 3.2.1 | “ <i>Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems</i> ” - IEEE Std 519-2014 | 29 |
| 3.2.2 | “ <i>Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems</i> ” - EN 50160-2005 (draft) | 31 |
| 3.2.3 | “ <i>Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems</i> ” - IEC 61000-2-2-2014 | 33 |
| 3.2.4 | “ <i>Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current Up to and Including 16 A per Phase)</i> ” - IEC 61000-3-2-2014 (draft) | 35 |
| 3.2.5 | “ <i>Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems. Basic EMC Publication</i> ” - IEC 61000-3-6-2008 | 37 |
| 3.2.6 | Procedimentos de Distribuição – PRODIST-M8 / ANEEL-2018 | 38 |
| 3.2.7 | Procedimentos de Rede - ONS-2017 | 39 |
| 3.3.1 | Quadro Comparativo – Limites Harmônicos | 41 |
| 3.4 | AFUNDAMENTOS DE TENSÃO | 44 |
| 3.3.1 | CBEMA, ITI e SEMI-F47 | 47 |
| 3.3.2 | “ <i>Testing measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variation immunity tests</i> ” – IEC 61000-4-11-2004 | 51 |
| 3.3.3 | “ <i>IEEE Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V</i> ” - IEEE 1668-2017 | 53 |
| 3.3.4 | Procedimentos de Distribuição – PRODIST-M8 / ANEEL-2018 | 57 |
| 3.3.5 | Breve comparativo entre as recomendações apresentadas | 60 |
| 3.4 | FONTES DE ALIMENTAÇÃO: CA-CC | 63 |
| 4 | METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 72 |
| 4.1 | INSTRUMENTAÇÃO E BANCADA DE TESTES | 72 |
| 4.2 | ROTINA DE TESTES | 78 |
| 4.2.1 | Cenário ideal: sinal senoidal | 79 |
| 4.2.2 | Cenário adverso: distorções harmônicas e afundamentos de tensão | 86 |
| 5 | RESULTADOS E ANÁLISE | 90 |

| | |
|--|------------|
| 5.1 COMPONENTES INDIVIDUAIS: FONTES A1 E B1 | 93 |
| 5.2 COMBINAÇÃO DE 3ª, 5ª E 7ª ORDENS HARMÔNICAS COM DEFASAGEM ANGULAR NULA: FONTE A1, B1 E B2..... | 100 |
| 5.3 COMBINAÇÃO 3ª, 5ª E 7ª ORDENS HARMÔNICAS COM DEFASAGEM ANGULAR: FONTE A1 E B2. 114 | |
| 5.4 COMBINAÇÃO 3ª, 5ª E 7ª ORDENS HARMÔNICAS COM AFUNDAMENTOS DE TENSÃO: FONTE A1 E B2. | 118 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 133 |
| REFERÊNCIAS..... | 141 |
| APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA FONTE GERADORA DE SINAIS ARBITRÁRIOS 148 | |
| APÊNDICE B – FONTES DE COMPUTADORES UTILIZADAS DURANTE OS TESTES | 150 |
| APÊNDICE C – ILUSTRAÇÃO COMPARATIVA ENTRE AS FONTES B1 E B2..... | 151 |
| ANEXO A – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MEDIDOR 1 | 152 |
| ANEXO B – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MEDIDOR 2..... | 153 |
| ANEXO C – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MEDIDOR 3 | 154 |
| ANEXO D – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO OSCIOSCÓPIO | 155 |
| ANEXO E – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO REGISTRADOR DE TEMPERATURA..... | 156 |
| ANEXO F – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MULTÍMETRO COM TERMOGRAFIA..... | 157 |
| ANEXO G – ARTIGO 01 | 158 |
| ANEXO H – ARTIGO 02 | 159 |
| ANEXO I – ARTIGO 03..... | 160 |
| ANEXO J – ARTIGOS NÃO RELACIONADOS COM A DISSERTAÇÃO PRODUZIDOS DURANTE O PERÍODO DE MESTRADO | 161 |

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento demográfico e econômico, na qual o ser humano depende cada vez mais de energia elétrica para executar as mais diversas atividades, tem-se o aumento do consumo de eletricidade. Contudo, conforme [1], a expansão na demanda de eletricidade por vezes é compensada pelo aumento da eficiência energética, em que novos dispositivos e processos de produção substituem aparelhos mais antigos e menos eficientes.

Com a constante evolução dos dispositivos eletrônicos aliada à necessidade de produzir mais e em menor espaço de tempo, a eletrônica de potência ganha espaço tanto nas indústrias, em residências, como nos próprios sistemas de geração, transmissão e distribuição, através do uso de: controladores lógicos programáveis (CLP), controladores de velocidade como *soft starters*, iluminação (lâmpadas compactas fluorescentes e LED), fontes chaveadas empregadas nos diversos equipamentos, condicionadores de energia, etc. Para Dugan et al [2], inúmeros dos atuais equipamentos são sensíveis à falta de qualidade da energia elétrica (QEE), como no caso de interrupções, por exemplo. A operação eficiente de máquinas e seus controles se tornam cada vez mais dependentes de energia elétrica de qualidade [2].

Os mesmos equipamentos que contribuem com a eficiência energética, redução no tempo de processos e aumento da produção e qualidade dos produtos, podem trazer problemas para a qualidade da energia. Segundo [2], problemas de QEE ocorrem quando há distúrbios no sinal de tensão, corrente ou frequência, de modo a afetar a operação regular de cargas.

Com a entrada e modernização de diversos dispositivos no sistema elétrico, tem aumentado os desafios de se operar em regime permanente nas condições ideais, que para [3] ocorre quando os seguintes requisitos são satisfeitos:

- Sinais de tensão e correntes senoidais;
- Frequência e tensões constantes;
- Tensões trifásicas equilibradas;

- Cargas com fator de potência (FP) unitário;
- Perdas de transmissão e distribuição nulas.

Nas últimas décadas a preocupação com a qualidade da energia elétrica vem aumentando, haja vista, a sensibilidade de novas cargas aos distúrbios de QEE, maior disseminação dos conhecimentos, principalmente entre os consumidores, que se tornam mais exigentes e a necessidade de maior eficiência e produtividade com menores gastos econômicos entre todos os envolvidos. Diante desta vertente, várias recomendações e normas foram criadas a fim de que haja o mínimo de condições aceitáveis para o bom desempenho do sistema elétrico. Para isso, a qualidade da energia elétrica pode ser avaliada em termos comparativos com as características de um sistema ideal [3].

Um problema frequente no sistema elétrico são os harmônicos, que conforme [2] são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental (frequência na qual o sistema de alimentação é projetado para operar). Desta forma, os sinais periódicos distorcidos (não senoidais) de tensão e corrente podem ser descritos pela soma da frequência fundamental e dos harmônicos. Estes distúrbios ocorrem devido à característica não linear de certas cargas, cujo sinal de corrente não é proporcional à tensão aplicada.

Segundo [2], as discussões acerca das distorções harmônicas ganharam destaque com a massiva entrada de conversores eletrônicos no final da década de 1970. Porém, o mesmo ressalta que entre as décadas de 1930 e 1940, foram realizados diversos trabalhos abordando a preocupação com as distorções, que poderiam afetar principalmente os sistemas de telefonia da época. No entanto, na literatura são encontrados artigos do início do século XX, como [4] datado de 1913, que mostrava preocupação com tal assunto, fazendo críticas ao limite percentual imposto na época, de 10 % (na geração) e ainda alertando quanto a possíveis erros de medição, como no caso do fator de potência. Na época, os medidores detectavam apenas a

diferença angular dos sinais, mas não distinguiam diferenças nas formas de onda. Anteriormente, em 1910, [5] retrata o impacto dos harmônicos em transformadores de distribuição, avaliando diversas oscilografias durante a magnetização dos mesmos. Em 1915, [6] avaliou e apontou inconsistências de algumas equações utilizadas para obtenção do desvio da forma de onda com relação ao sinal da fundamental (fatores de distorção) quando comparado aos resultados das mesmas. Neste foi utilizado o termo fator harmônico, a qual retratava adequadamente as componentes harmônicas, porém, era de difícil aplicação no dia a dia.

Diante da preocupação com possíveis problemas oriundos da presença de harmônicos no sistema elétrico, várias normas e recomendações têm sido criadas a fim de limitar os níveis de distorção nos sinais de tensão e corrente. Contudo, com as constantes mudanças no sistema elétrico, tais como: crescimento e predominância do uso de cargas não lineares, sensibilidade das cargas, fluxo bidirecional (geração distribuída), etc., por vezes os limites impostos podem negligenciar a real interface entre o sistema elétrico e os dispositivos a ele conectados.

Segundo [7], os principais objetivos em regulamentar os níveis de distorção harmônica visam minimizar as perdas e evitar danos aos sistemas elétricos e cargas, haja vista, o impacto no isolamento, aquecimento e redução da vida útil destes. Porém, além da magnitude, o tempo de exposição às distorções harmônicas impacta na performance e longevidade dos equipamentos, devendo este fator ser levado em conta nas regulamentações.

As características construtivas dos equipamentos variam muito, fazendo que alguns sejam mais sensíveis a distorções com componentes harmônicas de frequências mais altas, ou por trabalhar com tensões menores que a nominal, eventos rápidos, mas que podem elevar os níveis de distorção acima dos limites estabelecidos, etc. Logo, devido à variação das constantes térmicas e diferentes níveis de isolamento dos equipamentos, fica difícil

estabelecer limites harmônicos que contemplem satisfatoriamente todas as variáveis envolvidas, e, conseqüentemente à vasta variedade de equipamentos conectados às redes elétricas.

Embora seja preocupante os problemas que possam surgir devido às distorções harmônicas, principalmente com os consumidores finais, para Dugan et al [2], a maior parte dos problemas de QEE estão relacionados a afundamentos de tensão e interrupções, que podem ocorrer em qualquer parte do sistema elétrico. Como exemplificado em [8], ocorrências nos sistemas de alta tensão, podem ocasionar afundamentos de tensão afetando as redes de baixa tensão, geralmente ocasionando altos transtornos financeiros. Nesta vertente, este trabalho buscou avaliar, a partir de experimentos laboratoriais, o comportamento e imunidade de fontes de computadores frente a níveis de distorção harmônica superiores aos que as normas estabelecem. Para complementar e enriquecer a análise, foram realizados testes com altos níveis de distorção concomitantemente a afundamentos de tensão aplicados a estes dispositivos, que fazem parte de um significativo segmento de cargas presentes no atual sistema elétrico.

Na sequência será apresentada uma revisão bibliográfica a fim de expor trabalhos de relevância acadêmica que estão na mesma vertente deste, ou mesmo, que abordem de forma parcial o tema em questão. Em seguida, é apresentado um breve panorama acerca de: definição de harmônicos, normas e regulamentações pertinentes, afundamentos de tensão e aspectos básicos de fontes empregadas em computadores (*desktops*).

No capítulo 4 é exposta a metodologia experimental, na qual trará dados relativos à instrumentação utilizada e características das fontes avaliadas. Já no capítulo 5 são abordados os resultados e análises, que subsidiarão o desfecho deste trabalho com as considerações finais.

2 ESTADO DA ARTE

Conforme apresentado sucintamente na introdução deste, há muita preocupação com a qualidade da energia elétrica, seja com relação aos aspectos que tangem as distorções harmônicas, quanto às variações de tensão de curta duração (VTCDs), que abrangem afundamentos e elevações de tensão (*voltage sag* e *voltage swell*), etc. Diante desta condição, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos, seja de caráter teórico, experimental ou simulação computacional, muitas datadas do início do século passado, conforme apresentado anteriormente. Contudo, neste tópico serão abordados alguns trabalhos de relevância acadêmica apresentados nas últimas três décadas e que vão ao encontro deste trabalho, podendo discorrer apenas de forma parcial os seguintes assuntos:

- Normas e recomendações relativas a distorções harmônicas;
- Impacto dos distúrbios de QEE em equipamentos (foco em harmônicos e afundamentos de tensão);
- Melhoria e desempenho de fontes de computadores.

Embora tenham sido mencionados três assuntos que nortearam os trabalhos a serem apresentados, os mesmos não foram divididos em tópicos, mas descritos em sequência cronológica com relação à publicação. Esta forma permite avaliar a evolução e preocupação com o tema, mesmo diante a modernização ocorrida nos sistemas elétricos, como nas próprias pesquisas acadêmicas.

Em [9], um relatório realizado por uma equipe do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos - IEEE (do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) datado de 1993, realizou uma abordagem dos efeitos dos harmônicos em equipamentos, tais como: capacitores, disjuntores, fusíveis, condutores, transformadores, telefones, motores, equipamentos eletrônicos, medidores (amperímetros, volímetros e wattímetros) e relés de

proteção. No entanto, a maioria dos equipamentos foram abordados de forma qualitativa, com base em outros trabalhos. Os autores comentam que as normas (a época) eram inconsistentes e incompletas devido à falta de conhecimento dos reais efeitos dos harmônicos nos equipamentos, haja vista a constante modernização dos dispositivos eletrônicos, além do crescente aumento de cargas não lineares no sistema. Também fazem críticas ao uso do fator de crista para indicar distorção da forma de onda, sendo o mesmo limitado para tal, e citam o caso de alguns fabricantes de computadores que limitam o fator de crista em $(\sqrt{2} \pm 0,1)$ (V).

Já em 1996, [10] faz um estudo probabilístico sobre a redução da vida útil de dielétricos, com ênfase em capacitores devido às distorções harmônicas. Os autores alegam que os modelos matemáticos que não levam em conta as distorções perdem a validade, haja vista, haver envelhecimento precoce comparado à operação com sinal senoidal. A vida útil dos capacitores diminui com o aumento da temperatura e da tensão. Portanto, se a distorção elevar a tensão, contribuirá com a redução da vida do capacitor. Nesta vertente, foi apresentada uma ferramenta matemática para estimar o tempo de vida útil de capacitores frente a distorções do sinal de tensão. Contudo, o método desenvolvido era limitado em apenas uma componente harmônica por vez, o que se afasta do cenário real.

No ano seguinte, Miyazaki et al [11] realizaram testes práticos inserindo distorção harmônica e desequilíbrio de tensão em um sistema ininterrupto de bateria secundária - USBS, do inglês "*Uninterruptible Secondary Battery System*", que segundo os autores é um dispositivo similar aos tradicionais sistemas de energia ininterrupta (UPS - *Uninterruptible Power System*), porém desenvolvido com menor investimento, dimensão e maior eficiência devido ao sistema de processamento. Tal equipamento possui um sistema de detecção e análise de falhas na rede elétrica que permite atuações rápidas e, portanto, deve ser imune aos distúrbios de QEE. Desta forma, este foi o alvo dos autores, que o submeteram à distorções harmônicas individuais de 3^a, 5^a e 7^a ordem, com magnitudes de 3%, 4% e 3%,

respectivamente, além de desequilíbrio de tensão de 5%. Nestas condições, o USBS mostrou ser imune, não tendo seu ciclo de operação afetado.

Em [12] foi relatado os efeitos da distorção e desequilíbrio de tensão na vida útil do isolamento de motores de indução de baixa tensão: menor torque eletromagnético implicando em maior tempo de partida, logo no aceleração do processo de fadiga, pulsações de torque que podem afetar a vida útil de rolamentos, acoplamentos e/ou engrenagens. O estudo baseou-se na modelagem térmica com dados reais de motores de 2 a 200 hp, mostrando que os sub-harmônicos de tensão têm efeitos consideráveis no envelhecimento térmico do motor. Com base na modelagem, os autores também puderam estimar, em dólares, o custo da perda de vida de motores devido às distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão.

No ano de 2006, [13] apresentou trabalho similar a [14], mostrando um modelo matemático que leva em consideração o aumento de temperatura devido à variação de cargas harmônicas, de forma a prever a temperatura do transformador e conseqüentemente estimar o tempo de vida útil do mesmo. Foi utilizado nas simulações as componentes harmônicas de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a, 23^a e 25^a ordens, com distorção harmônica total (THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*) de 10% e posteriormente 22%, que levaram ao aumento de temperatura de 2 °C e 8 °C, respectivamente comparado ao caso em condições ideais. Contudo, os autores relatam que o maior problema para a elevação da temperatura não é a distorção de tensão, mas a distorção harmônica de corrente.

Em [15], datado de 2009, foi realizada análise do impacto da distorção harmônica de tensão na distorção de corrente a partir de testes práticos com diversos equipamentos: lâmpadas incandescentes, compacta e tubular fluorescente, micro-ondas, refrigerador, aparelho condicionador de ar, computador e ventilador. Foram realizados testes adicionando a tensão senoidal apenas componentes ímpares até a 25^a ordem, variando de 5% ou 10% e combinado aos ângulos de 0°, 90°, 180° e 270°. Também se realizou testes com a combinação

de componentes harmônicas típicas às encontradas no sistema elétrico: 3º, 5º e 7º harmônicos com as respectivas magnitudes de 4,1%, 2,5% e 1% e ângulos de -164° , -157° e -142° . Diante aos vários testes os autores concluíram que a variação da distorção harmônica total de corrente (THD_I) com relação à magnitude da tensão harmônica e ângulo de fase, depende do tipo de carga, portanto o incremento da distorção total da tensão (THD_V) não implica que obrigatoriamente o THD_I deva aumentar.

Em 2013, [16] apresenta resultados de testes realizados com equipamentos industriais e residenciais (forno de micro-ondas, condicionador de ar, televisão, computador, contator, controlador lógico programável, etc.) alimentados em 230 V, 50 Hz (rede australiana) submetidos a afundamentos de tensão. Este trabalho além de mostrar o quão os equipamentos foram suscetíveis, fez análise e críticas às curvas ITI - CBEMA e ao uso das mesmas, haja vista, serem designadas para tensão de 120 V em sistemas de 60 Hz, porém são constantemente utilizadas para outros níveis de tensão sem serem adaptadas. Também comenta sobre a diversidade de equipamentos que atualmente têm ampla faixa de alimentação e de forma automática (100-240 V, por exemplo), sendo estes mais resistentes aos afundamentos, mesmo os limites sendo violados em determinados níveis de tensão.

No ano seguinte, [17] tece alguns comentários a respeito das normas IEEE519, EN50160 e as IECs 61000-2-2 e 61000-2-4, utilizando a EN50160 como referência para os testes, nos quais verificou a suportabilidade de cabos e capacitores frente a distorções harmônicas. No trabalho foram realizadas combinações entre 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens harmônicas avaliando o pico e forma de onda do sinal, na qual o autor conclui que mesmo a distorção harmônica estando dentro dos limites normatizados, o equipamento pode sofrer danos dependendo das características da tensão e da corrente harmônica. Nesta vertente, é proposto o uso de índices de segurança para tensão harmônica (HVSI, do inglês *Harmonic*

Voltage Safety Indices), que possibilitam verificar a confiabilidade dos dispositivos frente a harmônicos.

Singh et al [18] em 2016 propuseram mitigar problemas de QEE resultantes de fontes de computadores e conseqüentemente o desgaste das mesmas a partir de alterações na topologia de construção destes dispositivos. A partir de testes com protótipos e simulações, os autores sugerem o uso de conversores de indutância primária sem ponte (*buck-boost*) em modo de condução descontínua. O mesmo deve ser instalado na entrada do circuito e seguido de um conversor de meia ponte (CC-CC), que será responsável pelos diferentes níveis de tensão contínua na saída da fonte, estes por sua vez, regulados a partir do controle de pelo menos um dos sinais CC de saída.

No ano seguinte, [19] avalia o desempenho e eficiência de dispositivos eletrônicos mediante a distorções harmônicas e diferentes modos de operação (baixa e alta potência). Neste trabalho foram avaliados “inversores fotovoltaicos” e fontes chaveadas em condições senoidais com frequência fundamental de 50 Hz e ângulos entre tensão e corrente de 0°, 90° e 180°, além dos casos em que se aplicou distorção total de 5% para dois sinais de tensão: achatada (*flattened-top*) e pontiaguda (*pointed-top*). Os autores mencionaram a importância de se utilizar a forma correta para cálculo de eficiência, principalmente devido ao rendimento cair com a distorção, além de usar a definição de eficiência com base nas trocas de potência fundamental, pois leva em consideração as emissões harmônicas e as interações entre a rede e o dispositivo. Também são feitas críticas quanto as atuais recomendações para avaliação dos limites harmônicos e compatibilidade eletromagnética, haja vista, estas serem de tempos em que a tecnologia dos dispositivos era mais simples. É proposto que os testes de equipamentos devam incluir distorção harmônica, tendo em vista que a maioria ocorre em condições ideais.

Em 2018, [20], que é uma “continuação” de [19], avalia apenas fontes chaveadas, em especial fontes de computadores. Neste, os autores mostram que as fontes trabalhando com

menor faixa de potência (baixa carga) perdem eficiência, além de aumentar a distorção do sinal de entrada, que perde periodicidade e aumenta o percentual de interharmônicos e componente CC. São feitas críticas às normas quanto às sugestões de testes, pois nenhuma fala do tempo de operação que deve ser empregado nos testes de fontes. Baseados em testes com dois modelos de fontes submetidos à distorção total de 3,07% e 3,61% e diferentes faixas de operação, os autores propõem o uso de janelas de tempo de medição de 8,4 segundos tendo em vista possíveis erros de medição devido à perda de periodicidade do sinal CA quando os dispositivos operam com baixa potência e são empregadas janelas menores, como 200 ms e 3 s, por exemplo. Também é proposto que as características de desempenho para diferentes faixas de operação sejam levadas em consideração nas normas para avaliação de dispositivos.

Diante aos vários artigos apresentados neste tópico, vale ressaltar que muitos outros trabalhos importantes foram omitidos e até mesmo não consultados. Sendo assim, fica claro quão rica é a literatura quanto a temas relacionados à suportabilidade de equipamentos frente a distúrbios de qualidade da energia elétrica, revelando o nível de preocupação e importância que este assunto perfaz. Mesmo sendo discutido a décadas, este tema vem ganhando fôlego nos últimos anos devido, principalmente, às novas tecnologias, aumento do uso de equipamentos eletrônicos e mudanças no setor elétrico, como por exemplo, os impactos associados à geração distribuída. Nesta vertente, justifica-se a importância e relevância desta dissertação.

3 PANORAMA GERAL: CONHECENDO OS HARMÔNICOS, AFUNDAMENTOS DE TENSÃO, REGULAMENTAÇÕES E FONTES DE COMPUTADORES.

3.1 Harmônicos

Na engenharia elétrica os harmônicos são por vezes tratados de forma leiga como elementos, entes físicos de caráter nocivo que circulam pelo sistema elétrico. No entanto, assim como na música, os harmônicos representam a frequência de um sinal, que pode ser decomposto em várias frequências, ou seja, em vários harmônicos.

A forma de onda senoidal sempre foi assumida como padrão, porém no sistema elétrico nem todos os sinais têm formato senoidal [4]. Contudo, sinais distorcidos que se repetem ciclo a ciclo (periódicos) podem ser descritos matematicamente através da soma de um sinal senoidal com uma frequência tomada como referência (fundamental) e outros sinais, também senoidais, com frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental. Desta maneira, segundo [2], as formas de onda de tensão e corrente podem ser descritas pela soma da frequência fundamental e dos harmônicos, caracterizando as distorções harmônicas. Logo, os níveis de distorção harmônica são descritos pelo espectro harmônico, definido pelas magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico individual.

A Figura 1 exemplifica e deixa claro como é a resultante da soma de uma onda senoidal, com frequência fundamental igual a 60 Hz, e outros sinais senoidais múltiplos da primeira. Para este caso, foram utilizados os múltiplos 2, 3, 4 e 5, que são denominadas ordens harmônicas e são representadas, neste trabalho, pela letra *h*.

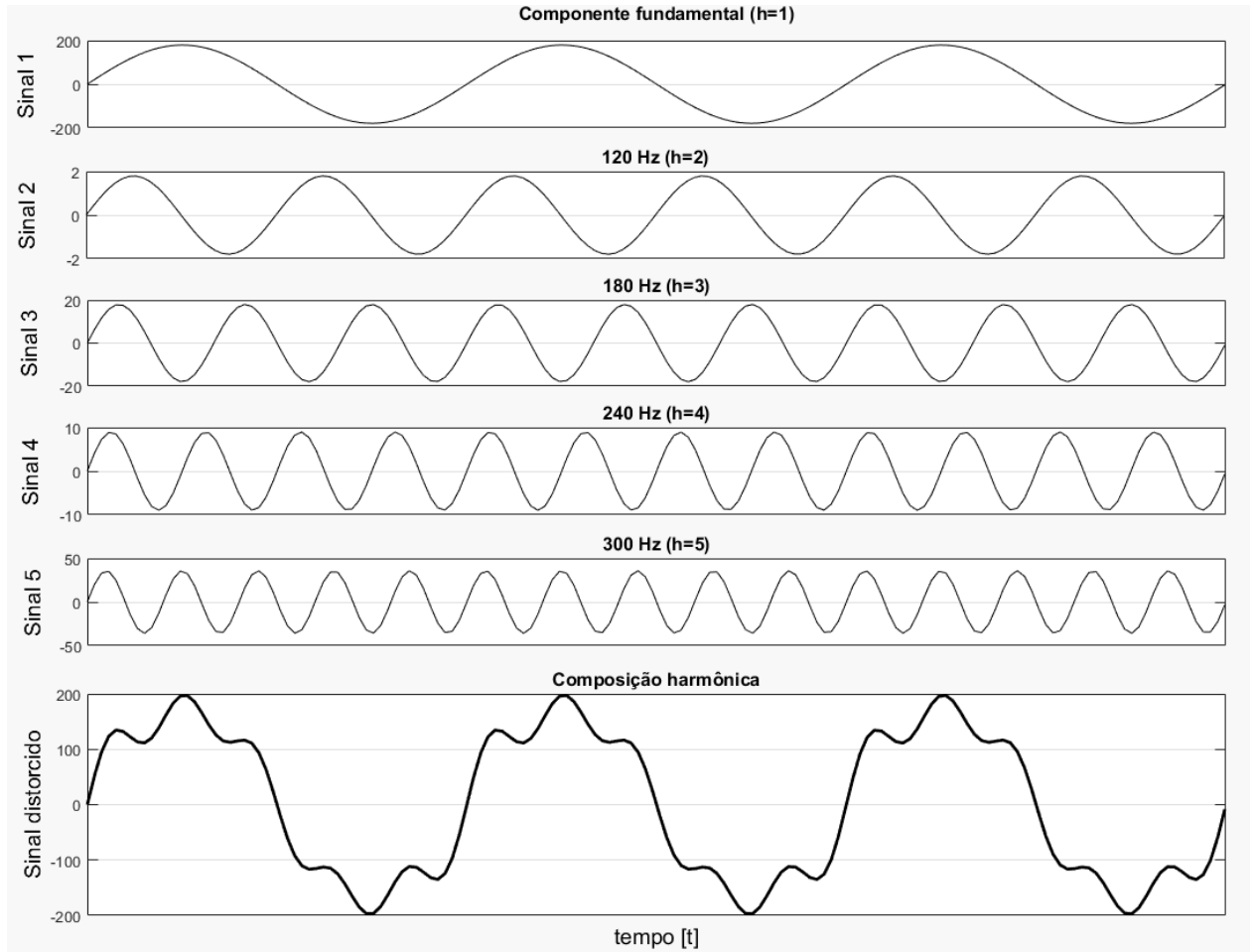


Figura 1- Somatório de sinais senoidais com diferentes frequências

A ilustração acima caracteriza a série trigonométrica conhecida como série de Fourier, cujo nome se refere a Joseph Fourier, que propôs tal propriedade a partir de experimentos relacionados à condução de calor. Em 1822 Fourier apresentou o trabalho “*Theorie Analytique de la Chaleur*” (do francês, Teoria Analítica do Calor), onde afirma que qualquer função de uma variável pode ser decomposta em uma soma de cossenos de um múltiplo dessa variável [7]. Neste caso, o somatório dos sinais 1, 2, 3, 4 e 5 resultaram no sinal distorcido em destaque.

Segundo Dugan et al [2], o conceito de série de Fourier é universalmente aplicado na análise de problemas harmônicos, na qual o sistema pode ser analisado separadamente a partir de cada harmônica, cuja frequência de cada senóide é um múltiplo inteiro da frequência

fundamental da forma de onda periódica e que recebe o nome de frequência harmônica. Desta forma, a frequência harmônica pode ser expressa em função da frequência fundamental e de um inteiro [2]:

$$f_h = h \times f_0 \quad (1)$$

Onde

f_h é a frequência harmônica,

f_0 a frequência fundamental e

h um número inteiro.

Embora seja importante conhecer a contribuição de cada componente harmônica na composição da forma de onda, geralmente procura-se falar da distorção de maneira ampla a partir de um único número. Para tal, é utilizado o valor total da distorção do sinal, conhecido como THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*. Este valor é geralmente apresentado em termos percentuais com relação ao sinal fundamental a partir da contribuição de cada componente, tanto para o sinal de tensão (THD_V) como para o de corrente (THD_I), e pode ser obtido conforme [21].

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2} \quad (2)$$

Onde

Q representa corrente ou tensão,

Q_1 é o valor eficaz da componente fundamental,

h é a ordem harmônica,

Q_h é o valor eficaz da componente harmônica de ordem h ,

H é geralmente 40 ou 50 dependendo da aplicação.

Segundo [2], o índice de THD é útil para diversas aplicações, no entanto deve ser utilizado com ponderação, principalmente por se tratar de uma medida relativa. Como exemplo, os níveis de THD_I medidos na entrada de um controlador de velocidade podem ser altos quando operam com cargas abaixo da nominal, porém a magnitude da corrente harmônica é baixa, não necessitando de preocupação.

Embora o THD possa indicar perdas, como o calor excessivo em cargas resistivas, ou mesmo em condutores, no caso de capacitores pode não ser um bom indicador, haja vista, este estar relacionado ao valor de pico da forma de onda da tensão, não ao seu valor de aquecimento [2]. Diante de possíveis lacunas ao tratar das distorções da forma de onda, várias normas e recomendações foram criadas e continuam sendo aprimoradas devido à complexidade do assunto e do próprio dinamismo do sistema elétrico, além do desenvolvimento de novas técnicas de cunho matemático, computacionais e de medição, que revelam a necessidade de maiores estudos acerca de tal assunto. Logo, na sequência será apresentado algumas normas/recomendações pertinentes e considerações necessárias.

3.2 Normas e Recomendações

Como mencionado, com a evolução do sistema elétrico e dos equipamentos ligados a este, várias mudanças têm ocorrido, como principal exemplo tem-se a distorção no sinal de corrente e conseqüentemente na tensão devido às cargas não lineares. Desta forma, a fim de obter um sistema com energia elétrica de qualidade, várias normas e recomendações foram criadas, estando algumas em processo de aprimoração. Logo, este capítulo aborda de forma sucinta, se não as principais, as recomendações internacionais que mais são citadas na literatura com respeito às distorções harmônicas: IEEE Std. 519 [22], EN50160 [23] e as recomendações IEC 61000-2-2 [24], IEC 61000-3-2 [25] e IEC 61000-3-6 [21]. Também são

apresentadas as normas que contemplam o sistema elétrico brasileiro: PRODIST - módulo 8 [26] e o submódulo 2.8 dos Procedimentos de Rede - ONS [27].

3.2.1 “*Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*” - IEEE Std 519-2014

A recomendação americana IEEE Std 519-2014 [22] traz sugestões para limitar a injeção harmônica de corrente pelos clientes de forma a não criar distorções inaceitáveis na tensão fornecida pelas concessionárias. Estas devem atender aos limites de distorção harmônica de tensão, buscando meios para isso, como o controle das características de impedância do sistema, por exemplo. Sendo assim, a distorção dos sinais deve ser avaliada no ponto de acoplamento comum (PAC) entre consumidor e concessionária, ocorrendo a divisão de responsabilidades, onde o consumidor deve limitar a injeção de corrente harmônica e a concessionária limitar a distorção na tensão.

A IEEE 519 recomenda que os limites de distorção harmônica de tensão e corrente no PAC devem seguir avaliação estatística referentes ao percentil 95% (P95) e percentil 99% (P99) em conformidade com o tempo de medição. Desta forma, os limites para distorção de tensão devem seguir:

- Percentil 99% diário para indicador de tempo muito curto (3 s com agregação de 15 janelas consecutivas de 12 ciclos em 60 Hz) deve ser menor que 1,5 vezes os valores propostos na Tabela 1;
- Percentil 95% semanal para o indicador de tempo curto (10 min com agregação de 200 valores de tempo muito curto consecutivos) deve ser menor que os valores da Tabela 1.

Vale destacar que [22] recomenda que para o cálculo de THD sejam obtidas até a quinquagésima (50^{a}) ordem harmônica, podendo ser obtidos ordens superiores caso necessário. Também propõe limites de distorção de corrente divididos em três faixas de tensão: 120 V a 69 kV, 69 kV a 161 kV e acima de 161 kV. Contudo, como este trabalho tem foco nos limites de tensão, são apresentados apenas os limites para distorção de corrente correspondentes a primeira faixa, que contempla o nível de tensão utilizado nos testes laboratoriais.

Tabela 1- Limites para distorção da tensão - IEEE 519-2014.

| Tensão (V) | Harmônico individual (%) | Distorção harmônica total (%) |
|---|--------------------------|-------------------------------|
| $V \leq 1 \text{ kV}$ | 5,0 | 8,0 |
| $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ | 3,0 | 5,0 |
| $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ | 1,5 | 2,5 |
| $161 \text{ kV} < V$ | 1,0 | 1,5 ^(a) |

Fonte: IEEE 519-2014, tabela 1 [22].

Nota: (a) Para alta tensão em pontos conectados a sistemas HVDC é permitido até 2% de THD.

Assim como para os limites de distorção de tensão, a Tabela 2 apresenta os limites de distorção para as componentes individuais ímpares de corrente, que também devem seguir os critérios estatísticos de percentil, conforme descrito a seguir. Cabe ressaltar que os valores limites devem ser em porcentagem da corrente máxima de demanda (I_L), que é estabelecida no PAC e corresponde à soma das correntes da demanda máxima para cada um dos últimos doze meses divididos por 12. A corrente de demanda pode ser denotada como a corrente de carga.

- Percentil 99% diário para indicador de tempo muito curto (3 s), deve ser menor que 2,0 vezes os valores dados na Tabela 2.
- Percentil 99% semanal para indicador de tempo curto (10 min) deve ser menor que 1,5 vezes os valores dados na Tabela 2.

- Percentil 95% semanal para indicador de tempo curto (10 min) deve ser menor que os valores dados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120 V a 69 kV - IEEE 519-2014.

| Distorção harmônica máxima de corrente em porcentagem de I_L (corrente de carga) | | | | | | |
|--|-----------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------|
| I_{CC}/I_L | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | TDD |
| < 20 | 4,0 | 2,0 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5,0 |
| 20 < 50 | 7,0 | 3,5 | 2,5 | 1,0 | 0,5 | 8,0 |
| 50 < 100 | 10,0 | 4,5 | 4,0 | 1,5 | 0,7 | 12,0 |
| 100 < 1000 | 12,0 | 5,5 | 5,0 | 2,0 | 1,0 | 15,0 |
| > 1000 | 15,0 | 7,0 | 6,0 | 2,5 | 1,4 | 20,0 |

Fonte: IEEE 519-2014, tabela 2 [22]

Nota: Componentes pares devem ser limitados em 25% dos limites para as componentes ímpares.

I_{CC} é a corrente de curto circuito máxima no PAC.

I_L é a corrente máxima de demanda no PAC em condições normais de operação.

Nesta recomendação, assim como em [2], é apresentado o termo *Total Demand Distortion* (TDD), traduzido como distorção total da demanda e que tem formulação matemática similar ao THD. Ambas as formulações se diferenciam no termo do divisor: no THD de corrente é utilizada a fundamental da corrente do sinal analisado, enquanto no TDD utiliza-se a corrente de demanda nominal no barramento analisado, sendo, portanto, expresso como porcentagem da máxima corrente de demanda.

3.2.2 “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems” - EN 50160-2005 (draft).

A norma europeia EN50160 [23], vinculada ao grupo CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*), estabelece limites para diferentes distúrbios de QEE, sendo os relacionados à distorção do sinal de tensão tomados a partir dos pontos de suprimento (PAC) de baixa e média tensão, na qual o primeiro corresponde a valores até 1 kV, e média tensão, valores acima de 1 kV e abaixo de 35 kV. Contudo, esta norma não

estabelece limites para distorção harmônica de corrente e toma como base para baixa tensão, frequência de 50 Hz e tensão de fase (linha-neutro) de 230 V como nominal.

A EN50160, assim como [22], utiliza critérios estatísticos de percentil, estabelecendo que durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmônico de tensão (valores médios a cada 10 minutos) não devem ultrapassar os valores indicados na Tabela 3. O percentil 95% da distorção harmônica total da tensão não deve ultrapassar 8% considerando até a 40ª ordem harmônica.

Embora os limites apresentados em [23] sejam iguais tanto para baixa, quanto média tensão, os mesmos são expostos em tabelas separadas, pois para baixa tensão os limites harmônicos são dados em porcentagem da tensão nominal, enquanto que para a média tensão, são apresentados com relação à tensão declarada:

A tensão de alimentação declarada é normalmente a tensão nominal da rede de distribuição. Se, por acordo entre o operador e o usuário da rede, for aplicada uma tensão diferente da tensão nominal, essa será a tensão de alimentação declarada (Tradução nossa) [23].

Cabe ressaltar que neste trabalho as duas tabelas apresentadas em [23] foram unificadas, portanto deve-se atentar ao exposto acima.

Tabela 3 - Níveis de tensão harmônica individual em redes de baixa e média tensão - EN50160.

| Harmônicos ímpares não múltiplos de 3 | | Harmônicos ímpares múltiplos de 3 | | Harmônicos pares | |
|---------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|------------|------------------|------------|
| Ordem h | Tensão (%) | Ordem h | Tensão (%) | Ordem h | Tensão (%) |
| 5 | 6,0 | 3 | 5,0 | 2 | 2,0 |
| 7 | 5,0 | 9 | 1,5 | 4 | 1,0 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,5 | 6 - 24 | 0,5 |
| 13 | 3,0 | 21 | 0,5 | | |
| 17 | 2,0 | | | | |
| 19 | 1,5 | | | | |
| 23 | 1,5 | | | | |
| 25 | 1,5 ^(a) | | | | |
| THD até 40ª ordem = 8,0 % | | | | | |

Fonte: EN50160, tabelas 1 e 2 [23].

Nota: (a) Valor correspondente à média tensão. Para baixa tensão a norma não traz valor numérico.

Segundo [23] os valores correspondentes aos harmônicos de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos, além de imprevisíveis devido aos efeitos de ressonância, não são abordados. A norma também faz ressalva quanto ao 3º harmônico, que pode ser substancialmente menor dependendo da topologia da rede avaliada para média tensão.

3.2.3 “Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems” - IEC 61000-2-2-2014

As recomendações da família 61000 da Comissão Internacional de Eletrotécnica - IEC (do inglês, *International Electrotechnical Commission*) são publicadas separadas por estruturas, sendo estas associadas ao primeiro número após a sequência de três zeros. Portanto, as recomendações apresentadas neste trabalho, IEC 61000-2-2, IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-6 pertencem às respectivas estruturas:

- Local/condições (IEC 61000-2-x) - definem características, classificação e compatibilidade dos locais (ambientes) onde serão utilizados os equipamentos conectados à rede elétrica.
- Limites (61000-3-x) - definem os níveis aceitáveis de emissão e limites de imunidade dos equipamentos conectados à rede elétrica (locais, conforme estrutura anterior).

A IEC 61000-2-2 [24] trata questões acerca de distúrbios na faixa de frequência de 0 a 9 kHz, estendendo até 148,5 kHz, assim como os limites harmônicos individuais e total de tensão dados em porcentagem da tensão fundamental, conforme apresentados na Tabela 4. Contudo, esta recomendação aborda sistemas de distribuição com tensão nominal até 420 V monofásica, ou 690 V trifásica e frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz, que se enquadra nos sistemas de baixa tensão (BT), definido abaixo segundo critérios da IEC:

- Baixa tensão (BT) refere-se a $V \leq 1 \text{ kV}$;
- Média Tensão (MT): $1 \text{ kV} < V \leq 35 \text{ kV}$;

- Alta Tensão (AT): $35 \text{ kV} < V \leq 230 \text{ kV}$;
- Extra Alta Tensão (EAT): $V > 230 \text{ kV}$.

Tabela 4 - Níveis de compatibilidade para harmônicos individuais de tensão para redes de baixa tensão (em porcentagem do valor eficaz da fundamental) - IEC 61000-2-2.

| Harmônicos ímpares não múltiplos de 3 | | Harmônicos ímpares múltiplos de 3 | | Harmônicos pares | |
|---------------------------------------|--|-----------------------------------|------------|---------------------|--|
| Ordem h | Tensão (%) | Ordem h | Tensão (%) | Ordem h | Tensão (%) |
| 5 | 6,0 | 3 | 5,0 | 2 | 2,0 |
| 7 | 5,0 | 9 | 1,5 | 4 | 1,0 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,4 | 6 | 0,5 |
| 13 | 3,0 | 21 | 0,3 | 8 | 0,5 |
| $17 \leq h < 49$ | $2,27 \times \left(\frac{17}{h}\right) - 0,27$ | $21 < h \leq 45$ | 0,2 | $10 \leq h \leq 50$ | $0,25 \times \left(\frac{10}{h}\right) + 0,25$ |
| THD = 8,0 % | | | | | |

Fonte: IEC 61000-2-2, tabela 1 [24].

Nota: Os limites para harmônicos ímpares múltiplos de 3 são tomados com base na sequência zero.

Em [24] é mencionado que os níveis de compatibilidade devem ser tomados com base em harmônicos estacionários ou de estado quase estacionário, e valores de referência para efeitos de longo e curto prazo. Os primeiros são relacionados a efeitos térmicos em cabos, transformadores, motores, capacitores, etc., que surgem a partir de harmônicos mantidos por dez minutos ou mais. O segundo caso (efeitos de curto prazo) refere-se a efeitos perturbadores em dispositivos eletrônicos suscetíveis a níveis harmônicos sustentados por três segundos ou menos, com exceção de transitórios.

Os limites apresentados na Tabela 4 têm referência nos efeitos em longo prazo. Para obter os limites harmônicos para efeitos de curto prazo, devem-se multiplicar os limites de longo prazo por um fator k :

$$k = 1,3 + \frac{0,7 \times (h - 5)}{45} \quad (3)$$

Onde h é a ordem harmônica.

O limite para distorção harmônica total para efeitos de longo prazo é de 8%, enquanto que para curto prazo o THD_V é de 11%. Vale lembrar que [24] não especifica até qual ordem harmônica deve ser realizado o cálculo de THD, porém quando o define, diz que h geralmente é 50, podendo ser utilizado apenas até a 25ª ordem em casos onde o risco de ressonância seja baixo.

3.2.4 “Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current Up to and Including 16 A per Phase)” - IEC 61000-3-2-2014 (draft).

A IEC 61000-3-2 [25] foi publicada com objetivo de limitar as emissões harmônicas provenientes de equipamentos conectados à rede elétrica de baixa tensão, a fim de garantir que a tensão da rede atenda às recomendações definidas pela IEC 61000-2-2. Contudo, [25] define limites para a emissão de corrente harmônica por equipamentos que tenham consumo de corrente de até 16 amperes por fase, sendo que para correntes maiores deve-se consultar a IEC 61000-3-4 [28] e IEC 61000-3-12 [29], que não são abordadas neste trabalho.

A IEC 61000-3-2 traz uma classificação para os equipamentos, dividindo-os em quatro categorias conforme características dos mesmos:

- Classe A: equipamentos trifásicos equilibrados, eletrodomésticos, ferramentas não portáteis, *dimmers* para lâmpadas incandescentes e equipamentos de som;
- Classe B: ferramentas portáteis e equipamentos de solda não profissionais;
- Classe C: dispositivos de iluminação;
- Classe D: equipamentos que tenham potência de entrada menor ou igual a 600 W - computadores e monitores, receptores de televisão, geladeiras e freezers que tenham ao menos um sistema de acionamento e controle de velocidade do compressor.

Os limites para emissão de correntes harmônicas são apresentados na Tabela 5, abaixo. É válido lembrar que estas correntes devem ser medidas na entrada dos equipamentos.

Tabela 5 - Limites para as componentes harmônicas de corrente por classe de equipamento - IEC 61000-3-2.

| Ordem h | Classes de equipamentos | | | |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|--|------------------------------|
| | A (limite harmônico em ampere - A) | B (limite harmônico em ampere - A) | C (limite harmônico em %) ^(a) | D (limite harmônico em mA/W) |
| 2 | 1,08 | 1,51 | 2,0 | — |
| 3 | 2,3 | 3,45 | 30 x FP ^(b) | 3,4 |
| 4 | 0,43 | 0,65 | — | — |
| 5 | 1,14 | 1,71 | 10,0 | 1,9 |
| 6 | 0,3 | 0,45 | — | — |
| 7 | 0,77 | 1,15 | 7,0 | 1,0 |
| 9 | 0,4 | 0,60 | 5,0 | 0,5 |
| 11 | 0,33 | 0,49 | 3,0 | 0,35 |
| 13 | 0,21 | 0,31 | 3,0 | 3,85/ h |
| Pares 8-40 | 0,23 x 8/ h | 0,52 x 8/ h | — | — |
| Impares 15-39 | 0,15 x 15/ h | 0,22 x 15/ h | 3,0 | 3,85/ h |

Fonte: adaptado de IEC61000-3-2, tabelas 1, 2 e 3 [25].

Nota: — sem informação.

(a) Porcentagem em relação à corrente de entrada na frequência fundamental.

(b) Fator de potência do equipamento.

Os harmônicos de corrente para os equipamentos da classe B devem ser limitados em 150% das recomendações impostas aos equipamentos de classe A, sendo os limites harmônicos para ambas as classes dadas em ampere (A). Já para os equipamentos da classe C, os limites harmônicos são dados em função da corrente de entrada na frequência fundamental, enquanto que para os equipamentos da classe D, os limites de corrente estão especificados em valores relativos à potência ativa do equipamento, que deve estar compreendida entre 75 W e 600 W.

Embora esta norma contemple a baixa tensão, a mesma cita valores de 220/380 V, 230/400 V, 240/415 V e não faz menção a valores abaixo de 220 V, por exemplo, 127 V fase-neutro. Ela ainda ressalta que a medição dos limites de correntes harmônicas deve ocorrer nas

fases, com exceção dos equipamentos monofásicos, os quais podem ser medidos através do neutro.

Além da classificação e limites, a IEC 61000-3-2 descreve procedimentos e métodos que devem ser seguidos para os testes, sendo estes descritos no capítulo 6 e anexos da mesma, os quais o autor sugere, para melhor compreensão e detalhes, a leitura na íntegra.

3.2.5 “*Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems. Basic EMC Publication*” - IEC 61000-3-6-2008

Esta norma, classificada como relatório técnico, tem como objetivo dar diretrizes para que sejam fornecidos serviços de qualidade entre o operador do sistema e os clientes a ele conectados. Portanto, são apresentados princípios que podem servir de base para determinar requisitos para a conexão de instalações com distorções harmônicas em sistemas de média, alta e extra-alta tensão. Sendo assim, [21] traz limites para emissão harmônica a serem observados na fase de planejamento para estes sistemas e são apresentados na Tabela 6.

Os limites de planejamento são dados em porcentagem da tensão fundamental, sendo eles mais rigorosos que os níveis de compatibilidade, que limitam a distorção total para média e alta tensão em 8%. A nível de projeto (planejamento) a distorção total não deve ultrapassar 6,5% para média tensão e 3% para alta e extra-alta tensão. Contudo, vale ressaltar que a norma IEC 61000-3-6 [21] apresenta limites de compatibilidade para baixa e média tensão referenciando a IEC 61000-2-2 e IEC 61000-2-12, portanto não são apresentados neste tópico.

A IEC 61000-3-6 [21] orienta que deve haver um período mínimo de medição de uma semana, devendo excluir dados inválidos e, portanto, recorrendo ao uso de tratamento estatístico: percentil 95% para registros de uma semana com período de integralização de 10 minutos e percentil 99% diário para período de integralização de 3 segundos.

Tabela 6 - Níveis indicativos para tensões harmônicas no planejamento (em porcentagem da tensão fundamental) de sistemas em MT, AT e EAT - IEC 61000-3-6.

| Harmônicos ímpares não múltiplos de 3 | | | Harmônicos ímpares múltiplos de 3 | | | Harmônicos pares | | |
|--|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|------------|----------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Ordem h | Tensão (%) | | Ordem h | Tensão (%) | | Ordem h | Tensão (%) | |
| | MT | AT e EAT | | MT | AT e EAT | | MT | AT e EAT |
| 5 | 5,0 | 2,0 | 3 | 4,0 | 2,0 | 2 | 1,8 | 1,4 |
| 7 | 4,0 | 2,0 | 9 | 1,2 | 1,0 | 4 | 1,0 | 0,8 |
| 11 | 3,0 | 1,5 | 15 | 0,3 | 0,3 | 6 | 0,5 | 0,4 |
| 13 | 2,5 | 1,5 | 21 | 0,2 | 0,2 | 8 | 0,5 | 0,4 |
| $17 \leq h \leq 49$ | $1,9 \times \frac{17}{h} - 0,2$ | $1,2 \times \frac{17}{h}$ | $21 < h \leq 45$ | 0,2 | 0,2 | $10 \leq h \leq 50$ | $0,25 \times \frac{10}{h} + 0,22$ | $0,19 \times \frac{10}{h} + 0,16$ |
| THD para MT = 6,5 % e THD para AT e EAT = 3% | | | | | | | | |

Fonte: IEC 61000-3-6, tabela 2 [21].

Para o período de integralização de 3 segundos deve-se multiplicar os níveis de planejamento individuais pelo fator k , apresentado na equação (3).

3.2.6 Procedimentos de Distribuição – PRODIST-M8 / ANEEL-2018

No cenário nacional, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL [26] através dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, em seu módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica) aborda os limites harmônicos de tensão aceitáveis com foco em sistemas de distribuição. Contudo, a mesma não faz menção quanto a limites para distorção harmônica de corrente, além de que após a sétima revisão do documento, deixou de trazer os limites harmônicos individuais de tensão, e abordando a distorção harmônica total através de categorias: distorção total para componentes pares não múltiplos de 3, ímpares não múltiplos de 3 e distorção total para componentes múltiplas de 3.

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais de tensão recomendados pelo PRODIST estão apresentados na Tabela 7, conforme a décima revisão do documento [26], que entrou em vigência em janeiro de 2018. Esta norma estabelece limites de

distorção harmônica através de indicadores estatísticos relacionados ao percentil 95% associado a 1008 registros provenientes de medições coletadas a cada 10 minutos dentro do intervalo de uma semana (168 hs).

Tabela 7 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental) - PRODIST-M8.

| Indicador | Tensão nominal | | |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------------|---|
| | $V_n \leq 1 \text{ kV}$ | $1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$ |
| DTT95% | 10,0 | 8,0 | 5,0 |
| DTT _p 95% | 2,5 | 2,0 | 1,0 |
| DTT _i 95% | 7,5 | 6,0 | 4,0 |
| DTT ₃ 95% | 6,5 | 5,0 | 3,0 |

Fonte: PRODIST-M8, 2018, tabela 2 [26].

Nota: DTT95% - Percentil 95% da distorção harmônica total.

DTT_p95% - Percentil 95% da distorção harmônica total para as componentes pares não múltiplas de 3.

DTT_i95% - Percentil 95% da distorção harmônica total para as componentes ímpares não múltiplas de 3.

DTT₃95% - Percentil 95% da distorção harmônica total para as componentes múltiplas de 3.

3.2.7 Procedimentos de Rede - ONS-2017

O Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS através do Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica [27] apresenta indicadores de desempenho relacionados à QEE e valores limites de referência, nos aspectos global e individual, com foco em sistemas de transmissão.

Em [27] são apresentados limites globais inferiores para a distorção de tensão harmônica individual, conforme valores indicados na Tabela 8. Contudo, os limites superiores são determinados pela multiplicação dos limites globais inferiores correspondentes pelo fator 4/3. Por exemplo, os limites globais superiores relativos aos indicadores de THD para $V < 69 \text{ kV}$ e $V \geq 69 \text{ kV}$ são, respectivamente, 8% e 4%.

Tabela 8 - Limites globais inferiores da distorção de tensão em porcentagem da tensão fundamental - ONS.

| Ordem h | DTHI, h ímpar | | Ordem h | DTHI, h par | |
|--------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|---------------|----------------|
| | Valor em % | | | Valor em % | |
| | $V < 69$ kV | $V \geq 69$ kV | | $V < 69$ kV | $V \geq 69$ kV |
| 3, 5, 7 | 5,0 | 2,0 | 2, 4, 6 | 2,0 | 1,0 |
| 9, 11, 13 | 3,0 | 1,5 | ≥ 8 | 1,0 | 0,5 |
| 15 a 25 | 2,0 | 1,0 | | | |
| ≥ 27 | 1,0 | 0,5 | | | |
| DTHTS95% = 6% para $V < 69$ kV | | | DTHTS95% = 3% para $V \geq 69$ kV | | |

Fonte: Adaptado de ONS, tabela 6 [27].

Nota: DTHI - Distorção de tensão harmônica individual.

DTHTS95% - Percentil 95% da distorção de tensão harmônica total.

O valor do indicador DTHTS95% a ser comparado com o valor padrão da Tabela 8 será obtido conforme procedimentos descritos abaixo, sendo as medições realizadas no PAC:

- Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de um dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos;
- O valor do indicador corresponde ao maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos.

Logo, para avaliar o desempenho da rede com relação à distorção harmônica de tensão, deve-se comparar os indicadores DTHI e DTHTS95% com os respectivos limites global e individual, sendo estes últimos apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Limites individuais para os indicadores DTHI e DTHTS95% - ONS.

| Ordem h | DTHI, h ímpar | | Ordem h | DTHI, h par | |
|--------------------------------|----------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------|
| | Valor em % | | | Valor em % | |
| | $13,8$ kV $\leq V < 69$ kV | $V \geq 69$ kV | | $13,8$ kV $\leq V < 69$ kV | $V \geq 69$ kV |
| 3 a 25 | 1,5 | 0,6 | Todos | 0,6 | 0,3 |
| ≥ 27 | 0,7 | 0,4 | | | |
| DTHTS95% = 3% para $V < 69$ kV | | | DTHTS95% = 1,5% para $V \geq 69$ kV | | |

Fonte: Adaptado de ONS, tabela 7 [27].

Nota: DTHI – Distorção de tensão harmônica individual.

DTHT95% - Percentil 95% da distorção de tensão harmônica total.

3.3.1 Quadro Comparativo – Limites Harmônicos

Com o intuito de facilitar a comparação entre os limites para distorção harmônica de tensão estabelecidos por cada norma abordada neste trabalho, a Tabela 10 traz os indicadores para à distorção harmônica total e para as componentes individuais.

Dentre as normas abordadas, que tratam dos limites de compatibilidade quanto à distorção harmônica de tensão, a IEC 61000-2-2 é a única que não menciona o local onde devem ocorrer as medições, além de apresentar os limites harmônicos de forma determinística. As demais normas (EN50160, IEEE Std 519, IEC 61000-3-6, ONS e PRODIST - módulo 8) recomendam que as medições sejam realizadas no ponto de acoplamento comum, além de estabelecerem limites usando abordagem probabilística a partir dos percentis diário e/ou semanal. Sendo assim, para as campanhas de medição de uma semana é permitido que até 5% dos registros fiquem fora dos limites estabelecidos, tendo como base o percentil 95%, por exemplo. Todavia, pode-se dizer que as recomendações europeias EN e IEC estão em conformidade com os limites estabelecidos para a qualidade da tensão que o proprietário e/ou operador do sistema deve fornecer nos terminais de suprimento do cliente. A IEC 61000-2-2 [24] e EN50160 [23] adotam os mesmos limites até a componente par de número 10 e até a 13ª componente, em termo das ímpares. Para as demais ordens os limites têm pequenas diferenças.

Cabe salientar que limites estabelecidos pela recomendação do ONS [27] são aplicáveis a sistemas de transmissão, não apresentando limites específicos para tensões comuns em sistemas de distribuição e industriais, por exemplo, 13,8 e 4,16 kV. Logo, esses níveis de tensão devem ser abordados na mesma classe, onde $V \leq 69$ kV. Em contrapartida, as outras recomendações assistidas apresentam número maior de classes de tensão, abordando de forma mais específica à baixa e média tensão.

Quanto aos limites para distorção harmônica de corrente, com exceção da IEC 61000-3-2 [25], que é específica para tal, a IEEE 519 [22] é a única que traz este tipo de recomendação. Todavia, assim como para os limites de tensão, as medições das distorções na corrente devem ocorrer no PAC, o que não permite comparar os limites desta norma com os impostos por [25], que avalia a distorção na entrada do equipamento. Além do mais, [22] traz estes limites divididos conforme diferentes níveis de tensão e com base na razão entre a corrente de curto e a corrente de carga no ponto de medição, limitando assim a emissão de harmônicos de corrente para cada cliente.

Diferentemente das demais recomendações, a IEEE519 [22] adota um único valor limite para todas as componentes individuais conforme a classe de tensão. Em contrapartida, o PRODIST [26] não menciona limites individuais e traz limites para distorção total, conforme a classificação da tensão e componentes individuais: múltiplos de 3, ímpares não múltiplos de 3 e pares não múltiplos de 3.

Tabela 10 - Resumo dos limites para harmônicos de tensão.

| Ordem h | EN50160 | IEC | | | IEEE 519 | | | | ONS | | PRODIST | | |
|-----------|----------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|--------------|-------------|----------------|---------------|-----------------|----------------------|
| | $V \leq 35$ kV | $V \leq 1$ kV ^(a) | $1 < V \leq 35$ kV ^(b) | $35 < V \leq 230$ kV ^(b) | $V \leq 1$ kV | $1 < V \leq 69$ kV | $69 < V \leq 161$ kV | $V > 161$ kV | $V < 69$ kV | $V \geq 69$ kV | $V \leq 1$ kV | $1 < V < 69$ kV | $69 \leq V < 230$ kV |
| 2 | 2 | 2 | 1,8 | 1,4 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 3 | 5 | 5 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 5 | 2 | | | |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 0,8 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 5 | 6 | 6 | 5 | 2 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 5 | 2 | | | |
| 6 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 7 | 5 | 5 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 5 | 2 | | | |
| 8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 9 | 1,5 | 1,5 | 1,2 | 1 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 3 | 1,5 | | | |
| 10 | 0,5 | 0,5 | 0,47 | 0,35 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 11 | 3,5 | 3,5 | 3 | 1,5 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 3 | 1,5 | | | |
| 12 | 0,5 | 0,46 | 0,43 | 0,32 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 13 | 3 | 3 | 2,5 | 1,5 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 3 | 1,5 | | | |
| 14 | 0,5 | 0,43 | 0,4 | 0,3 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | — | — | — |
| 15 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 16 | 0,5 | 0,41 | 0,38 | 0,28 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 17 | 2 | 2 | 1,7 | 1,2 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 18 | 0,5 | 0,39 | 0,36 | 0,27 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 19 | 1,5 | 0,2 | 1,5 | 1,07 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 20 | 0,5 | 0,37 | 0,35 | 0,25 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 21 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,2 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 22 | 0,5 | 0,36 | 0,33 | 0,25 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 23 | 1,5 | 0,2 | 1,2 | 0,89 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| 24 | 0,5 | 0,35 | 0,32 | 0,24 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 | | | |
| 25 | — | 0,2 | 0,1 | 0,82 | 5 | 3 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | | | |
| Total | 8 | 8 | 6,5 | 3 | 8 | 5 | 2,5 | 1,5 | 6 | 3 | 10 | 8 | 5 |

Fonte: do autor com base em [21, 22, 23, 24, 26 e 27].

Nota: (a) Indicadores conforme IEC 61000-2-2.

(b) Indicadores conforme IEC 61000-3-6.

— Sem informação.

3.4 Afundamentos de tensão

Mesmo com as melhorias ocorridas no setor elétrico nos últimos anos, principalmente no que diz respeito à transmissão e distribuição, o sistema elétrico é suscetível a falhas e anomalias, que variam de um local para outro, e têm efeitos diferenciados entre os consumidores. Desta forma, um equipamento pode sofrer mais ou menos comparado a outro que esteja no mesmo local onde ocorre um distúrbio: afundamento ou elevação de tensão, harmônico, transitório, interrupção, etc.

Além dos avanços no sistema elétrico, têm ocorrido melhorias no *design* dos equipamentos, tornando-os mais imunes aos efeitos da má qualidade da energia elétrica. Contudo, segundo [30], mesmo nos sistemas de energia mais desenvolvidos ocorrem variações de tensão periodicamente, sendo os afundamentos de tensão os mais predominantes, proporcionando grandes impactos aos clientes, principalmente as indústrias de alta tecnologia. Estes fenômenos indesejados podem trazer prejuízos desde a avaria de um equipamento, parada de todo um processo fabril, como a perda de produção em uma indústria, por exemplo.

Os afundamentos de tensão por vezes são pronunciados através dos termos em inglês, *sag* (*voltage sag*) e *dip* (*voltage dip*), sendo o primeiro empregado pelos grupos associados ao IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) e o segundo a IEC (*International Electrotechnical Commission*). Este evento consiste na redução de curta duração do sinal de tensão geralmente provocado por falhas no sistema, partida de cargas de grande potência, como motores de grande porte, por exemplo. Segundo Dugan et al [2], que está em conformidade com as recomendações da IEEE 1159-2009 [31], essa redução está compreendida entre 0,1 e 0,9 pu em um intervalo de 0,5 ciclo a 1 minuto. Portanto, é um fenômeno bidimensional, devendo ser avaliado em sua magnitude e duração.

A Figura 2 ilustra um afundamento de tensão em um sinal qualquer e a redução da amplitude do mesmo a partir da oscilografia. Também, são apresentados os tempos de descida

(t_d) e subida (t_s) que variam conforme a natureza do afundamento, tendo como exemplo a partida de um motor de grande porte em que t_d e t_s são relativamente maiores comparados ao tempo de descida e subida em um afundamento provocado por um curto circuito. No exemplo, a tensão residual foi de 60%, sendo esta a tensão mínima durante uma queda de tensão expressa em volts, porcentagem da tensão nominal ou em pu, com os valores obtidos, na maioria das vezes, a partir da tensão RMS [30].

Conforme [2], é comum a ocorrência de equívocos ao tratar da magnitude dos afundamentos de tensão, haja vista, ora ser expresso em porcentagem da tensão residual, ora da tensão nominal. Desta forma, neste trabalho os afundamentos serão relacionados à tensão nominal, portanto um afundamento “de” 40% em uma rede de 127 V corresponderá a uma queda de 50,8 V, permanecendo uma tensão residual de 76,2 V.

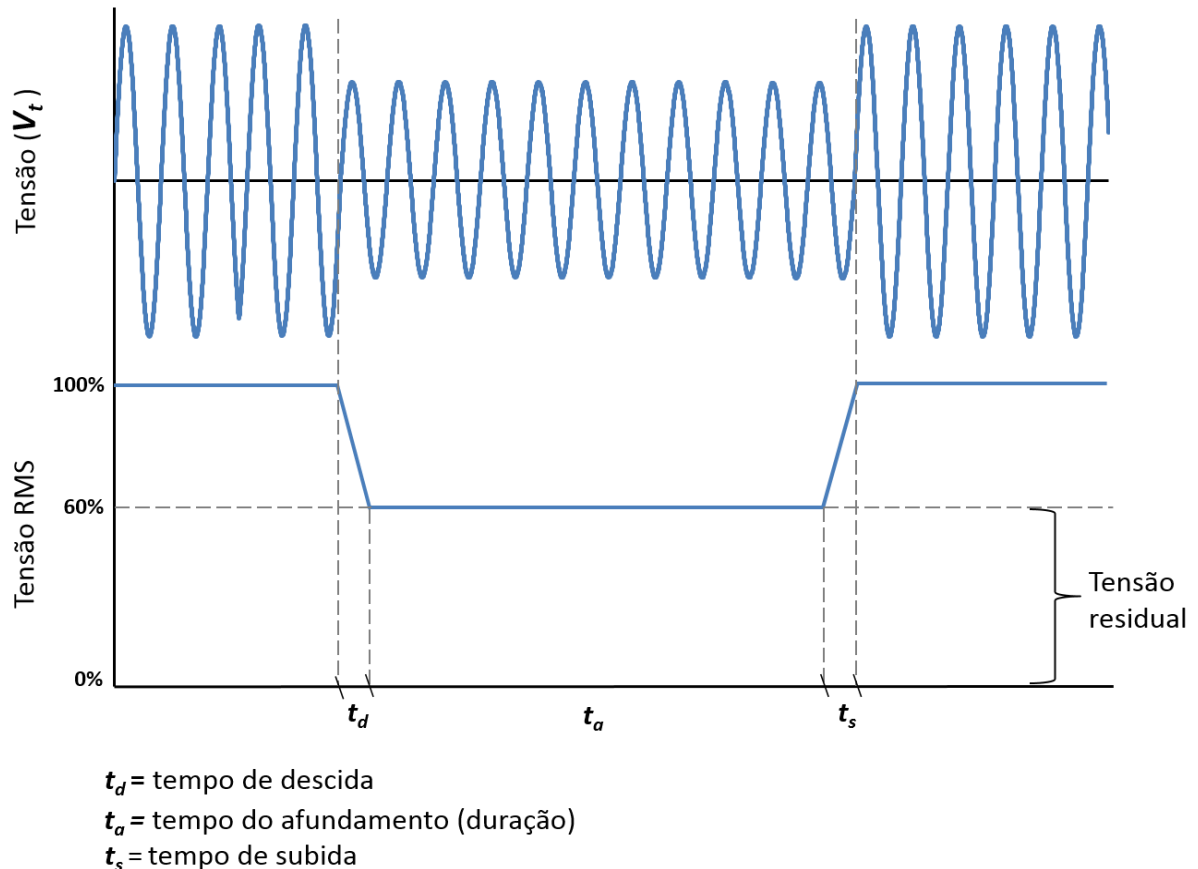


Figura 2 - Afundamento em porcentagem da Tensão Nominal: forma de onda e sinal RMS.

Para Dugan et al [2], assim como para [31], os afundamentos são variações de tensão de curta duração (VTCD), podendo ser classificados em três categorias a partir do tempo de duração: instantâneo, momentâneo e temporário, sendo a amplitude a mesma para as três classificações: entre 0,1 e 0,9 pu.

A Tabela 11 apresenta os valores de magnitude e tempo de duração dos afundamentos e as respectivas classificações apresentadas em [2] e [31].

Tabela 11- Classificação e características dos afundamentos de tensão.

| Classificação | Duração | Amplitude |
|---------------|-----------------|--------------|
| Instantâneo | 0,5 – 30 ciclos | 0,1 – 0,9 pu |
| Momentâneo | 30 ciclos – 3 s | 0,1 – 0,9 pu |
| Temporário | 3 s – 1 min | 0,1 – 0,9 pu |

Fonte: adaptado de [2] e [31], tabelas 2.2 e 2, respectivamente.

As variações de tensão de curta duração (afundamentos, elevações e interrupções), que são muitas vezes provocadas por falhas no sistema elétrico, têm magnitude e duração diretamente relacionadas ao local onde ocorreu a falha, as condições do sistema no momento e atuação dos dispositivos destinados à proteção da rede. Logo, a classificação das VTCDs em instantâneo, momentâneo e temporário corresponde aos tempos de operação típicos dos dispositivos de proteção empregados no sistema elétrico, assim como às divisões de durações recomendadas por organizações técnicas internacionais [2]. Essa premissa corroborou com a metodologia de testes relacionados à aplicação de afundamentos de tensão nos dispositivos avaliados, estando esta descrita a posteriori.

Assim como ocorre para as distorções harmônicas em que há normas e recomendações a respeito, também ocorre o mesmo para o fenômeno afundamento de tensão. Desta forma, essas normas e recomendações vêm para contribuir com o planejamento das redes e sistemas elétricos, assim como para avaliar e conhecer a imunidade/sensibilidade de

equipamentos, a fim de que os mesmos sejam compatíveis e mais resistentes aos possíveis distúrbios que possam ocorrer no ambiente em que estejam operando. Nesta vertente, os tópicos a seguir apresentam de forma simplificada recomendações que vão ao encontro desta premissa e contribuem com este trabalho.

3.3.1 CBEMA, ITI e SEMI-F47

Na década de 1970 a Associação de Fabricantes de Equipamentos para Empresas de Computação – CBEMA (do inglês, *Computer and Business Equipment Manufacturers Association*) desenvolveu padrões que abordavam o perfil de desempenho de equipamentos de informática, e uma ferramenta bastante conhecida e utilizada foi à curva CBEMA. Segundo [2], a curva CBEMA é um conjunto de curvas que representam a imunidade de computadores em termos de magnitude e duração do distúrbio de tensão.

A finalidade da curva CBEMA era avaliar o perfil de desempenho de equipamentos de informática, como computadores da época (*mainframes* hoje indisponíveis), porém passou a ser utilizada até mesmo para avaliação de outros dispositivos e sistemas elétricos, na qual seus eixos representam a magnitude e a duração do evento.

A Figura 3 representa a curva CBEMA em seu formato mais utilizado, já que segundo [2], a curva superior é originalmente definida até 0,001 ciclos, chegando ao valor aproximado de 375 por cento de tensão. A área delimitada pelas duas curvas compreende a região na qual o computador estaria imune. Portanto, abaixo desta, está compreendido eventos como afundamentos de tensão, e um dispositivo poderia desligar devido à falta de energia. Pontos acima da curva superior estão relacionados à elevações de tensão (*swell*), que podem ocasionar avarias nos equipamentos devido a falhas no isolamento, por exemplo.

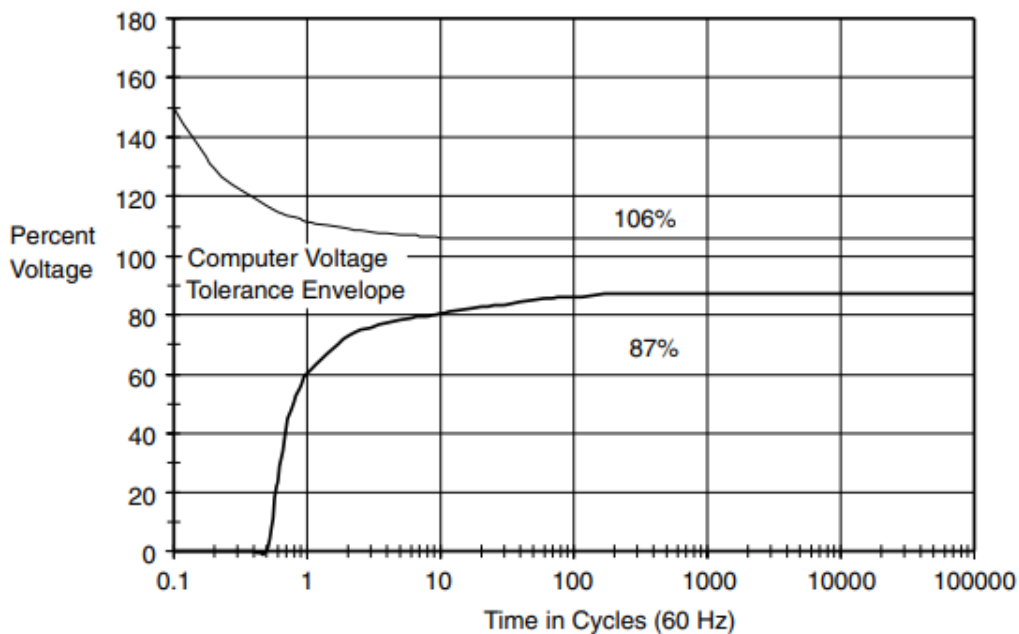


Figura 3 - Porção da curva CBEMA usada para designação de equipamentos [2].

Em 1994 a associação CBEMA sofreu uma reestruturação e renomeação passando a Conselho da Indústria de Tecnologia da Informação (*Information Technology Industry Council - ITI*), assim a curva CBEMA também foi reformulada e passou a ser denominada curva ITI. Sua aplicação para sistemas em 120 V, 60 Hz também apresenta três regiões como observado na Figura 4, em que a região delimitada pelas duas curvas compreende pontos na qual o equipamento de teste pode operar corretamente. Conforme [32], a região proibida (*Prohibited Region*) seria a mais danosa ao equipamento, haja vista ser delimitada pelos limites superiores de tensão. Já a região sem danos (*No Damage Region*) inclui quedas severas com tensões menores que o limite inferior da faixa de tolerância. Nesta condição o equipamento pode não funcionar corretamente, contudo espera-se que não ocorra nenhum dano.

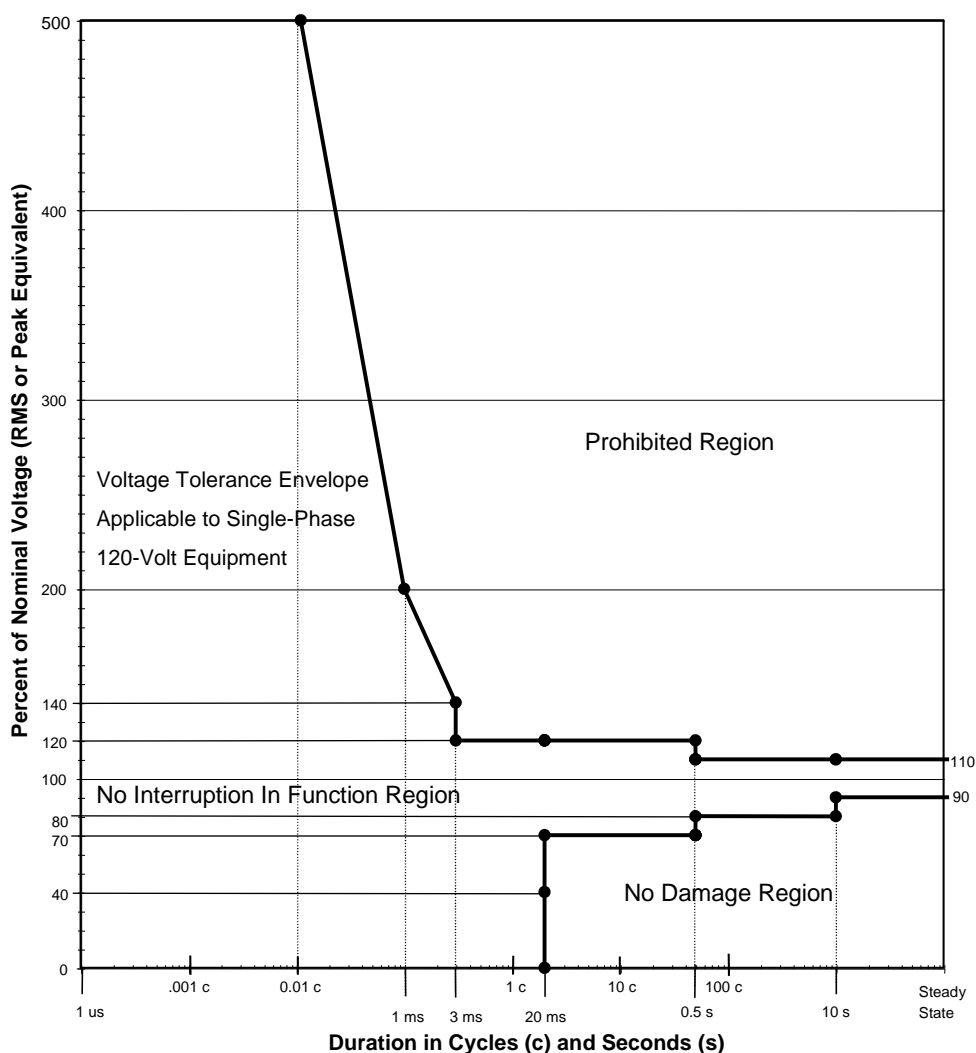


Figura 4 - Curva ITI (revisada em 2000) [32]

Conforme Dugan et al [2], devido aos impactos econômicos associados à sensibilidade dos equipamentos a quedas de tensão, em especial nas indústrias de produção de semicondutores, surgiu a necessidade de novos padrões para que os equipamentos superassem estes eventos. A partir dessa instância, no ano de 2000 foram criadas especificações para imunidade à quedas de tensão de equipamentos envolvidos no processo de fabricação de semicondutores, conhecidas através da SEMI F-47 (*Specification for Semiconductor Process Equipment Voltage Sag Immunity*). Embora esta especificação defina requisitos mínimos de

imunidade à queda de tensão para equipamentos usados na indústria de semicondutores, também inclui equipamentos térmicos, de metrologia, equipamento de testes automatizados, de polimento, fontes de alimentação, geradores de radiofrequência e ultrassom, computadores e sistemas de comunicação, bobinas de contadores e relés, etc. [33].

Segundo [33], em 2006 a original SEMI F-47-0200 passou a denominação de SEMI F-47-0706, com esta atualização os testes de conformidade deixaram de ser analisados através de uma curva e passando a serem avaliados através de três pontos, na qual o equipamento sob teste é considerado aprovado ou reprovado mediante os afundamentos de tensão. Desta forma, é verificado se o equipamento funciona normalmente durante e após os testes, se é necessária alguma intervenção para que o mesmo retome o ciclo de operação, ou se o equipamento sofreu alguma avaria.

A Tabela 12 traz os valores que configuram os três pontos de teste a partir da duração e magnitude do evento, e que estão representados graficamente através da Figura 5.

Tabela 12 - Quedas de tensão necessárias para os testes de imunidade em por cento da tensão nominal - SEMI-F47-0706.

| Tensão residual | Duração em 50 Hz | Duração em 60 Hz |
|-----------------|------------------|------------------|
| 50% | 10 ciclos | 12 ciclos |
| 70% | 25 ciclos | 30 ciclos |
| 80% | 50 ciclos | 60 ciclos |

Fonte: [33], tabela 1.

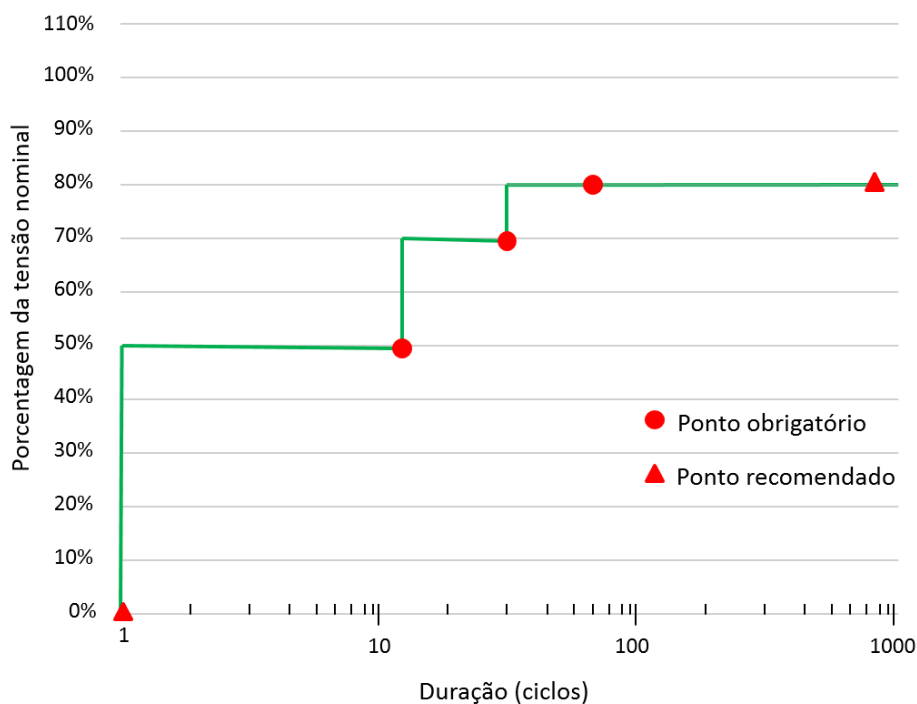


Figura 5 - Curva SEMI F47-0706 (adaptado de 33).

3.3.2 “Testing measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variation immunity tests” – IEC 61000-4-11-2004

A IEC 61000-4-11-2004 [34] define metodologias de testes a fim de estabelecer referências comuns para avaliar a imunidade de equipamentos eletroeletrônicos conectados a redes de baixa tensão em 50 Hz ou 60 Hz e que tenham corrente de entrada inferior a 16 amperes, estando estes submetidos a variações de tensão, curtas interrupções e afundamentos de tensão (*dips*). Para [34], os afundamentos de tensão são tratados como distúrbios eletromagnéticos bidimensionais determinados pela tensão e tempo (duração), portanto definidos como uma redução repentina da tensão em um ponto específico de um sistema de suprimento de energia elétrica abaixo de limites especificados, seguida de sua recuperação após um breve intervalo de tempo.

Conforme [34], a tensão a ser aplicada nos testes deve ser ajustada em consonância a tensão nominal do equipamento, sendo que para aqueles que têm uma faixa maior do que 20%

entre o valor mínimo e o máximo, os testes devem ser realizados nas duas faixas de tensão. Logo, como exemplo, equipamentos “bivolts” com tensão de alimentação entre 115 V a 240 V, diferença de aproximadamente 48%, devem ser submetidos a testes com estes dois níveis de tensão, que deverão chegar à tensão residual de 0%, 40%, 70% e 80%.

Embora a IEC 61000-4-11 mencione tensão residual de 0%, a mesma informa que, na prática, tensões residuais de 0% a 20% são consideradas interrupções totais, e os níveis para os testes propostos são apresentados na Tabela 13. É válido lembrar que também recomenda-se que os afundamentos sejam iniciados em zero grau e que seja dado um intervalo mínimo de 10 segundos entre um evento e outro.

Tabela 13 - Nível e duração propostos para testes de afundamentos de tensão - IEC 61000-4-11.

| Classe | Nível e duração dos testes para afundamentos de tensão em 50/60 Hz | | | | |
|-----------------------|--|--------------------|---------------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Classe 1 | Caso a caso conforme requisitos do equipamento | | | | |
| Classe 2 | 0% durante ½ ciclo | 0% durante 1 ciclo | 70% durante 25/30 ^b ciclos | | |
| Classe 3 | 0% durante ½ ciclo | 0% durante 1 ciclo | 40% durante 10/12 ciclos | 70% durante 25/30 ciclos | 80% durante 250/300 ciclos |
| Classe X ^a | X | X | X | X | X |

Fonte: IEC 61000-4-11, tabela 1 [34].

Nota: a) a ser definido por comitê próprio para equipamentos conectados à rede pública, na qual o nível não deve ser menor do que para a classe 2.

b) 25/30 ciclos significa 25 ciclos para 50 Hz e 30 ciclos para teste em 60 Hz.

As classes referidas na tabela acima são apresentadas no anexo B de [34], sendo a classe 1 compreendida por equipamentos muito sensíveis, como aqueles relacionados a instrumentação de laboratórios, alguns equipamentos de proteção e automação e computadores. Já a classe 2 é aplicada a medições no ponto de acoplamento comum de sistemas consumidores (distribuição, por exemplo) e nos ambientes industriais. A classe 3

compreende apenas ambientes industriais e em especial aqueles que utilizam conversores para alimentar cargas, máquinas de solda, grandes motores com frequentes acionamentos e outras cargas que variam muito rápido.

Os resultados dos testes devem ser classificados quanto à perda de alguma função ou avaria, sendo recomendado as seguintes classificações:

- a) Funcionamento normal;
- b) Perda temporária da função ou redução da performance até cessar o evento dispensando intervenção;
- c) Perda temporária da função ou redução da performance necessitando de intervenção;
- d) Perda temporária da função ou redução da performance sem recuperação devido a danos ocorridos.

A IEC ainda sugere o que deve ser apresentado nos relatórios de testes, a exemplo das especificações mínimas que gerador dos eventos (fonte programável) deve ter e os circuitos elétricos e esquemas de montagem a serem utilizados nos testes. Todavia, o autor sugere ao leitor a apreciação do documento na íntegra para maiores detalhes.

3.3.3 “*IEEE Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V*” - IEEE 1668-2017

IEEE Std 1668-2017 [30] engloba um conjunto de recomendações para testes de conformidade e desempenho de equipamentos elétricos e eletrônicos conectados a sistemas de energia de baixa tensão (1000 V) sujeitos a quedas de tensão e conseqüentemente terem mau funcionamento, desligar-se ou sofrerem avarias. O documento aborda conteúdo teórico a cerca de fundamentos trazendo exemplos práticos e com isso define requisitos mínimos de

imunidade à queda de tensão e procedimentos de testes visando refletir ambientes elétricos reais.

Diferente de [34], a IEEE 1668 apresenta limites em sua definição para afundamentos de tensão: “redução entre 0,1 e 0,9 pu da tensão eficaz em qualquer uma ou todas as fases do sistema de alimentação com duração de 0,5 ciclo a 1 minuto” (tradução nossa). Ela também afirma que a sensibilidade dos dispositivos é determinada por dois fatores majoritários: *design* do equipamento (projeto) e características físicas do afundamento (ponto na qual o afundamento inicia, por exemplo). Vale ressaltar que [30] adota uma classificação para os afundamentos quanto ao número de fases envolvidas, e que é levada em consideração para a aplicação dos testes de imunidades em equipamentos:

- Afundamento do tipo I - ocorre entre fase e terra;
- Afundamento do tipo II - ocorre entre duas fases;
- Afundamento do tipo III - ocorre com a mesma magnitude nas três fases.

A Tabela 14 e Tabela 15 apresentam as magnitudes e durações recomendadas para execução de testes de afundamentos do tipo I, II e III, respectivamente.

Tabela 14 - Pontos de teste recomendados para afundamentos de tensão do Tipo I e II – IEEE 1668-2017.

| Ponto mínimo de teste | Tensão residual | Duração em segundos | Duração em 50 Hz | Duração em 60 Hz |
|-----------------------|-----------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1 | 50% | 0,2 | 10 ciclos | 12 ciclos |
| 2 | 70% | 0,5 | 25 ciclos | 30 ciclos |
| 3 | 80% | 2,0 | 100 ciclos | 120 ciclos |

Fonte: IEEE 1668, tabela 10 [30].

Tabela 15 - Pontos de teste recomendados para afundamentos de tensão do Tipo III – IEEE 1668-2017.

| Ponto mínimo de teste | Tensão residual | Duração em segundos | Duração em 50 Hz | Duração em 60 Hz |
|-----------------------|-----------------|---------------------|------------------|------------------|
| 1 | 50% | 0,05 | 2,5 ciclos | 3 ciclos |
| 2 | 70% | 0,1 | 5 ciclos | 6 ciclos |
| 3 | 80% | 2,0 | 100 ciclos | 120 ciclos |

Fonte: IEEE 1668, tabela 11 [30].

Esses testes de compatibilidade são similares aos propostos por [33] e [34], em que a partir de poucos pontos é possível verificar a imunidade de equipamentos frente a afundamentos de tensão típicos em uma rede elétrica real. A representação gráfica para os testes para afundamentos do tipo I e II é ilustrada na Figura 6.

A classificação quanto à imunidade do equipamento assistido deve ser realizada durante e após os testes através de critérios básicos de desempenho, tais como se o equipamento opera normalmente, ou se funciona de forma inadequada. Para tal, deve se levar em consideração os seguintes aspectos:

- a) Equipamento opera normalmente: não sofre avaria e os sinais de saída permanecem normais;
- b) Equipamento se auto recupera: apresenta variação nos sinais de saída, mas se recupera e reinicia sozinho;
- c) Recuperação assistida: o equipamento não executa corretamente as funções, sinais de saída fora dos limites e geralmente precisa de intervenção para reiniciar.

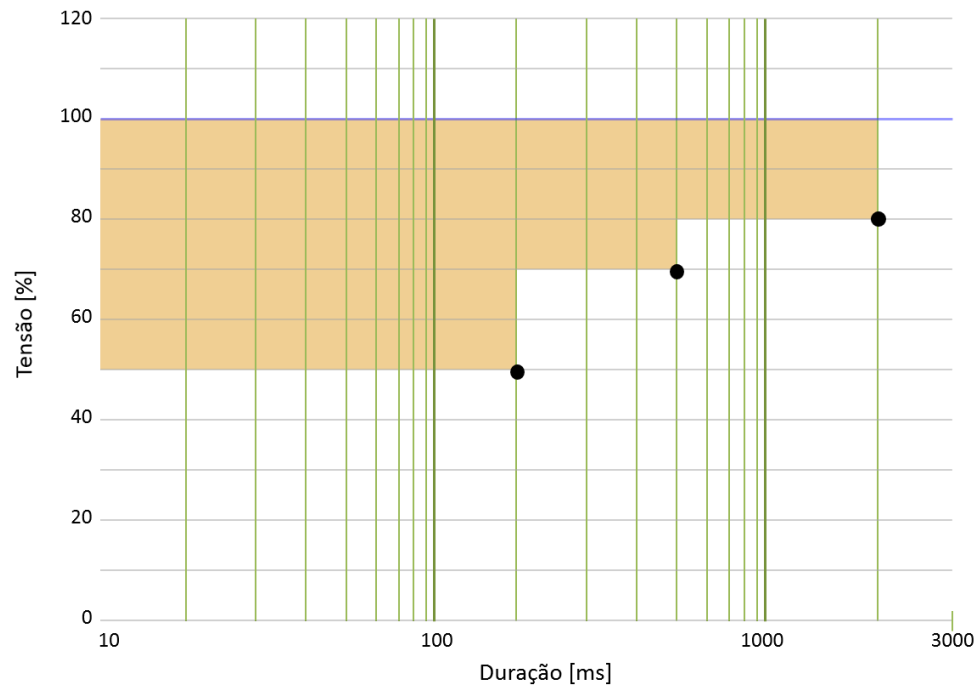


Figura 6 - Níveis recomendados para testes de afundamentos do Tipo I e Tipo II, adaptado de [30].

A IEEE 1668-2017 afirma que podem ser utilizados vários métodos para caracterizar o desempenho do equipamento em relação às quedas de tensão. Contudo, os mesmos podem depender do local e quanto da disponibilidade para realização, haja vista, alguns serem baseados em séries de testes que podem ser repetidos até o mau funcionamento do equipamento, quando o próximo ciclo de teste sucessivo é conduzido, assim dispendendo tempo considerável. Todavia, [30] apresenta três métodos básicos de caracterização que podem ser utilizados para determinar o desempenho permanente de equipamentos (curva de suportabilidade):

- *Top-down* – Para cada etapa deve-se manter a duração da queda constante e reduzir a magnitude até o mínimo estabelecido. No entanto, entre uma etapa e outra, o tempo de duração do afundamento é reduzido, repetindo para as mesmas magnitudes. Graficamente este método está associado à variação da magnitude, ou seja, do eixo das ordenadas, portanto, iniciando em um valor alto, localizado na parte de cima, para um valor inferior na parte de baixo do eixo Y.

- *Left-right* – Para cada etapa mantém-se a magnitude constante aumentando o tempo de duração de cada afundamento de um mínimo até o máximo pré-estabelecidos. A cada etapa seguinte a magnitude é reduzida e repetida para cada intervalo de tempo. Desta forma, para este método a variação ocorre da esquerda para a direita no eixo X (abscissa) em sua representação cartesiana.
- *Box-in* – Assemelha-se ao método *top-down*, contudo possibilita realizar menos testes, pois se em uma das etapas ocorre falha do equipamento, a próxima inicia a partir do momento em que ocorreu a falha.

Os principais parâmetros para o desenvolvimento dos três métodos estão listados abaixo, implicando que a combinação dos mesmos resulta em até 126 pontos de testes (18 passos para magnitude e 7 passos para duração).

- Magnitude máxima: 85%;
- Magnitude mínima: 0%;
- Duração máxima: 2 s;
- Duração mínima: 0,02 s;
- Passo da magnitude: 5%;
- Durações: 2 s; 1 s; 0,5 s; 0,2 s; 0,1 s; 0,05 s e 0,02 s.

Essa prática recomendada, assim como ocorre em [34], também sugere requisitos de certificação e relatório de teste, incluindo a caracterização da fonte geradora de sinais.

3.3.4 Procedimentos de Distribuição – PRODIST-M8 / ANEEL-2018

O PRODIST-M8-2018 [26] classifica os afundamentos de tensão como variações de tensão de curta duração (VTCD), que são desvios significativos na amplitude do valor eficaz

da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Desta forma, os afundamentos podem ser denominados de momentâneos (AMT), quando sua variação é maior ou igual a um ciclo e inferior a três segundos, ou afundamento temporário (ATT), se a variação for maior que três segundos e inferior a três minutos. Para ambas as denominações a amplitude da tensão deve ser superior ou igual a 0,1pu e inferior a 0,9 pu.

No caso de [26] não são feitas sugestões para avaliação da imunidade de equipamentos a partir de testes, mas são estabelecidos limites e/ou valores de referência, assim como a metodologia necessária para campanhas de medição a serem realizadas nas instalações de clientes atendidos por microssistemas isolados de geração e distribuição de energia elétrica (MIGDI) e sistemas individuais de geração de energia elétrica com fontes intermitentes (SIGFI). Desta forma, o registro dos eventos de VTCD, em termos de duração e amplitude, deve ser realizado conforme estratificação apresentada na Figura 7 após uma semana de medição ao totalizar 1008 registros válidos, de acordo com critérios de expurgo definidos em [26].

| Amplitude (pu) | Duração | | | | | | |
|-------------------|------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | [16,67 ms - 100 ms] | (100 ms - 300 ms] | (300 ms - 600 ms] | (600 ms - 1 seg] | (1 seg - 3 seg] | (3 seg - 1 min] | (1 min - 3 min) |
| > 1,15 | REGIÃO H | | | REGIÃO I | | | |
| (1,10 - 1,15] | | | | | | | |
| (0,85 - 0,90] | REGIÃO A | | | REGIÃO G | | | |
| (0,80 - 0,85] | | | | | | | |
| (0,70 - 0,80] | REGIÃO B | REGIÃO D | | REGIÃO F | | | |
| (0,60 - 0,70] | | | | | | | |
| (0,50 - 0,60] | REGIÃO C | REGIÃO D | | REGIÃO F | | | |
| (0,40 - 0,50] | | | | | | | |
| (0,30 - 0,40] | REGIÃO E | | | REGIÃO F | | | |
| (0,20 - 0,30] | | | | | | | |
| (0,10 - 0,20] | | | | | | | |
| < 0,10 | REGIÃO E | | | REGIÃO F | | | |
| | | | | | | | |

Figura 7 - Estratificação das VTCD com base nos níveis de sensibilidade das diversas cargas [26].

As nove regiões de sensibilidade vistas na Figura 7 devem ser utilizadas para correlacionar a importância de cada evento associado à variação de tensão de curta duração com os níveis de sensibilidade das diferentes cargas conectadas aos sistemas de distribuição,

em média e alta tensão. Para caracterizar a severidade da incidência dos eventos de VTCD, o PRODIST lança mão do fator de impacto, que é calculado conforme equação (4), após a obtenção de registros correspondentes a trinta dias consecutivos e em concordância aos parâmetros da Tabela 16.

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times fp_i)}{FI_{BASE}} \quad (4)$$

f_{ei} = frequência de ocorrência de eventos de VTCD, apuradas em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I ;

fp_i = fator de ponderação para cada região de sensibilidade i , estabelecido de acordo com a relevância do evento, correlacionando sua amplitude e duração;

FI_{BASE} = Fator de Impacto Base, obtido do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências máximas de ocorrência em um período de 30 (trinta) dias de VTCD para cada região de sensibilidade.

Tabela 16 - Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base conforme tensão nominal – PRODIST-M8.

| Região de sensibilidade | Fator de ponderação (fp) | Fator de Impacto Base (FI_{BASE}) | |
|-------------------------|------------------------------|--|---|
| | | $1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$ | $69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$ |
| <i>A</i> | 0,00 | | |
| <i>B</i> | 0,04 | | |
| <i>C</i> | 0,07 | | |
| <i>D</i> | 0,15 | | |
| <i>E</i> | 0,25 | 2,13 | 1,42 |
| <i>F</i> | 0,36 | | |
| <i>G</i> | 0,07 | | |
| <i>H</i> | 0,02 | | |
| <i>I</i> | 0,04 | | |

Fonte: PRODIST-M8, tabela 11 [26].

Para [26] as variações de tensão de curta duração devem ser caracterizadas a partir da agregação da amplitude e duração, na qual eventos simultâneos são agregados como um só no

mesmo ponto de medição (agregação de fases). Eventos consecutivos compreendidos em um intervalo de até três minutos também devem ser agregados como um só (agregação temporal). Para a agregação de fases deve ser realizado o critério de união das fases, em que a duração do evento é definida como o intervalo de tempo entre o instante em que o primeiro dos eventos ultrapassa determinado limite e o instante em que o último dos eventos retorna para o limite pré-estabelecido. Para tanto, podem ser utilizadas formas alternativas de agregação de fases, como:

- Agregação por parâmetros críticos - a duração é definida a partir do evento de maior duração entre os três eventos e o valor de pior magnitude com relação à referência;
- Agregação pela fase crítica - a duração do evento é definida com base na pior magnitude (amplitude mínima).

3.3.5 Breve comparativo entre as recomendações apresentadas

Todas as recomendações apresentadas têm aspectos particulares que fazem com que sejam utilizadas em casos específicos, ou seja, conforme a necessidade do teste/avaliação. Como visto, a curva ITI é uma evolução da curva CBEMA, ambas destinadas à avaliação de desempenho e imunidade de equipamentos de TI, portanto equipamentos ligados à rede de baixa tensão, em específico 120 V, 50/60 Hz, ponto que traz discussões, pois muitas vezes essas práticas são utilizadas de forma genérica e sem as adequações necessárias ao serem empregadas a outros níveis de tensão, conforme visto em [16]. De forma similar ocorre com a curva SEMI, que surgiu posteriormente as duas primeiras e embora seja destinada à avaliação de equipamentos associados a indústria de semicondutores, abrange uma gama maior de equipamentos assistidos, pois além de serem utilizados nas fabricas de semicondutores também tem função em outros ramos.

A curva SEMI se assemelha as curvas apresentadas em [30] e [34], porém não apresenta uma linha superior e outra inferior formando uma “região segura” como ocorre na CBEMA e ITI. Assim, [30], [33] e [34] são específicas a testes de afundamentos de tensão, não englobando a avaliação de equipamentos frente a elevações de tensão (*swell*). Estas são fundamentadas em pelo menos três pontos no plano cartesiano compreendido pelas dimensões duração e magnitude, e embora [30] trace uma linha superior no limite de 100%, ou seja, correspondendo à tensão nominal, ela não informa se o equipamento está sujeito a avarias se for submetido a um sinal que esteja a qualquer ponto acima desta linha limite superior.

A Tabela 17 apresenta o tempo e magnitude para os três pontos mínimos propostos pela SEMI-F47, IEC 61000-4-11 e IEEE 1668 para sistemas em 60 Hz. Contudo, vale lembrar que embora o intuito dessa tabela seja facilitar a comparação entre elas, tendo em vista o uso de forma genérica das três recomendações, os testes apresentados são para avaliação da imunidade de equipamentos distintos. Para a IEC 61000-4-11, por exemplo, os testes apresentados são para equipamentos de ambientes industriais compreendidos pela classe 3, conforme exposto no tópico correspondente, enquanto a SEMI-F47 aborda equipamentos envolvidos na indústria de semicondutores.

Tabela 17 - Comparação entre magnitude e duração propostas pela SEMI-F47, IEC 61000-4-11 e IEEE1668.

| Teste | SEMI-F47 | | IEC 61000-4-11 | | IEEE 1668 | |
|-------|-----------------|-----------|-----------------|------------|-----------------|------------|
| | Tensão residual | Duração | Tensão residual | Duração | Tensão residual | Duração |
| 1 | 50% | 12 ciclos | 40% | 12 ciclos | 50% | 12 ciclos |
| 2 | 70% | 30 ciclos | 70% | 30 ciclos | 70% | 30 ciclos |
| 3 | 80% | 60 ciclos | 80% | 300 ciclos | 80% | 120 ciclos |

Fonte: do autor com base em [30], [33] e [34].

Assim como a IEEE 1668, a IEC 61000-4-11 também propõe testes a equipamentos cuja alimentação esteja compreendida pela baixa tensão (1 kV). Contudo, a mesma também limita os equipamentos a serem avaliados quanto a corrente de entrada, que deve ser no máximo 16 A. Em contrapartida, o PRODIST, que não visa avaliar o desempenho e/ou imunidade de equipamentos, mas avaliar as redes elétricas a partir de indicadores, estabelece que seus critérios são válidos para redes de média e alta tensão (1 kV a 230 kV). Neste viés, as curvas CBEMA, ITI e SEMI e as recomendações de [30] e [34] contribuem desde os projetos de equipamentos quanto à aquisição dos mesmos, assim com fabricantes e consumidor final. A norma nacional contribui com os clientes usuários de energia elétrica, haja vista, as concessionárias e distribuidoras terem que atender os requisitos mínimos de forma a garantir a qualidade da energia elétrica entregue, neste caso com relação aos afundamentos de tensão.

Embora a IEEE1668 seja composta por recomendações descritas em conjunto a um considerável conteúdo teórico e detalhes quanto aos procedimentos de testes, a mesma não informa qual é o tempo mínimo a ser adotado entre um teste e outro no caso dos testes “*top-down*”, “*left-right*” e “*box-in*”, assim como não aborda em que ângulo se deve iniciar o afundamento. Diferentemente, [34] diz que deve haver um tempo mínimo de 10 segundos entre um teste e outro, além de que os afundamentos devem ser aplicados na passagem pelo zero grau. Outra postura diferente entre as duas recomendações é com relação a testes com equipamentos “*bivolts*”: para [34] os testes devem ser realizados para os dois níveis de tensão, caso a diferença entre eles seja superior a 20%, já [30] diz que a avaliação deve ocorrer de forma a contemplar o pior cenário para um afundamento de tensão, portanto na menor faixa de alimentação do equipamento.

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, as recomendações pertinentes a testes de equipamentos são mais apropriadas a servirem de alicerce ao mesmo. Desta forma, os testes

desenvolvidos com relação a fundamentos de tensão e que estão descritos em tópico específico (capítulo 4) foram fundamentados em [30], a partir de experimentos com três pontos. Logo, as demais recomendações abordadas são pouco e/ou não comentadas do decorrer do trabalho.

3.4 Fontes de alimentação: CA-CC

Os equipamentos eletroeletrônicos vêm sendo amplamente utilizados ano após ano em todos os setores: residencial, industrial, comercial, hospitalar etc. Dentre eles, os computadores (*desktops*, *notebooks* e *tablets*) têm reconhecido destaque quanto ao uso, haja vista, as diversas necessidades relacionadas às tecnologias da informação e comunicação despendidas pela atual sociedade. Através de pesquisa realizada pela Fundação Getúlio Vargas [35] é possível verificar o crescimento, quanto ao uso de computadores e celulares (*smartphones*) no Brasil, assim como a grande quantidade destes, além de televisores e telefones por habitante no período de maio de 2019.

A Figura 8 mostra o crescimento de computadores em uso no Brasil desde 1988, com estimativa de 216 milhões de computadores entre os anos de 2022 e 2024.

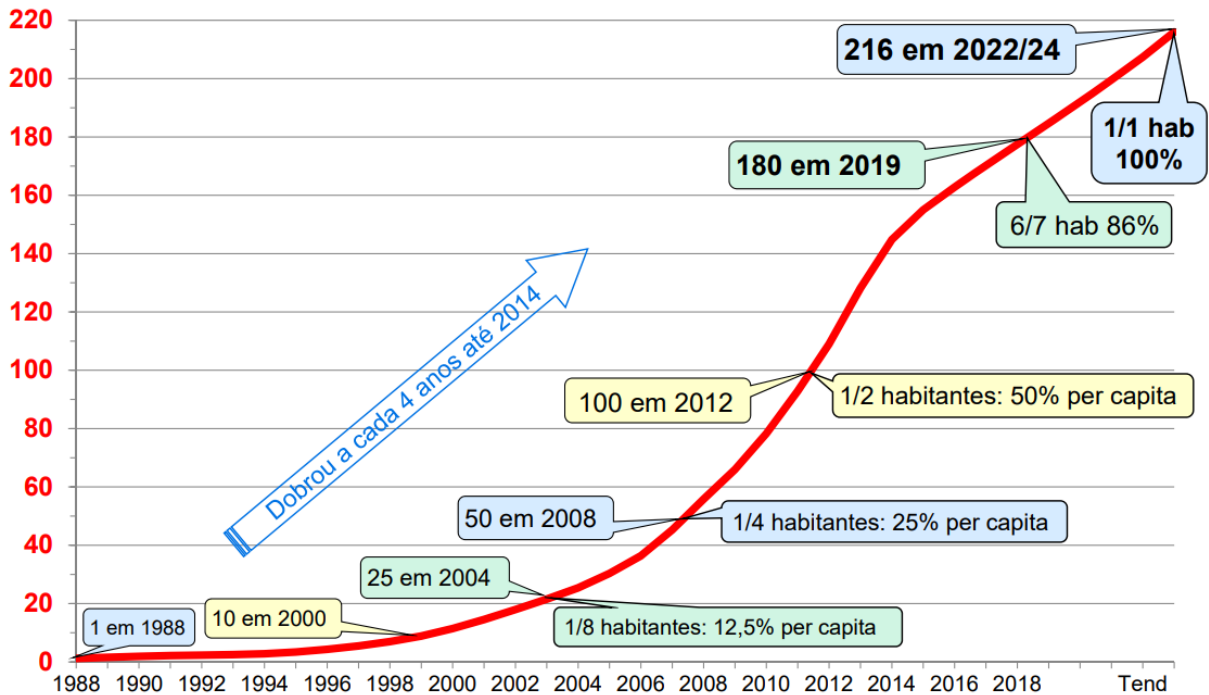


Figura 8 - Total de computadores em uso no Brasil em milhões de unidades [35].

Tendo em vista o crescimento no uso destes equipamentos, pode-se afirmar que há um aumento no uso de fontes de alimentação, haja vista, a maioria deles necessitar de adequação no sinal de entrada dos circuitos, que são geralmente em sinal contínuo (CC). Logo, considerando a grande empregabilidade de fontes de alimentação em computadores, além de variados e inúmeros equipamentos utilizados no dia a dia, verifica-se a notoriedade no uso de fontes como objeto de teste (OT) deste trabalho.

Segundo Mohan, Undeland e Robbins [36], a maioria das fontes devem atender algumas condições, como tensão de saída regulada (constante), canal de entrada eletricamente isolado do canal de saída e possibilidade de múltiplos sinais de saída isolados uns dos outros. Contudo, com o passar do tempo, as fontes vem evoluindo e outros requisitos tornaram-se fundamentais: dimensão, peso e eficiência. Estas características são bastante evidentes quando se compara as fontes conhecidas como linear e sua sucessora, as fontes chaveadas, mesmo retratando dispositivos de mesma potência.

Em uma fonte linear, para que haja isolamento entre o canal de entrada e saída, e o último esteja na faixa de tensão desejada, é necessário o uso de um transformador de baixa

frequência (50 ou 60 Hz, dependendo da frequência da rede). Este transformador, que fica na entrada do circuito das fontes lineares, geralmente é robusto e pesado, o que foge aos atuais requisitos de interesse na construção de fontes de alimentação.

A Figura 9 ilustra o diagrama esquemático de uma fonte linear, onde em série à saída do transformador, após a retificação do sinal, é utilizado um transistor, que age como um resistor variável, atuando na regulação da tensão de saída para que esta permaneça estável.

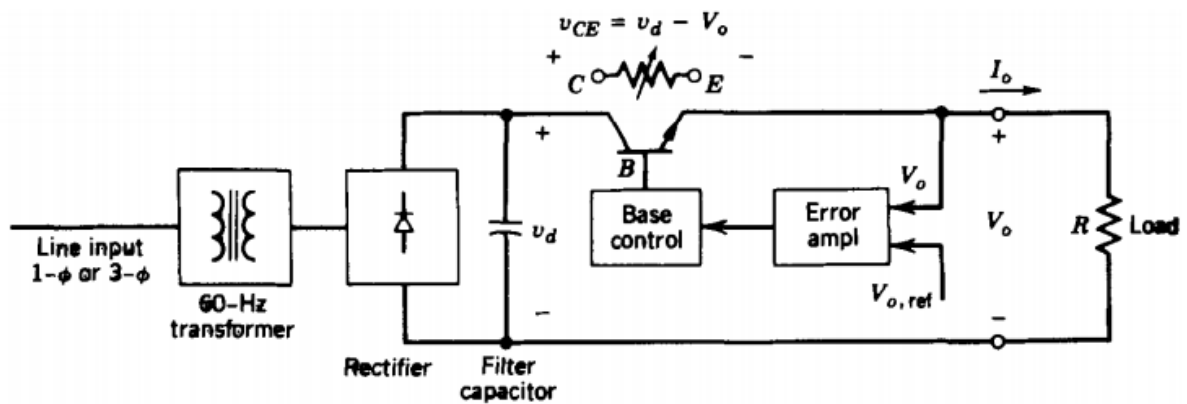


Figura 9 - Circuito esquemático de uma fonte linear [36].

A diferença de potencial existente entre os terminais do transistor, para que ocorra a regulação de tensão, ocasiona perda de energia, deixando o dispositivo menos eficiente comparado a outras tecnologias. Contudo, mesmo devido às dimensões e peso elevado e eficiência em torno de apenas 30 a 60 %, as fontes lineares foram amplamente utilizadas devido ao seu baixo custo e menor interferência eletromagnética em outros equipamentos [36].

Atualmente, são utilizadas majoritariamente as fontes de modo chaveado, ou simplesmente, fontes chaveadas. Estas, diferentemente das fontes lineares, não utilizam transformador na linha de entrada do circuito, e sim, sistemas de retificação, como pontes de diodo. O sinal CC não regulado proveniente do primeiro estágio de retificação passa a outro nível CC através de conversores CC-CC, que utilizam componentes de estado sólido

(transistores ou MOSFETS, por exemplo). Estes dispositivos atuam como chaves liga-desliga em um processo de alta frequência e sem operar na região ativa, resultando em menores perdas por dissipação [36].

O circuito esquemático de uma fonte chaveada é apresentado na Figura 10. Nesta figura verifica-se o sistema de retificação na linha de entrada (alimentação) do circuito, seguido do conversor CC-CC em conjunto com um transformador isolador, cujo sinal de saída é em alta frequência. O sinal CC na saída da fonte é regulado através de controlador PWM (*Pulse Width Modulation*) a partir da comparação do sinal realimentado com outro de referência.

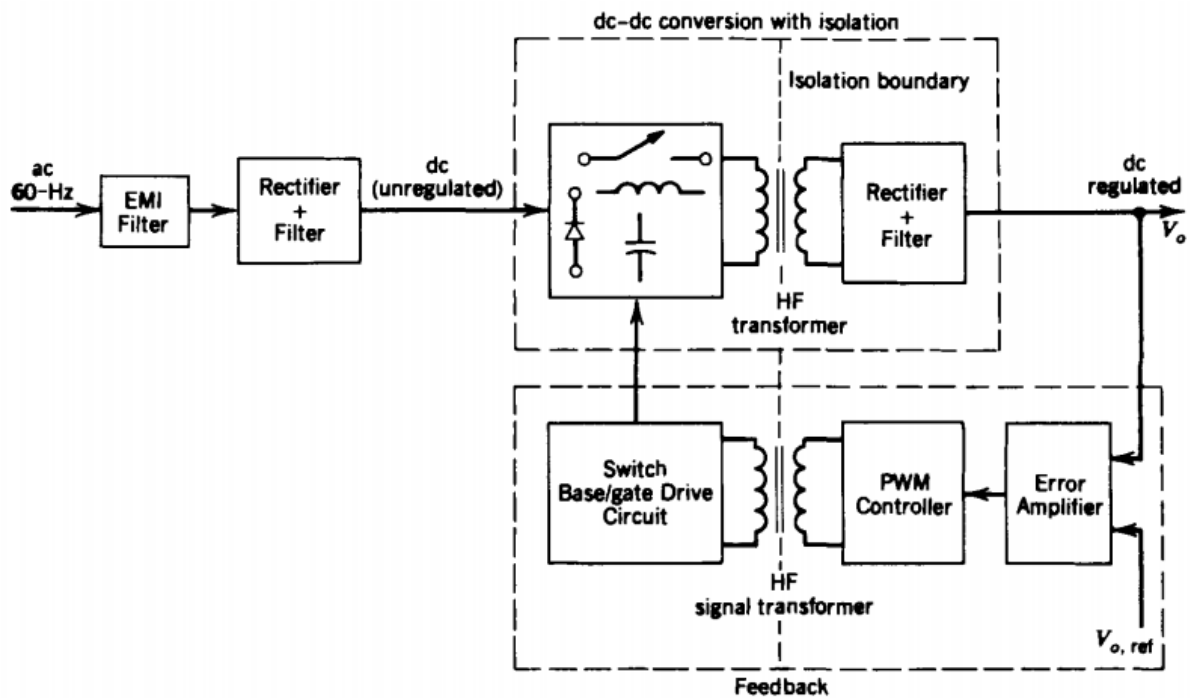


Figura 10 - Circuito esquemático de uma fonte chaveada [36].

Segundo [36], os dispositivos comutadores, transistores de potência ou MOSFETS, por não operarem na região ativa, resultam em menores perdas, conseqüentemente em maior eficiência energética das fontes chaveadas, na faixa de 70% a 90%. Outra vantagem desse tipo

de fonte está relacionada às dimensões e peso do transformador isolador de alta frequência, que são muito menores comparados aos transformadores (50 - 60 Hz) utilizados nas fontes lineares. No entanto, o circuito das fontes chaveadas é mais complexo e necessita de certos cuidados, haja vista, a possibilidade de maior interferência eletromagnética devido ao chaveamento em alta frequência.

Embora seja desvantajoso para as fontes lineares o uso do transformador de baixa frequência na entrada do circuito, devido às dimensões e peso, conforme [2], o mesmo tem a vantagem de suavizar a forma de onda da corrente de entrada, reduzindo o conteúdo harmônico. Por não haver uma indutância no lado CA, a corrente consumida pela fonte chaveada apresenta pulsos muito curtos, à medida que os capacitores recuperam a carga a cada meio ciclo. Logo, uma característica das fontes chaveadas é o alto teor de terceiro harmônico na corrente [2].

Com o constante aperfeiçoamento dos dispositivos de estado sólidos, os equipamentos eletroeletrônicos, assim as fontes de alimentação, principalmente as chaveadas, têm sofrido melhorias em seus *designs* e conseqüentemente no desempenho. Como exemplo, tem-se a adição dos circuitos para correção do fator de potência - PFC, do inglês *Power Factor Corrector*. Em [37], comenta-se do grande uso de retificadores a diodos em fontes de computadores, que aplicados a cargas resistivas teriam fator de potência (FP) próximo de 0,9 e menor para cargas reativas, porém com o uso de técnicas de controle a corrente de entrada passa a ser senoidal e em fase com a tensão, levando o FP a unidade.

Segundo [38], o PFC tem três funções principais: retificação da tensão (conversão CA-CC), modelagem da forma de onda da corrente de entrada (deve seguir a forma de onda da tensão de entrada) e pré-regulação da tensão do barramento. Para o desempenho adequado, a realimentação da tensão de saída é lenta o suficiente para não perturbar a forma de onda da

corrente de entrada, mas ainda permitindo que o conversor de energia CC-CC principal opere a partir da tensão de entrada bem regulada.

Na literatura há diversos trabalhos [38, 39, 40, 41, 42, 43 e 44] que retratam melhorias aplicadas às fontes de alimentação, assim como várias topologias de PFC empregados. Estes aperfeiçoamentos têm contribuído positivamente, tanto para longevidade da vida útil destes equipamentos, como para o setor elétrico em termos de eficiência e qualidade da energia elétrica: menores correntes de entrada, menor estresse térmico, incremento do fator de potência, menores conteúdos harmônicos, etc. Alguns destes pontos serão apresentados adiante, no tópico de análise e resultados, onde são realizadas comparações de fontes com e sem PFC submetidas a alguns distúrbios de QEE.

Além da empregabilidade de PFC, as fontes de computadores apresentam outras características que diferenciam uma das outras quanto às dimensões, tipo e quantidade de conectores, estando estas características atreladas ao modelo de placa mãe. Desta forma, as fontes utilizadas nos testes são da família de fontes ATX (*Advanced Technology Extended*), que é uma especificação relacionada à configuração de placa mãe e fonte de alimentação desenvolvida pela multinacional *Intel Corporation*, na década de 1990, a fim de aprimorar o padrão anterior (AT - *Advanced Technology*). Conforme [45], o modelo ATX trouxe mudanças no *design* de gabinete de computadores *desktop*, placa-mãe e fonte de alimentação, melhorando a padronização e a intercambiabilidade de peças. A especificação define as dimensões, pontos de montagem, o painel de entrada e saída (I/O), as interfaces de alimentação e os conectores entre gabinete de computador, placa-mãe e fonte de alimentação.

As fontes ATX possuem um conector principal de 24 pinos que deve ser conectado a placa mãe do computador. A partir deste conector são obtidos os diversos sinais de saída da fonte, cada um destinado a alimentar um componente ou alguns componentes em específico, além de possibilitar algumas funcionalidades desta família de fontes. A Figura 11 ilustra o

conector principal e suas respectivas saídas, além dos demais conectores utilizados em uma fonte da família ATX.

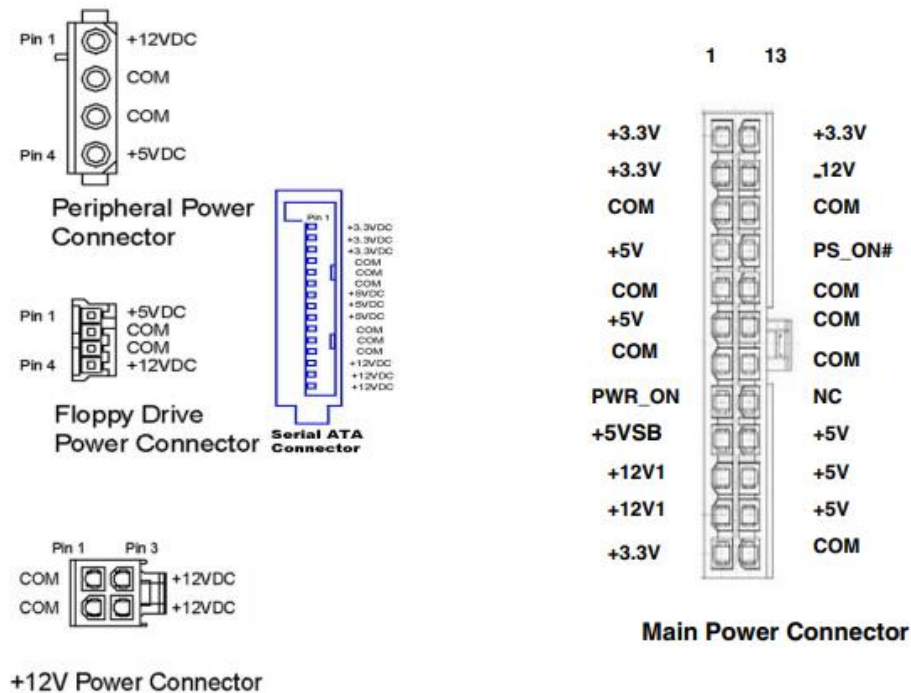


Figura 11 - Configuração do conector de 24 pinos das fontes ATX [45].

Dentre os sinais observados a partir da figura acima, os principais são: +3.3V, +5V e +12V, na qual os dois primeiros são responsáveis por alimentar os processadores, memórias e alguns outros circuitos digitais. Os motores dos acionadores de discos rígidos, bandeja do *drive* de CD/DVD e outros motores são alimentados pelo sinal de 12V. Quanto aos outros sinais observados, sugere-se a leitura de [45] para conhecimento e melhores detalhes.

Toda fonte chaveada deve manter os sinais de saída constantes, e para isso fazem o processo de realimentação dos circuitos de controle, que irão realizar as compensações necessárias, caso haja alteração nos valores pré-determinados. Todavia, há níveis de tolerância para que estes sinais sejam aceitáveis ou não. Sendo assim, a Tabela 18, apresenta os percentuais de tolerância que devem ser mantidos em operação contínua para qualquer

temperatura em regime permanente e condições operacionais especificadas para as fontes ATX, conforme [46] e [47].

Tabela 18 - Tolerância para os níveis de tensão de saída para fonte ATX.

| Sinal de saída | Tolerância | Mínimo (V) | Nominal (V) | Máximo (V) |
|---------------------|------------|------------|-------------|------------|
| +12V _{CC} | ± 5% | 11,40 | 12,00 | 12,60 |
| +5V _{CC} | ± 5% | 4,75 | 5,00 | 5,25 |
| +3,3V _{CC} | ± 5% | 3,14 | 3,30 | 3,47 |
| -12V _{CC} | ± 10% | -10,80 | -12,00 | -13,20 |
| +5V _{SB} | ± 5% | 4,75 | 5,00 | 5,25 |

Fonte: adaptado de [46], tabela 2.

Níveis baixos de tensão de saída das fontes podem impactar na operação dos computadores, e conforme [45], a saída deve ser estável mesmo havendo perda de potência na entrada por no mínimo 17 ms. Desta forma, a saída das fontes está diretamente relacionada à eficiência das mesmas, que é dada através do percentual da razão da potência total de saída pela potência requerida na entrada, conforme equação (5) [48]:

$$\eta = \frac{\sum_i P_{o,i}}{P_{in}} \times 100 \quad (5)$$

Onde, $P_{o,i}$ é a potência de saída da i ésima saída e P_{in} é a potência de entrada.

Embora haja várias diretrizes buscando contribuir com os projetos e concepção das fontes de alimentação para que as mesmas tenham requisitos mínimos de segurança e desempenho, e assim garantir o bom funcionamento do computador e seus componentes internos, segundo [49], as fontes de alimentação, geralmente não são consideradas no momento da compra ou montagem de um computador. Isso se deve majoritariamente ao apelo comercial, que destaca componentes como processador, memória, disco rígido, placa de vídeo etc. Desta forma, o uso de fontes de alimentação mal projetadas pode ocasionar danos ao

consumidor, desde a ocorrência de choques elétricos e/ou queimaduras, além de avarias as demais partes do computador, contribuindo ainda com o desperdício de energia elétrica, que traz prejuízo econômico ao consumidor e para a matriz energética brasileira [49].

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Instrumentação e bancada de testes

Para a realização deste trabalho e em especial da parte prática, foi necessário escolher qual equipamento (carga) seria submetido às distorções harmônicas. Para tal, três fatores foram relevantes para a determinação desta escolha:

- Custo;
- Usabilidade;
- Facilidade em acessar o circuito eletrônico (manuseio).

Como mencionado anteriormente, mesmo com a adesão às novas tecnologias, como *laptops*, as fontes de computadores do tipo *desktop* são amplamente utilizadas, seja nos domicílios, indústrias, comércio, escolas, etc. Desta forma, este tipo de carga, além de estar submetida aos distúrbios de QEE presentes na rede elétrica, também é uma fonte de problemas, principalmente entre alguns modelos, que apresentam elevada distorção harmônica de corrente.

Pensando que o equipamento a ser avaliado estaria sujeito a sofrer avarias, o custo para aquisição do mesmo foi levado em consideração. Logo, as fontes de computadores cujos preços variam de R\$ 50,00 a R\$ 1.000,00, dependendo do modelo e fabricante foi uma boa opção, principalmente comparada a outros equipamentos interessantes de serem avaliados. Além do custo, estes equipamentos são simples de abrir, facilitando o acesso aos circuitos e componentes de interesse.

Tendo em vista a diferença na topologia de construção das fontes entre os diversos modelos e fabricantes, optou-se em avaliar uma fonte de menor qualidade, conseqüentemente menor custo, e outra conceituada no mercado por sua qualidade e desempenho. Uma diferença significativa entre as fontes escolhidas é que a primeira não tem circuito para correção do

fator de potência (PFC), conforme apresentado em tópico anterior. Já a segunda fonte além de conter PFC, a mesma foi aprovada em testes realizados pelo Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO) [49]. Vale lembrar que a segunda fonte possui maior faixa de variação de tensão em sua entrada (100-240 V_{CA}), comumente denominada bivolt automático. Já a primeira apresenta dois níveis de tensão de trabalho, porém sendo necessário alterar manualmente a partir de chave seletora (127 e 220 V_{CA}).

A Tabela 19 apresenta as especificações dos dois modelos de fonte conforme dados do fabricante, sendo que, no decorrer do trabalho, o modelo com PFC, será denominado fonte A e o genérico, fonte B.

Tabela 19 - Dados de placas dos dois modelos de fontes avaliadas.

| Variáveis | Sinal de entrada (CA) | | | Sinal de saída (CC) | | | | | Potência (W) |
|-----------|-----------------------|--------------|-----------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|--------------|
| | Tensão (V) | Corrente (A) | Frequência (Hz) | +3,3 V | +5 V | +12 V | -12 V | -5 V | |
| Fonte A | 100-240 | 6,3-3,15 | 47-63 | 20 A * | 20 A * | 32 A | 0,8 A | — | 430 |
| Fonte B | 110/220 | 4/8 | 50/60 | 16 A | 20 A | 28 A | 0,3 A | 0,5 A | 500 |

Fonte: do autor com base nos dados de placa das fontes

Nota: * Potência combinada máxima
— Sem informação.

Para gerar os sinais desejados e alimentar os objetos de testes, foi utilizado uma fonte programável trifásica de 4,5 kVA, cujas características técnicas encontram-se no Apêndice A. Para garantir a fidelidade dos sinais gerados com relação ao que foi parametrizado, foram utilizados equipamentos registradores e analisadores de qualidade da energia (qualímetros), além de outros equipamentos que compuseram a bancada de testes e estão representados, conforme Figura 12, além de estarem melhor detalhados nos anexos deste trabalho.

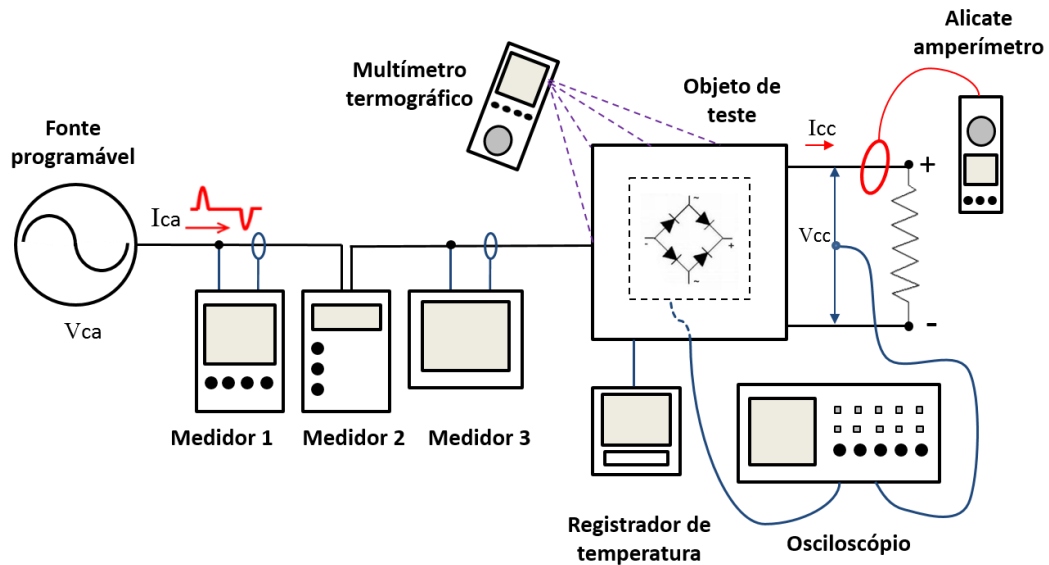


Figura 12 - Representação da bancada de testes.

A Figura 12 apresenta da esquerda para a direita, a fonte programável capaz de gerar sinais arbitrários, como distorções harmônicas até a 51ª ordem, além de outros distúrbios de qualidade da energia: *flicker*, *voltage sag*, *voltage swell*, desequilíbrio, etc. Os medidores 1 e 2 são os qualímetros utilizados para monitorar e registrar os sinais de entrada da fonte de computador (tensão gerada pela fonte programável e corrente consumida pela fonte de computador).

O medidor 1 utiliza pinça de corrente CA (*clamp* ferromagnético), que facilita a medição do sinal de corrente por não necessitar abrir o circuito, podendo ser removido a qualquer momento. O medidor em questão tem taxa de amostragem de 416 amostras por ciclo, sendo seu intervalo de integralização configurado em 10 segundos. O mesmo utiliza métodos de medição especificados na norma IEC61000-4-30-2003 [50] e possui precisão conforme classe B, especificada na mesma.

O medidor 2 faz a aquisição de 133 amostras por ciclo para o monitoramento dos sinais de corrente e tensão, este com precisão de 0,15%, foi configurado para um intervalo de 3 segundos. Os registros dos parâmetros de QEE (corrente e tensão harmônica, potência) são

compatíveis com a IEC 61000-4-7-2002 [51]. Para a leitura de corrente este medidor foi conectado em série com o circuito, portanto entre fonte programável e equipamento de teste.

O medidor 3 também utiliza pinças de corrente CA (bobina de *Rogowski*), similar ao medidor 1 quanto a forma de conexão, porém o mesmo foi inserido em uma segunda etapa dos testes, substituindo o medidor 1. Nesta segunda etapa, além das distorções harmônicas, os equipamentos avaliados foram submetidos a afundamentos de tensão, o que motivou o uso do medidor 3. Este, por ter 04 canais de tensão isolados e com referências distintas, possibilitou monitorar o sinal CA oriundo da fonte programável e simultaneamente os três níveis de tensão CC na saída da fonte de computador (+12 V_{CC}, +5 V_{CC} e +3,3 V_{CC}). Portanto, foi possível registrar o comportamento dos sinais CC durante sucessivos afundamentos de tensão aplicados, o que não era praticável com o osciloscópio, devido ao tempo gasto para registrar um evento e outro. No caso do medidor 1, por utilizar a mesma referência para todos os canais de tensão, inviabiliza o monitoramento nestas condições.

O medidor 3 tem taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo e calcula o valor RMS a cada meio ciclo, sendo o mesmo configurado para dispor dos registros com intervalo de integralização de 01 segundo. Este equipamento atende a classe A de medidores, conforme IEC61000-4-30-2003 [50].

Foram utilizados dois qualímetros, a fim de garantir os dados registrados (*backup*). Caso ocorresse algum erro com um dos medidores, o experimento não precisaria ser refeito.

Também foi utilizado um osciloscópio com 4 canais isolados e independentes com capacidade de registro de 2500 pontos cada e amostragem de 1 GS/s. Foram utilizados três canais para amostragem da saída da fonte de alimentação em teste (+ 12V_{CC}, + 5V_{CC} e + 3,3V_{CC}), enquanto o quarto canal captava o sinal de tensão logo após a retificação. Devido à alta taxa de amostragem e número de pontos registrados, a captura da forma de onda através da função *trigger* seguida do processo de armazenamento é lenta, impossibilitando que o

osciloscópio registre eventos seguidos com pouco espaço de tempo entre um e outro. Necessidade atendida pelo medidor 3.

Como a temperatura contribui com a avaria e diminuição da longevidade de componentes, e pode ser um indicador de que o equipamento não está operando de forma adequada, esta é uma grandeza importante de ser avaliada durante as análises experimentais. Logo, para os testes foi utilizado um registrador de temperatura com 6 canais, dos quais foram utilizados 3 associados a sensores termopar do tipo K. Dois sensores foram colocados dentro da fonte de alimentação em teste, um próximo ao circuito de entrada e o outro ao circuito de saída. O terceiro sensor registrou a temperatura ambiente, considerada como referência.

Além do registrador, foi utilizado um multímetro com câmera termográfica, permitindo a captura de imagens durante e após os testes. Portanto, foram registrados quais os componentes da fonte de alimentação eram os mais quentes, possivelmente os mais suscetíveis a avarias. A Figura 13 mostra o arranjo experimental utilizado.

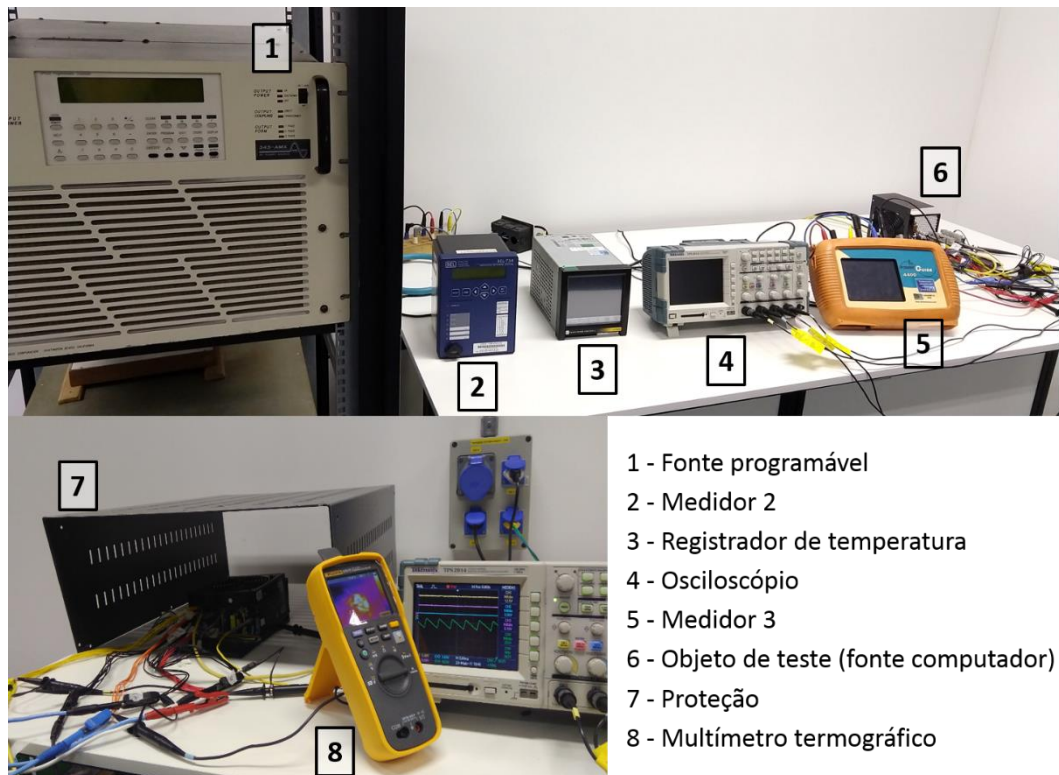


Figura 13 - Bancada de testes.

Para carregar as saídas das fontes de alimentação, ou seja, para que as mesmas não operassem a vazio, foram utilizados elementos resistivos selecionados para cumprir com as especificações de cada fonte de alimentação, conforme Tabela 19. Para a dissipação de calor dos resistores foi utilizado um ventilador convencional com fluxo de ar direcionado para os mesmos, conforme Figura 14.

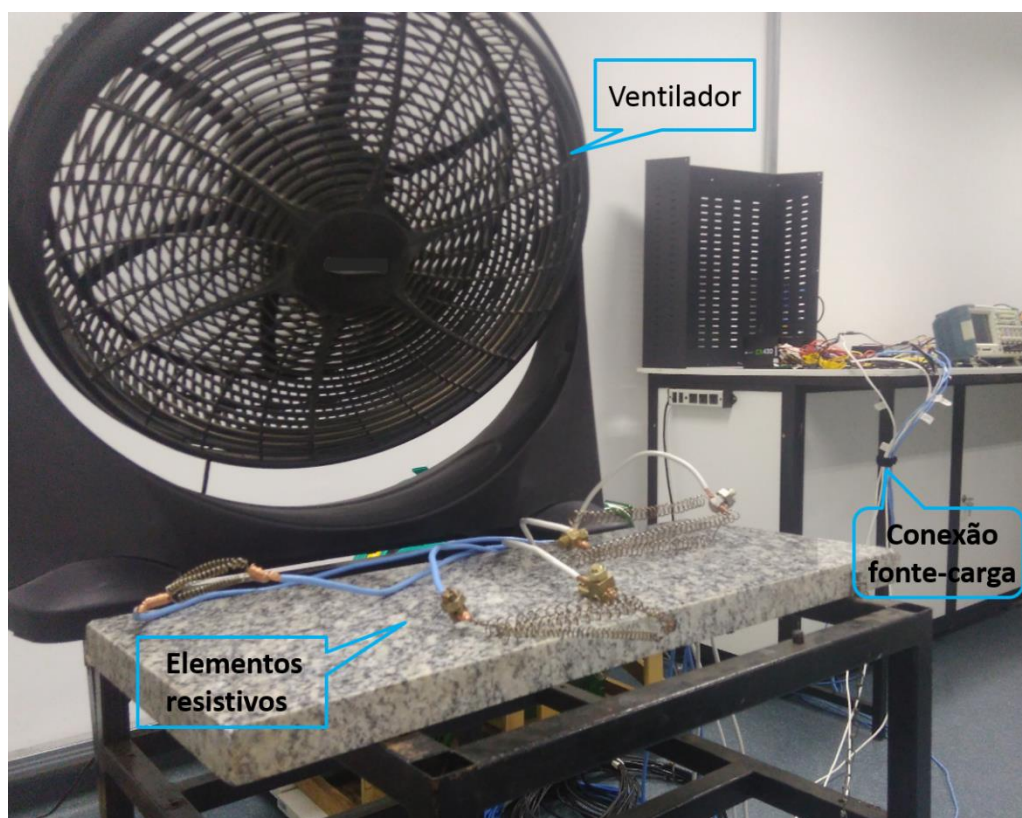


Figura 14 - Sistema de resfriamento da carga CC (resistência).

A princípio, os testes seriam realizados com as fontes operando com 50% e 100% da capacidade de cada uma, sendo que [48] sugere que os testes, para verificação da eficiência de fontes de alimentação, sejam com 10%, 20%, 50% e 100% da potência declarada na placa. No entanto, a partir dos testes preliminares, constatou-se que a fonte B não era capaz de suprir a potência especificada pelo fabricante, logo a carga resistiva foi reduzida de modo a consumir cerca de 227 W (45% do valor nominal). Para a fonte A, observou-se que seria possível utilizá-la com 100% de sua capacidade, mas como o mesmo não seria viável com a segunda fonte, além de que dificilmente um computador demanda a totalidade da potência de sua

fonte, optou-se em utilizar uma carga menor. Para tanto, foram consumidos aproximadamente 85% do seu valor nominal.

Vale ressaltar que o pior desempenho da fonte B com cargas próximas à nominal, foi quanto ao canal de 12 V_{CC}. Logo, para os dois modelos (fontes A e B), a redução ocorreu apenas nas resistências do canal de 12 V, sendo, portanto, utilizadas as mesmas resistências para as saídas 3,3 V_{CC} e 5,0 V_{CC}.

A Tabela 20 mostra os valores, em Ohms (Ω), referentes às resistências utilizadas em cada canal e a potência total esperada na saída de cada uma das 4 fontes avaliadas, e que estão ilustradas no Apêndice B.

Tabela 20 - Valores ôhmicos dos elementos resistivos utilizados nas saídas das fontes e potência total teórica.

| Fonte | Canais de saída | | | Potência total (W) |
|-------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|
| | 3,3 V | 5 V | 12 V | |
| A1 | 0,36 Ω | 0,48 Ω | 0,53 Ω | 354,03 |
| A2 | 0,36 Ω | 0,48 Ω | 0,53 Ω | 354,03 |
| B1 | 0,36 Ω | 0,48 Ω | 1,11 Ω | 212,06 |
| B2 | 0,36 Ω | 0,48 Ω | 1,11 Ω | 212,06 |

Fonte: do autor.

Após os testes iniciais de desempenho com a definição das cargas a serem utilizadas nas saídas das fontes, deu-se início a rotina experimental.

4.2 Rotina de testes

Este tópico tem o intuito de apresentar os procedimentos e metodologias empregadas em cada teste realizado, assim contribuindo na compreensão das assertivas expostas no tópico de resultados e análise (capítulo 5). Para tal, inicialmente são apresentados os

procedimentos para ensaios em condições adequadas de operação dos objetos de teste, ou seja, tensão em regime permanente sem distorções harmônicas e frequência de 60 Hz. Em seguida, pautado nas normas e recomendações pertinentes, tem-se a metodologia empregada para testes com distorções harmônicas e posteriormente adicionando afundamentos no sinal de alimentação das fontes (afundamentos de tensão). Portanto, a seguir são apresentados os seguintes casos com relação ao sinal de alimentação dos OTs:

- Condições ideais – sinal senoidal em regime permanente;
- Distorções harmônicas individuais (3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a componentes) com percentual de 8%, 10% e 12%;
- Distorções harmônicas compostas pela frequência fundamental e 3^a, 5^a e 7^a componentes harmônicas com defasagem de 0°, 90° e 180°;
- Afundamentos de tensão em sinal senoidal;
- Afundamentos de tensão em sinal distorcido.

4.2.1 Cenário ideal: sinal senoidal

Com o intuito de conhecer as características das fontes e obter parâmetros de referência para os testes em condições severas (sob distorções harmônicas e afundamentos de tensão), as fontes foram submetidas primeiramente a testes com sinal senoidal estando às mesmas com carga e sem carga (*stand by*). Ao considerar os valores obtidos e observações relevantes foi formulada uma rotina de testes, sendo a corrente nominal (CA) da fonte de alimentação e sua temperatura de trabalho, tomadas como referência após o tempo de estabilização. As principais variáveis avaliadas são descritas na Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 21 - Valores medidos na operação das fontes em *stand by* e com carga.

| Entrada (CA) | | A1 | A2 | B1 | B2 |
|-----------------------------------|----------------|--------|---------|---------|---------|
| Corrente (A) | <i>Standby</i> | 0,09 | 00,9 | 0,19 | 0,12 |
| | Carga | 3,37 | 3,33 | 3,99 | 2,66 |
| Potência ativa (W) | <i>Standby</i> | 1,4 | 3,21 | 10,2 | 6,79 |
| | Carga | 417,6 | 412,83 | 305,4 | 219,04 |
| Potência reativa (var) | <i>Standby</i> | - 8,2 | -10,28 | - 0,6 | - 0,24 |
| | Carga | - 34,4 | - 33,13 | - 163,2 | - 98,09 |
| THD _I (%) | <i>Standby</i> | 14,94 | 16,71 | 194,5 | 200,1 |
| | Carga | 4,34 | 4,01 | 105,30 | 97,61 |
| Fator de potência | <i>Standby</i> | 0,19 | 0,19 | 0,45 | 0,44 |
| | Carga | 1,00 | 1,00 | 0,61 | 0,65 |
| Fator de deslocamento | <i>Standby</i> | 0,19 | 0,20 | 1,00 | 1,00 |
| | Carga | 1,00 | 1,00 | 0,88 | 0,91 |
| Saída (CC): potência ativa (W) | Carga | 370,6 | 366,2 | 227,4 | 163,3 |

Fonte: do autor.

Tabela 22 - Temperatura registrada após tempo de estabilização.

| Temperatura (°C) | | A1 | A2 | B1 | B2 |
|------------------------|----------------|------|------|------|------|
| Ambiente | <i>Standby</i> | 21,6 | 21,6 | 21,9 | 21,9 |
| | Carga | 23,7 | 23,8 | 23,5 | 23,4 |
| Circuito de entrada | <i>Standby</i> | 22,2 | 21,8 | 23,7 | 23,1 |
| | Carga | 26,3 | 26,8 | 31,6 | 29,5 |
| Circuito de saída | <i>Standby</i> | 23,5 | 23,2 | 22,6 | 22,4 |
| | Carga | 40,1 | 43,4 | 24,6 | 24,8 |

Fonte: do autor.

Vale lembrar que foram avaliados dois modelos distintos de fontes, sendo o modelo com PFC denominado de A (A1 e A2) e o modelo sem PFC de B (B1 e B2). Ambos os modelos foram energizados com tensão nominal de 127 V, nível comumente utilizado no Brasil em residências e escritórios para alimentação de computadores através de tomadas de uso geral (TUG). Além do mais, como seriam aplicados afundamentos de tensão, conforme [30], é mais interessante trabalhar próximo ao limite inferior da faixa de tensão das fontes, em especial ao modelo do tipo A, cuja faixa é ampla e automática (100 V - 240 V). Como

exemplo, se as fontes fossem alimentadas com tensão de 220 V, afundamentos de até 45% estariam dentro da faixa de operação da fonte do tipo A, podendo a mesma se manter imune, conforme [16].

Além dos sinais de entrada das fontes, também foram observados os sinais de saída, tensão e corrente contínua, com seus valores médios apresentados na Tabela 23. A partir destes valores foi obtida a potência de saída (produto da tensão pela corrente) de cada fonte, exposta na Tabela 21, e a partir da equação (5), verifica-se que a eficiência das fontes A1, A2, B1 e B2 foram respectivamente, 88,73%; 88,71%; 74,46% e 74,55%. Estes resultados mostram que as fontes do tipo A tiveram rendimentos melhores, conforme esperado, haja vista, as mesmas serem certificadas pelo selo 80 PLUS da *Clearesult* [52], que adota os critérios estabelecidos em [48].

Tabela 23 - Sinais de saída das fontes: tensão e corrente.

| Sinal de saída (CC) | +12 V | | +5 V | | +3,3 V | | |
|------------------------|----------------|----------|--------|----------|--------|----------|-------|
| | Tensão | Corrente | Tensão | Corrente | Tensão | Corrente | |
| A1 | <i>Standby</i> | 12,9 V | — | 5,20 V | — | 3,39 V | — |
| | <i>Carga</i> | 12,3 V | 22,8 A | 5,21 V | 11,3 A | 3,36 V | 9,3 A |
| A2 | <i>Standby</i> | 12,7 V | — | 5,20 V | — | 3,40 V | — |
| | <i>Carga</i> | 12,3 V | 22,5 A | 5,02 V | 11,6 A | 3,36 V | 9,3 A |
| B1 | <i>Standby</i> | 12,4 V | — | 5,44 V | — | 3,43 V | — |
| | <i>Carga</i> | 12,6 V | 11,3 A | 5,23 V | 10,6 A | 3,28 V | 9,0 A |
| B2 | <i>Standby</i> | 12,4 V | — | 5,43 V | — | 3,39 V | — |
| | <i>Carga</i> | 10,5 V | 9,3 A | 4,20 V | 9,2 A | 3,21 V | 8,4 A |

Fonte: do autor.

Nota: — Valor nulo (sem carga).

Verifica-se considerável diferença, principalmente para os dois maiores níveis de tensão entre as fontes do tipo B (16,7% para o canal +12 V_{CC} e 19,7 % para o canal +5 V_{CC}). A fonte B2 forneceu menor tensão, implicando em menor corrente, e consequentemente, menor potência de saída para a mesma carga (28,2% menor que B1). Embora ambas fossem

do mesmo modelo, foi constatado diferenças na disposição (*layout*) e em alguns componentes, como os capacitores de alisamento pós retificação, por exemplo.

Alguns detalhes quanto às diferenças observadas entre as duas fontes do tipo B podem ser verificados no Apêndice C.

A forma de onda da corrente de entrada e o sinal de tensão senoidal aplicado às fontes do tipo A e B podem ser analisados a partir da Figura 15. Nesta, é ilustrado o típico sinal de fontes que utilizam sistemas de retificação tradicional em contrapartida ao sinal da fonte com sistema de conversão a partir de PFC, que se mostra fiel ao sinal da tensão. Contudo, pode ser observada uma pequena distorção no sinal de corrente da fonte A, próximo à passagem pelo zero (*zero crossing*), ocorrência comum em sinais oriundos de PFC, segundo [53].

Conforme esperado, a terceira componente harmônica na corrente consumida foi predominante, principalmente para as fontes do tipo B. Para este modelo (sem PFC) o percentual da corrente harmônica diminuiu com o aumento da ordem harmônica, ou seja, com a elevação da frequência. Já as fontes do tipo A tiveram a quinta componente menor comparada à ordem ímpar seguinte, sendo que para a fonte A1 a quinta componente foi inferior a todas as outras ordens posteriores apresentadas. É válido lembrar que foi registrado até a 15ª ordem harmônica de corrente e que as componentes pares não são mencionadas neste trabalho por apresentarem valores irrisórios comparados às componentes ímpares.

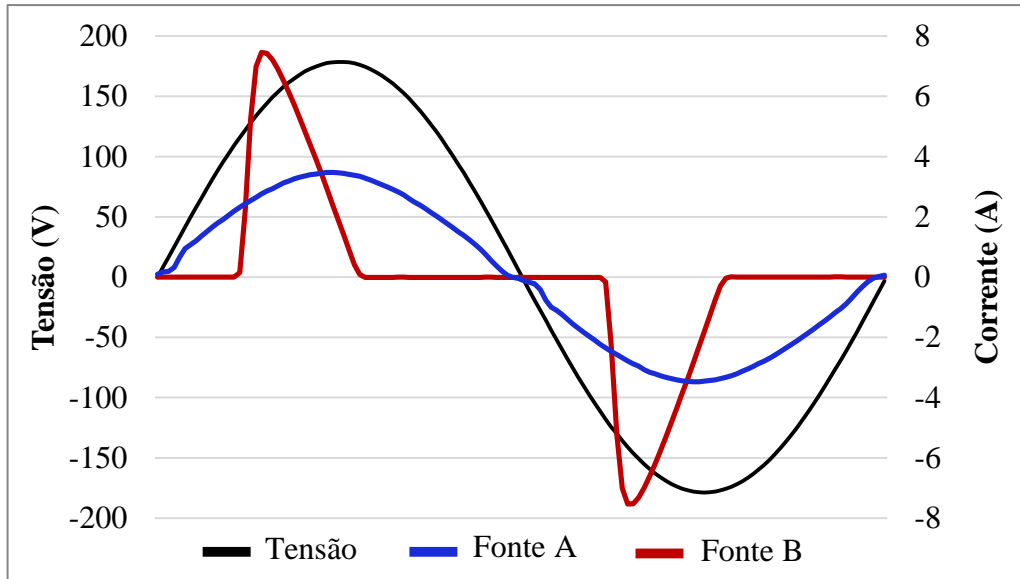


Figura 15 - Forma de onda da tensão (preto) e corrente da fonte A1 (azul) e B1 (vermelho) operando com carga.

A Figura 16 e Figura 17 apresentam o perfil do espectro harmônico de corrente para as componentes ímpares das fontes A1 e A2 e B1 e B2, respectivamente.

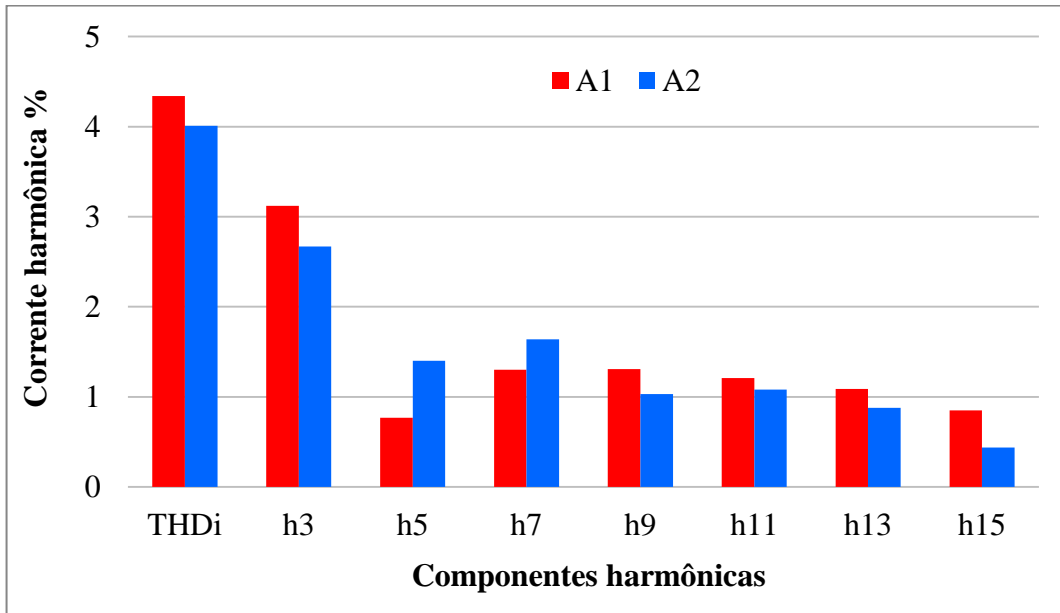


Figura 16 - Espectro harmônico de corrente e THD_i das fontes A1 e A2.

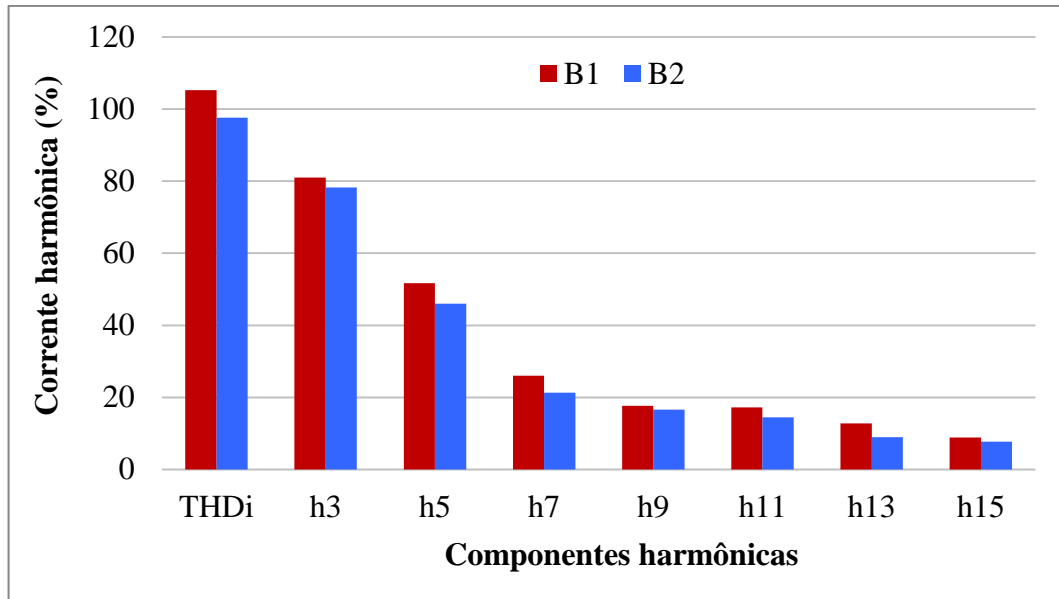


Figura 17 - Espectro harmônico de corrente e THDi das fontes B1 e B2.

Embora a IEC61000-3-2 [25] não especifique limites para emissão harmônica de corrente para sistemas alimentados em 127 V, à mesma foi utilizada como referência para esta análise mesmo sem utilizar critérios para compensação. Desta forma, assumiu-se que os objetos de testes por estarem associados a computadores entram no grupo D, conforme classificação de [25], e que vai ao encontro das sugestões de [46]. Nestas condições, as fontes do tipo B, com destaque para a fonte B1, se mostraram grandes poluidoras da rede elétrica ao consumir correntes harmônicas superiores aos limites recomendados.

A Tabela 24 permite comparar os limites propostos pela IEC61000-3-2 [25] com os valores registrados para as quatro fontes assistidas neste cenário. Cabe ressaltar que os valores apresentados estão em Ampere (A), tendo sido realizado a conversão necessária através de regra de três simples, já que [25] expõe os limites em mA/W. Portanto, foram utilizadas as potências medidas para cada OT, já que não é explícito nos dados de placa qual a potência de entrada e [25] sugere utilizar a potência mensurada quando a mesma extrapola a faixa de 90% a 110% da potência declarada pelo fabricante. O guia para *design* de fontes [47] também propõe o uso da potência consumida para análise da emissão de corrente harmônica.

Tabela 24 - Níveis de correntes harmônicas para alimentação com sinal senoidal.

| Ordem harmônica | Correntes limites conforme IEC61000-3-2 e valores registrados (A) | | | | | | | |
|-----------------|---|----------|--------|----------|--------|----------|------------|----------|
| | Limite | Fonte A1 | Limite | Fonte A2 | Limite | Fonte B1 | Limite (A) | Fonte B2 |
| <i>h3</i> | 1,42 | 0,11 | 1,40 | 0,09 | 1,04 | 2,25 | 0,74 | 1,50 |
| <i>h5</i> | 0,79 | 0,03 | 0,78 | 0,05 | 0,58 | 1,44 | 0,42 | 0,88 |
| <i>h7</i> | 0,42 | 0,04 | 0,41 | 0,05 | 0,31 | 0,72 | 0,22 | 0,41 |
| <i>h9</i> | 0,21 | 0,04 | 0,21 | 0,03 | 0,15 | 0,49 | 0,11 | 0,32 |
| <i>h11</i> | 0,15 | 0,04 | 0,14 | 0,04 | 0,11 | 0,48 | 0,08 | 0,28 |
| <i>h13</i> | 0,12 | 0,04 | 0,12 | 0,03 | 0,09 | 0,36 | 0,06 | 0,17 |
| <i>h15</i> | 0,11 | 0,03 | 0,11 | 0,01 | 0,08 | 0,25 | 0,06 | 0,15 |

Fonte: do autor.

As imagens termográficas, apresentadas através da Figura 18 e Figura 19, foram tiradas logo após o término do experimento, permitindo observar quais regiões e/ou componentes mais sofreram com aquecimento. Para tal, tem-se que os pontos mais claros (tom de amarelo) indicam maior temperatura e podem ser comparados com a imagem da fonte correspondente.

Para a fonte A verifica-se que os pontos mais quentes estão associados à ponte de retificação (circuito de entrada) e aos transformadores já próximos ao sinal de saída. Para a fonte B observa-se que o termistor (circuito de entrada) é um dos pontos mais quentes, também um resistor após os capacitores de alisamento, seguido dos transformadores associados ao sinal de saída. Cada fonte de alimentação foi submetida a uma série de testes permitindo verificar que a estabilização da temperatura nas mesmas se dá entre 20 a 25 minutos de funcionamento. Desta forma, foi estabelecida que a duração de todos os testes deveria compreender o tempo de 20 a 30 minutos, sendo que entre um teste e outro houve um intervalo de resfriamento, permitindo que os mesmos iniciassem próximo à temperatura ambiente.

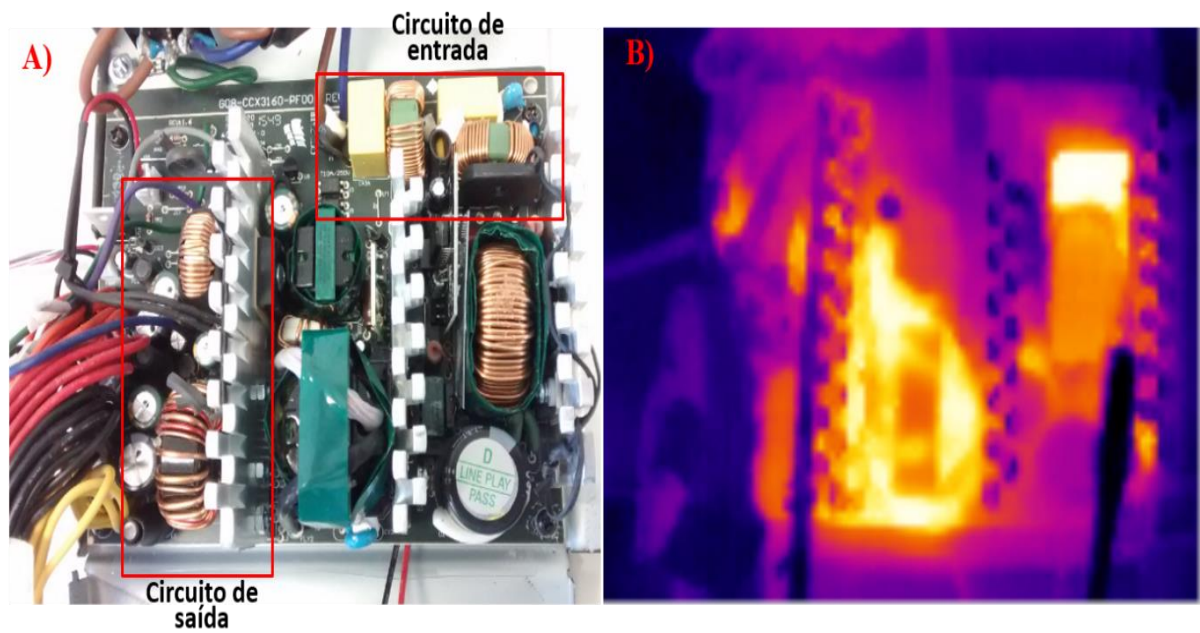


Figura 18 - Fonte A1: A) visão geral dos componentes B) imagem termográfica (operando com carga).

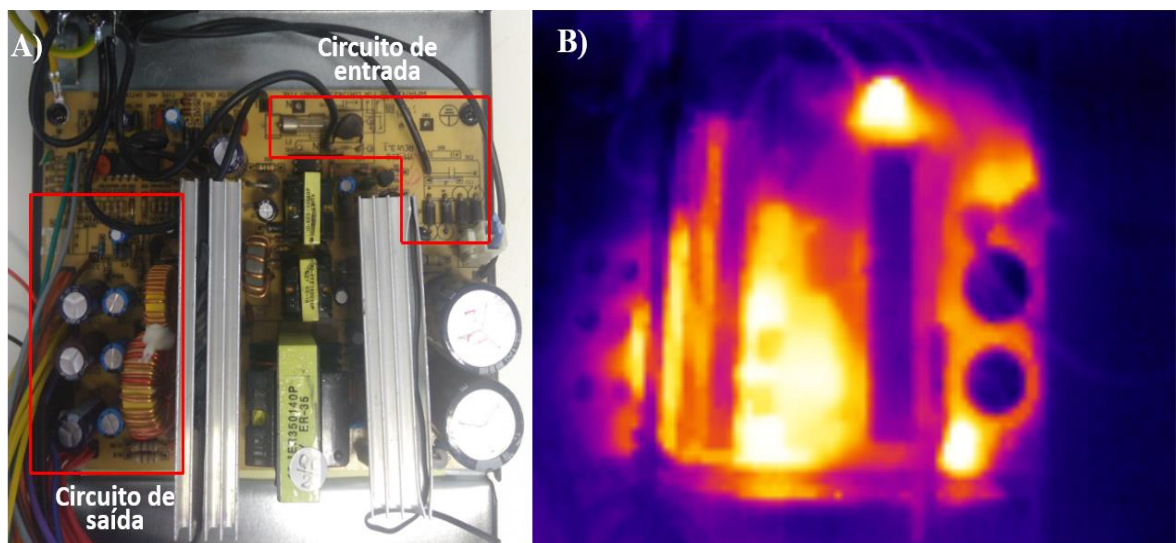


Figura 19 - Fonte B1: A) visão geral dos componentes B) imagem termográfica (operando com carga).

4.2.2 Cenário adverso: distorções harmônicas e afundamentos de tensão.

Conhecidas as particularidades de cada fonte a partir da alimentação senoidal, as mesmas foram submetidas a sinais distorcidos compostos de harmônicos de baixa frequência e comuns na rede elétrica. Inicialmente, as fontes foram alimentadas com sinal composto pela componente fundamental em 60 Hz e apenas uma componente harmônica de ordem ímpar: 3^a,

5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a (180 Hz, 300 Hz, 420 Hz, 540 Hz, 660 Hz e 780 Hz, respectivamente). Cada componente foi avaliado com percentual de 8%, 10% e 12%, resultando em níveis acima dos limites impostos pelas recomendações para as componentes individuais e acima do limite para distorção total, que é limitado para baixa tensão em no máximo 8%, conforme [22, 23 e 24] e 10% por [26]. Nestas condições foram realizados testes com as fontes A1 e B1.

Explorado o comportamento de cada fonte para as principais frequências, os testes passaram a ser compostos pela frequência fundamental e três componentes harmônicas bastantes comuns, principalmente em instalações residenciais (sistemas monofásicos): 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas, na proporção de 6:4:3, respectivamente. Este cenário se aproximou dos utilizados em [15] e [54] com relação às componentes e proporções utilizadas. Assim como nos testes com apenas uma componente, neste, o ângulo de fase de tais frequências foi configurado em 0° com relação à frequência fundamental. Posteriormente, a fim de avaliar o comportamento das fontes perante os mesmos níveis de distorção, mas com formatos de ondas do sinal de tensão diferentes e passando mais de duas vezes pelo zero em um mesmo ciclo (*zero crossing*), foram realizados testes defasando o ângulo entre as componentes harmônicas e a fundamental em 90° e 180°. Para o caso de 90° foi mantido o mesmo ângulo (-90°) para a 3^a e 7^a componentes, enquanto que para o 5^o harmônico, sempre foi o oposto (+90°). Para o caso de 180° o ângulo foi mantido o mesmo para as três componentes, haja vista não haver diferença na resultante se os mesmos estiverem com sinais invertidos (+180° e -180°).

A etapa com composição do sinal na frequência fundamental e as frequências harmônicas supracitadas iniciou-se com distorção harmônica total em 12% (acima dos limites propostos), mantendo sempre a proporção mencionada e aumentando o THD_v com passo de 2%, até que fosse notado algum indício de irregularidade na operação da fonte. O objetivo era submeter o equipamento avaliado até a máxima distorção harmônica suportada pelo mesmo,

ou seja, até que ocorresse sua avaria. Estas condições impostas aos OTs vão além das recomendações de testes para obtenção da eficiência energética de fontes, conforme [48], em que o THD_V não deve exceder 2% incluindo até a 13ª ordem harmônica e, portanto o valor de pico da tensão deve estar entre 1,34 e 1,49 do valor RMS. Já a IEC61000-3-2 [25] sugere o uso de sinal senoidal para os testes de avaliação da emissão de corrente harmônica, sendo aceito até 0,9% de 3ªh, 0,4% de 5ªh e 0,3% de 7ªh. Para tal, o pico de tensão deve compreender 1,4 a 1,42 vezes o valor RMS, sendo este valor alcançado dentro de 87° a 93° após passar pelo cruzamento em zero.

Outro cenário, no qual as fontes foram submetidas ao estresse, foi aplicando afundamentos de tensão em seu sinal de entrada. Inicialmente os afundamentos ocorreram com sinal senoidal, sendo posteriormente repetidos com sinal distorcido, utilizando as configurações anteriores para a composição harmônica.

A rotina relacionada aos afundamentos de tensão foi baseada na norma IEEE 1668-2017 [30], com o tempo entre uma queda de tensão e outra, associado ao tempo de atuação de um religador de tensão. Conforme [30], os religadores automáticos são dispositivos amplamente utilizados nas redes de distribuição para ajudar a restaurar a energia após uma falha transitória a jusante no circuito. Eles agem para testar o circuito se abrindo com intuito de que a falha já tenha sido eliminada até seu fechamento. Caso a falha tenha sido eliminada (falha temporária) a energia é restaurada a partir do religamento, do contrário, o religador faz três tentativas antes de ser bloqueado, necessitando de intervenção manual. As repetidas e rápidas operações de abertura e religamento são experimentadas por clientes próximos como sucessivas quedas de tensão, por vezes sentidas ao final da utilização do equipamento, como se fosse um evento único, caracterizado por uma combinação de sobretensão e queda à medida que o equipamento atua [30].

O procedimento adotado nos testes foi pautado na filosofia de religamento rápido, com o primeiro intervalo de 2 segundos, seguido por 15 segundos e o terceiro após 30 segundos, conforme [30], e representado através da Figura 20.

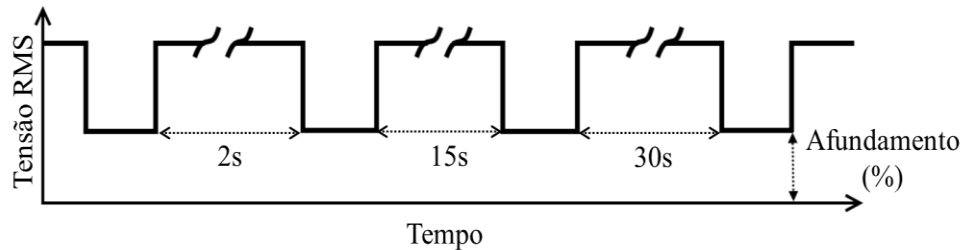


Figura 20 - Intervalo de tempo entre consecutivos afundamentos de tensão.

A sequência de afundamentos acima mencionada foi realizada para cada ponto como descrito na Tabela 14, lembrando que o sistema em questão é alimentado por circuito monofásico em 60 Hz, portanto compreendendo afundamentos do tipo I, conforme [30]. Desta forma, as fontes foram submetidas a um total de 12 afundamentos sucessivos para o mesmo sinal.

Além dos testes com tensão senoidal, também foram realizados testes com sinais distorcidos e com a mesma sequência de afundamentos. Contudo, como as características das fontes de alimentação já eram conhecidas, os testes que incluíram distorção de tensão começaram com 10% de THD_V , indo até 40% com passo de 10%.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Conforme mencionado, este trabalho buscou avaliar dois tipos de fontes de alimentação empregadas em computadores do tipo *desktop*: fontes com e sem corretor de fator de potência (PFC). A proposta inicial era assistir estes equipamentos frente a altas distorções harmônicas apenas, estando as componentes harmônicas em fase com a componente fundamental. Contudo, com o desenrolar do trabalho, surgiu à ideia de variar o ângulo entre a componente fundamental e as harmônicas, além de submeter os equipamentos a afundamentos de tensão concomitantemente às distorções harmônicas. No entanto, vários testes já haviam sido realizados e uma das fontes sofrido avaria anteriormente à decisão de realizar os novos experimentos, impossibilitando fazer comparação entre as quatro fontes em todos cenários contemplados.

Cabe ressaltar, ainda, que com base na Tabela 21 e Tabela 23, apresentadas em 4.2.1 e testes prévios, verificou-se que as fontes A1 e A2 resultaram em pequenas diferenças quanto às grandezas monitoradas, diferentemente das fontes do tipo B que, conforme mencionado, apresentavam alguns componentes distintos na construção. Tendo em vista a regularidade e similaridade entre os valores registrados para as fontes com PFC, além de facilidade na construção e visualização dos gráficos, a fonte A2 será omitida. Portanto, a partir dos testes em condições severas serão apresentadas comparações entre as fontes A1 e B1 e A1 e B2, conforme teste realizado.

Como observado na Tabela 21, verifica-se que as fontes quando estão sem carga, ou seja, próximas ao modo *stand by*, a distorção harmônica de corrente é superior aos casos em que as mesmas estão com carga, o que vai ao encontro das afirmações de [20]. Contudo, é válido lembrar que embora seja alta a distorção, a corrente é muito baixa, condição na qual não há preocupação com possíveis impactos na rede elétrica. Também, como esperado e abordado em [19], observa-se que as fontes do tipo A, que fazem uso de PFC, quando

conectadas às cargas apresentam menor distorção do sinal de entrada em comparação com as fontes do tipo B, que não têm este recurso. Tal premissa pode ser confirmada através da avaliação dos valores registrados para THD_1 e “fator de potência verdadeiro” (FP), ou seja, aquele que leva em consideração a distorção harmônica do sinal. Também, através da comparação do fator de deslocamento (FD), comumente denominado de fator de potência, cujos valores ficaram próximos aos mencionados em [37]: unitário para ambas as fontes com PFC e média de 0,89 para as fontes do tipo B (sem PFC).

A Figura 21 e a Figura 22, a partir da oscilografia das quatro fontes durante testes, com e sem carga, alimentadas com tensão senoidal, ilustram e reforçam as afirmações acima, quanto à similaridade entre os sinais das fontes do tipo A, que estão em fase com o sinal de tensão, e diferença entre as fontes do tipo A e B. As formas de onda das fontes B1 e B2 se diferenciam na magnitude, com B1 consumindo maior corrente. Contudo, ambas estão em fase com o sinal de tensão quando estão próximas ao modo *stand by* e adiantadas quando estão com carga em suas saídas.

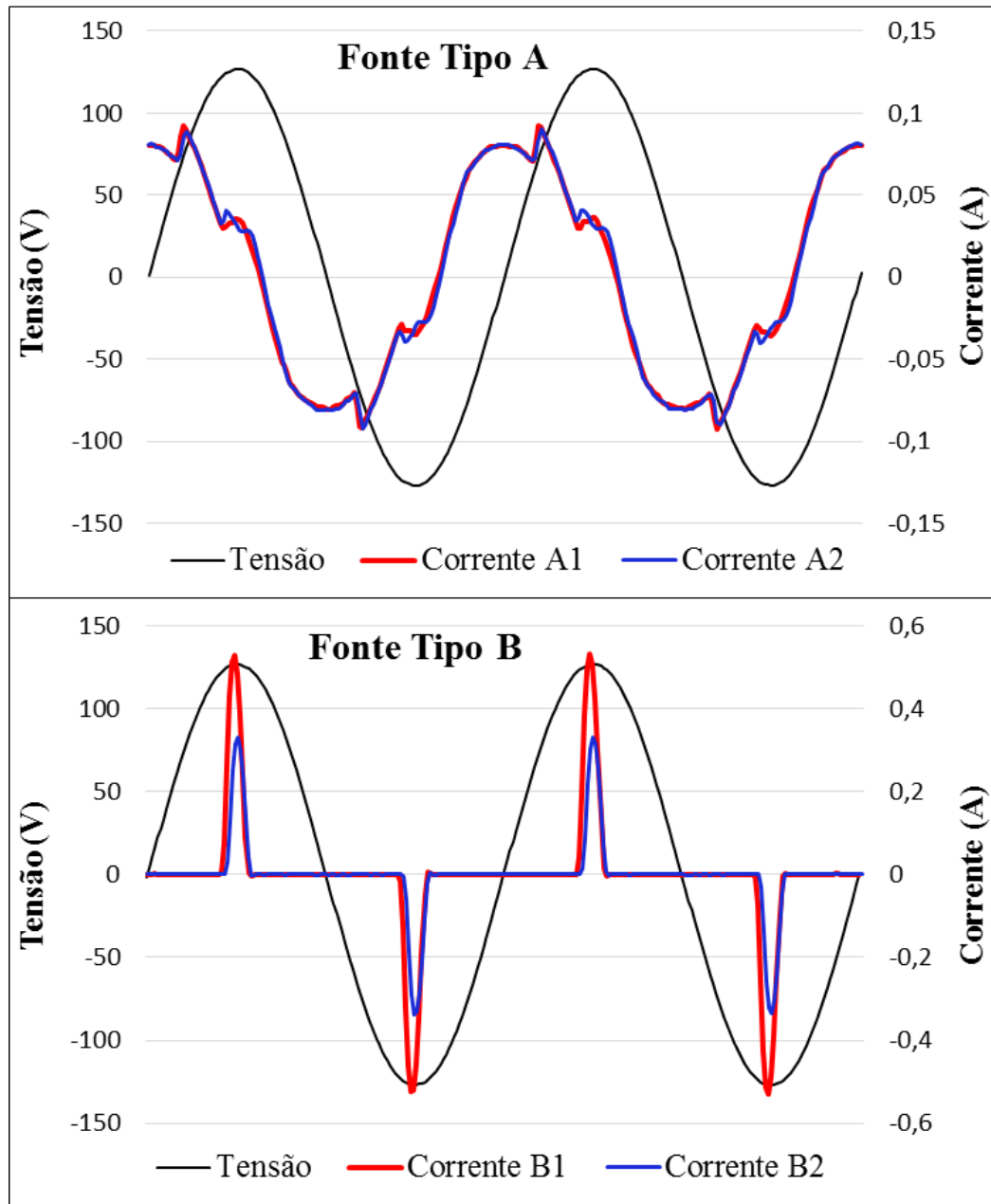


Figura 21 - Formas de onda das fontes do tipo A e B sem carga e sinal senoidal.

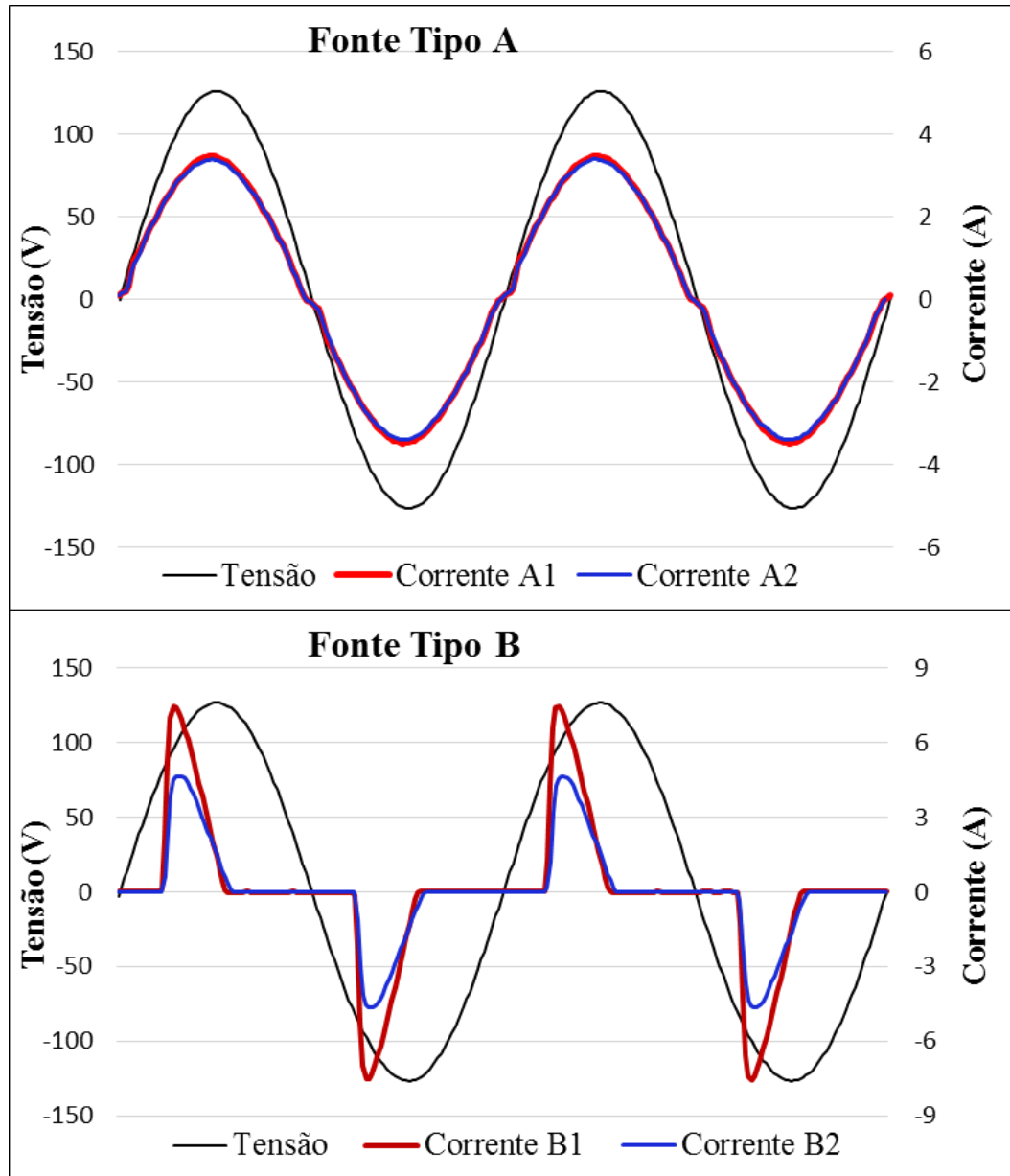


Figura 22 - Formas de onda das fontes do tipo A e B com carga e sinal senoidal.

5.1 Componentes individuais: fontes A1 e B1

Para esta etapa dos testes, foi utilizada uma componente harmônica por vez em fase com a componente fundamental: 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a ordens harmônicas submetidas com percentual de 8%, 10% e 12%. Portanto, acima do máximo valor indicado para distorção harmônica individual de 5%, conforme [22] e 6% para a 5^a harmônica segundo [21, 23 e 24].

A partir da Tabela 25 verifica-se que a fonte A1 demandou maior corrente RMS no teste com a 3ª harmônica seguida da 5ª ordem, chegando a uma média de 3,28 A para o teste de 10% de distorção. De forma geral, pode-se dizer que a corrente, assim como a potência ativa despendida diminuíram com o incremento da frequência harmônica e também com o aumento do percentual para a mesma componente harmônica. O mesmo é observado com a potência de saída, sinal CC, que sofreu pequena redução nos valores medidos. Já a potência reativa teve ligeira alteração: diminuindo com o incremento do percentual harmônico para a mesma componente e aumentando com a elevação da frequência harmônica.

Tabela 25 - Grandezas avaliadas para as componentes harmônicas individuais: fonte A1.

| Grandeza (entrada) | Percentual | 3° h | 5° h | 7° h | 9° h | 11° h | 13° h |
|------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | e componente harmônica | | | | | | |
| Corrente (A) | 8% | 3,30 | 3,25 | 3,22 | 3,22 | 3,23 | 3,21 |
| | 10% | 3,28 | 3,26 | 3,22 | 3,21 | 3,21 | 3,20 |
| | 12% | 3,25 | 3,25 | 3,22 | 3,23 | 3,23 | 3,23 |
| Potência ativa (W) | 8% | 414,01 | 404,34 | 403,42 | 402,24 | 403,05 | 401,32 |
| | 10% | 410,22 | 405,91 | 401,30 | 399,84 | 399,84 | 398,00 |
| | 12% | 404,34 | 403,35 | 399,08 | 400,66 | 400,22 | 399,18 |
| Potência reativa (var) | 8% | -33,32 | -32,41 | -33,63 | -33,89 | -34,54 | -34,06 |
| | 10% | -32,91 | -33,01 | -33,23 | -33,65 | -34,55 | -33,67 |
| | 12% | -32,41 | -32,71 | -32,96 | -33,40 | -34,34 | -33,70 |
| THD _I (%) | 8% | 6,41 | 10,22 | 8,63 | 9,09 | 9,83 | 10,75 |
| | 10% | 8,38 | 10,87 | 10,59 | 11,19 | 12,01 | 13,19 |
| | 12% | 10,22 | 12,75 | 12,76 | 13,33 | 14,33 | 15,45 |
| Potência de saída (W) | 8% | 371,84 | 365,44 | 362,07 | 362,91 | 359,95 | 357,12 |
| | 10% | 371,76 | 358,78 | 361,02 | 361,26 | 361,82 | 360,93 |
| | 12% | 366,59 | 368,43 | 360,11 | 362,50 | 362,39 | 360,48 |

Fonte: do autor.

Devido ao PFC empregado na fonte A1, a distorção total de corrente foi baixa comparada aos valores de distorção do sinal recebido (tensão de alimentação). Com exceção da 3ª harmônica, que manteve o THD_I menor que a distorção aplicada, para as demais ordens houve aumento da distorção total, chegando a 15,45% para 12% de 13ª harmônica. Desta forma, verifica-se que o corretor de fator de potência teve eficácia e manteve a forma de onda do sinal de corrente próximo ao sinal de tensão, mesmo com percentuais altos de distorção, podendo ser observado também a partir da Figura 23.

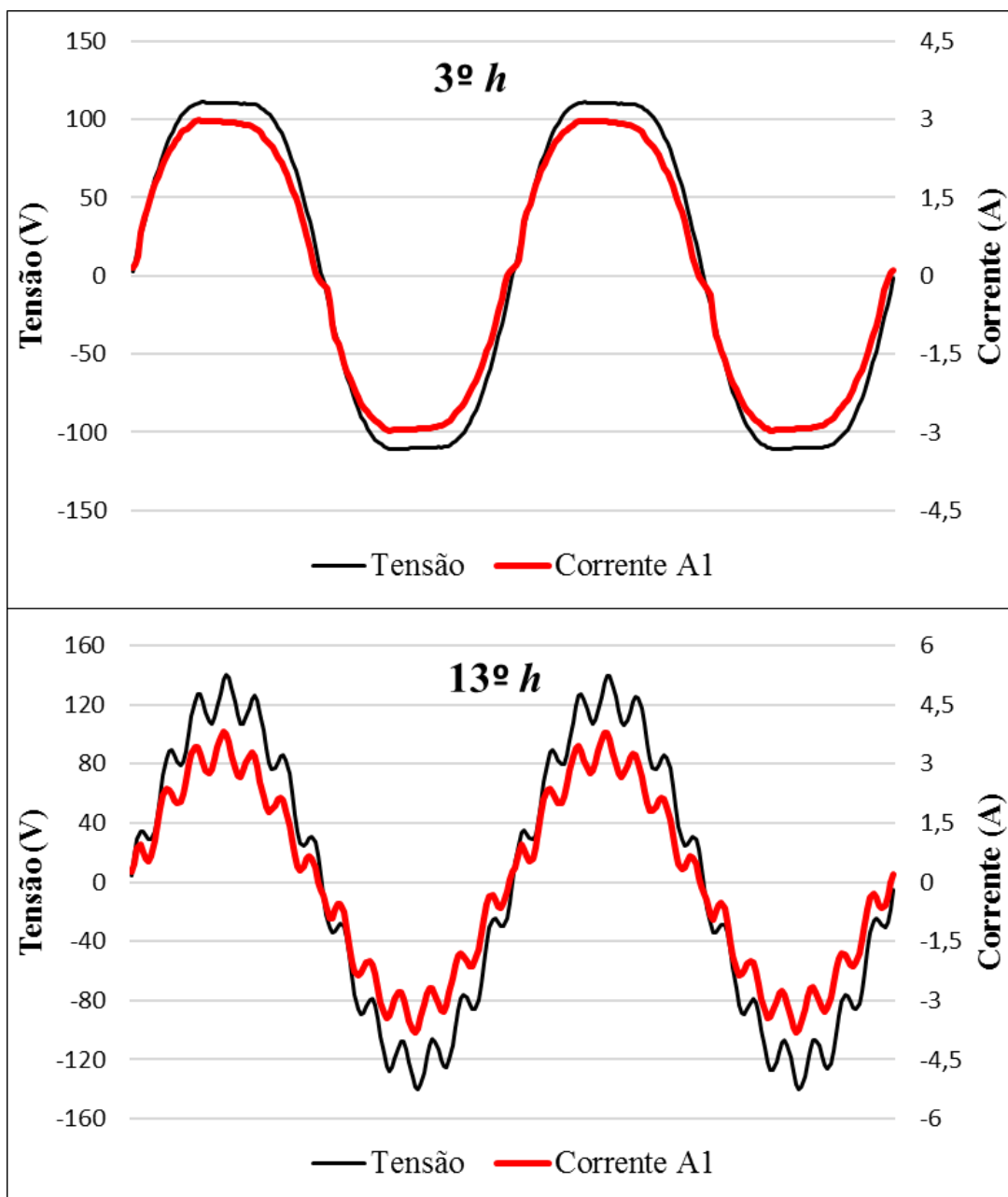


Figura 23 - Sinal de tensão e corrente para 12% de distorção de 3ª e 13ª ordens harmônicas.

A fonte B1, diferentemente da fonte A1, demandou maior corrente à medida que se aumentou o percentual de uma mesma componente harmônica, assim como para o incremento das ordens harmônicas, chegando à média de 5,38 A_{RMS} para 12% de 11ª ordem harmônica, como apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Grandezas avaliadas para as componentes harmônicas individuais: fonte B1.

| Grandeza (entrada) | Percentual e componente harmônica | Percentual | | | | | |
|------------------------------|--|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 3° h | 5° h | 7° h | 9° h | 11° h | 13° h |
| Corrente (A) | 8% | 4,14 | 4,14 | 4,98 | 4,25 | 4,78 | 5,02 |
| | 10% | 4,26 | 4,29 | 5,10 | 4,50 | 5,15 | 5,09 |
| | 12% | 4,36 | 4,42 | 5,17 | 4,66 | 5,38 | 5,22 |
| Potência ativa (W) | 8% | 287,82 | 298,63 | 297,57 | 290,67 | 293,85 | 289,55 |
| | 10% | 280,44 | 296,86 | 291,80 | 289,33 | 294,45 | 281,13 |
| | 12% | 273,51 | 293,71 | 285,92 | 285,47 | 291,25 | 275,95 |
| Potência reativa (var) | 8% | 230,48 | 89,26 | 154,49 | 101,67 | 116,89 | 108,34 |
| | 10% | 245,90 | 79,18 | 146,45 | 92,99 | 108,95 | 99,66 |
| | 12% | 253,51 | 69,92 | 137,99 | 85,51 | 100,75 | 93,57 |
| THD _I (%) | 8% | 100,37 | 134,57 | 158,52 | 142,24 | 161,96 | 178,74 |
| | 10% | 103,12 | 144,46 | 169,14 | 157,27 | 180,35 | 189,50 |
| | 12% | 107,47 | 154,48 | 178,14 | 168,61 | 194,72 | 200,97 |
| Potência de saída (W) | 8% | 235,92 | 224,27 | 233,22 | 224,73 | 226,43 | 224,45 |
| | 10% | 234,34 | 224,70 | 229,67 | 224,64 | 226,06 | 223,19 |
| | 12% | 233,29 | 223,99 | 228,95 | 224,62 | 223,68 | 224,29 |

Fonte: do autor.

Quanto à potência ativa, a mesma diminuiu com o aumento do percentual harmônico para a mesma componente, mas não apresentou regularidade ao elevar a frequência, ora baixando, ora aumentando conforme a componente harmônica. Comportamento similar é observado na potência de saída.

Com exceção da 3ª harmônica, em que a potência reativa aumentou com a elevação do percentual desta componente, para as demais foi gerado menor reativo à medida que se aumentava a frequência e percentual das componentes harmônicas. Cabe pontuar que para o 5º harmônico foi gerado menor reativo e consumido maior potência ativa.

Conforme esperado, o nível de distorção harmônica na entrada da fonte B1 foi bastante elevado, chegando à média de 200,97% para a inserção de 12% de 13ª ordem harmônica. Neste teste o sinal da corrente apresentou dois picos a cada meio ciclo, conforme apresentado na Figura 24.

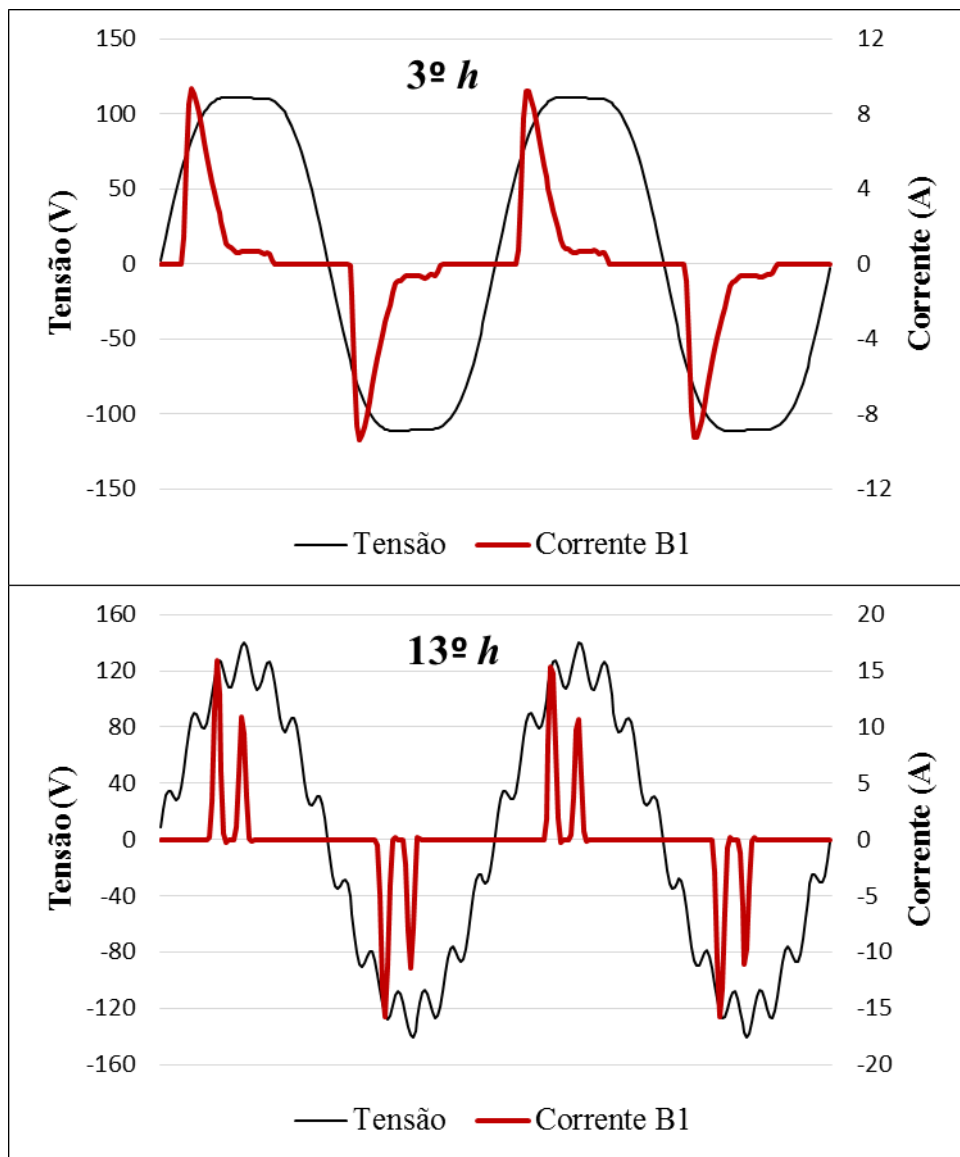


Figura 24 - Sinal de tensão e corrente para 12 % de distorção de 3ª e 13ª ordens harmônicas.

A Figura 25, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 27 permitem fazer um breve paralelo entre as fontes A1 e B1 para o teste com 12% de distorção para as seis componentes harmônicas avaliadas. Desta forma, fica fácil evidenciar a estabilidade da corrente consumida pela fonte A1 diante das diferentes distorções, assim como o crescimento regular do THD_1 com o aumento da frequência. Enquanto, a fonte B1 teve a corrente e THD_1 aumentados com o incremento da ordem harmônica, embora não seguindo uma tendência.

Quanto à tensão de saída, os sinais ficaram praticamente constantes para ambas as fontes. Conforme já evidenciado nos testes com tensão de alimentação senoidal, a saída $12 V_{CC}$ da fonte B1 é um pouco maior que a A1, que por sua vez, tem as tensões $5 V_{CC}$ e $3,3 V_{CC}$ maiores. Logo, pode-se afirmar que para estes testes as duas fontes conseguiram manter estável a tensão de saída, quesito importante na concepção de fontes, conforme abordado em [36].

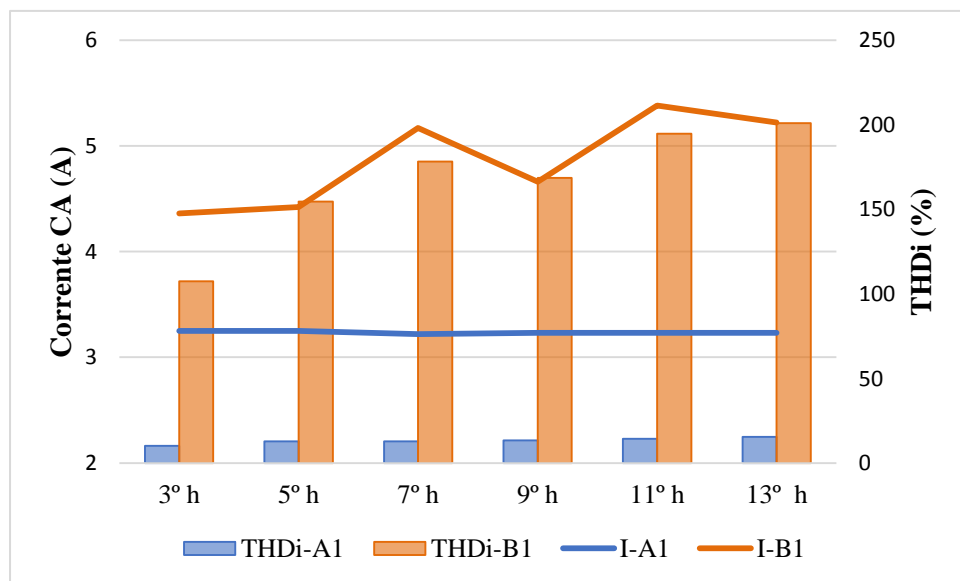


Figura 25 - Corrente eficaz e THD_1 para distorção de 12%.

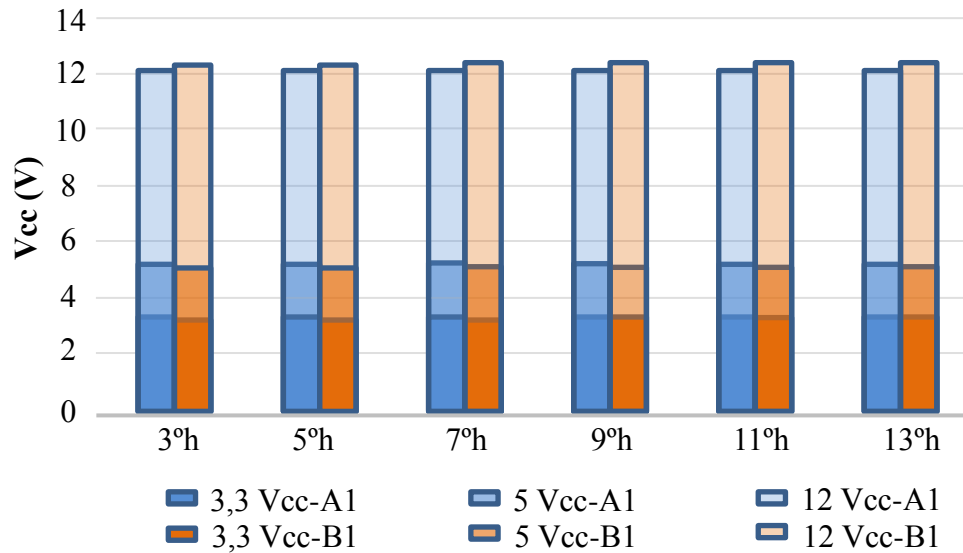


Figura 26 - Tensão de saída para 12% de distorção harmônica.

Como observado nos testes com tensão senoidal, também foi verificado durante os testes com distorção harmônica, que a fonte A1 gera mais calor em sua saída, enquanto que a entrada da fonte B1 é a área mais quente. Contudo, vale lembrar que a potência demandada na saída de A1 é maior, conforme justificado em 4.1.

O gráfico ilustrado pela Figura 27 apresenta a relação entre as temperaturas na entrada e saída das fontes com relação à temperatura ambiente. Desta forma, “ ΔT_{in} ” corresponde à diferença de temperatura na região de entrada das fontes e a temperatura ambiente e “ ΔT_{out} ” a diferença entre a temperatura na região de saída das mesmas e a temperatura ambiente. Verifica-se que para a fonte A1 a maior temperatura foi registrada no teste com 7ª harmônica, chegando à diferença de 15,04 °C na saída, com relação a temperatura ambiente. Neste teste também ficou evidente temperatura mais elevada para a fonte B1, tanto em sua entrada, como na saída (9,57 °C e 2,71 °C, respectivamente). Porém, para a fonte B1 a maior temperatura na entrada foi com a 13ª harmônica, chegando à diferença de 10,24 °C, que corresponde ao teste em que a corrente consumida e THD_I também foram elevados.

No geral, a temperatura para ambas as fontes foi maior comparada aos testes sem distorção harmônica, em especial a saída da fonte A1, que apresentou pequena variação, haja

vista, a tensão de saída permanecer constante, implicando em corrente de saída também constante. Já a temperatura do canal de entrada da fonte B1 teve comportamento similar ao da corrente e THD_1 observados também na entrada, com variação conforme distorção harmônica inserida.

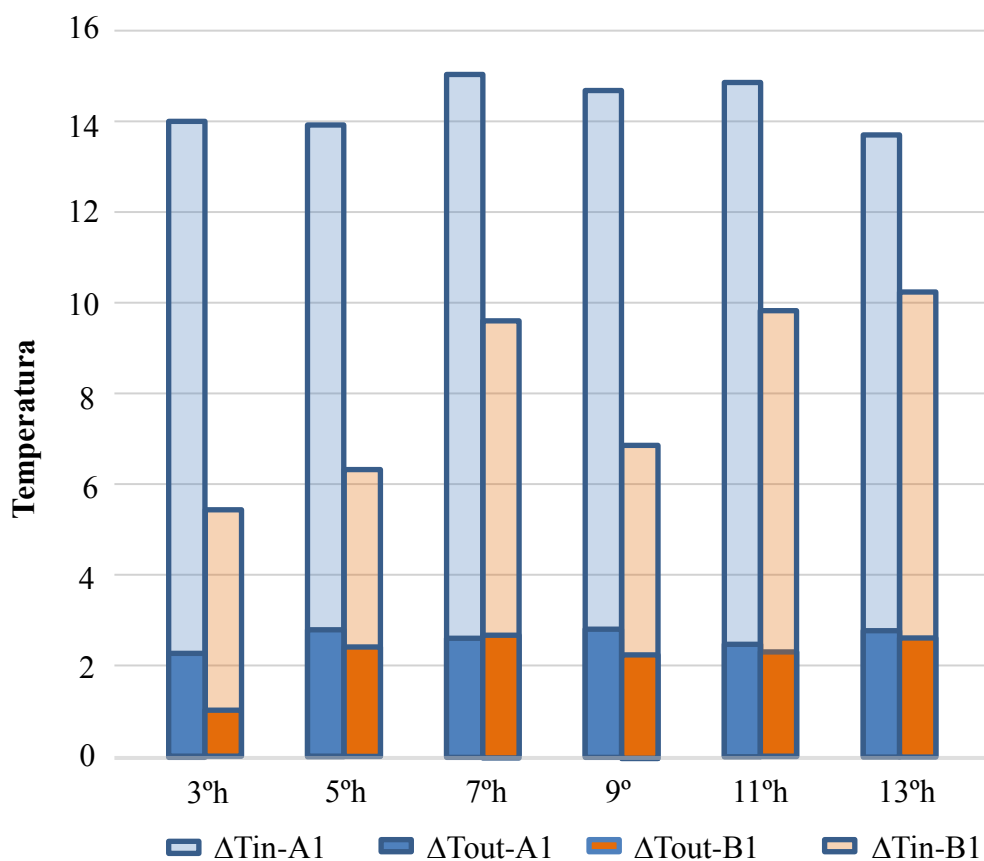


Figura 27 - Temperatura na entrada e saída das fontes alimentadas com 12% de distorção harmônica.

5.2 Combinação de 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas com defasagem angular nula: fonte A1, B1 e B2.

Para este cenário os testes passaram a ser compostos pela frequência fundamental e as três primeiras componentes ímpares: 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas, todas iniciando em zero grau, portanto em fase com a componente fundamental. A magnitude de cada componente

seguiu a proporção de 6:4:3, respectivamente, com o THD_V iniciando em 12%, acima do limite de 10% recomendado por [26].

A ideia inicial era aumentar o THD_V com passo de 2%. Porém, conforme situação observada, o mesmo foi elevado com passo de 1%. Nesta condição, alguns cenários foram realizados com uma fonte e outra não, como exemplo tem-se o caso de 31% de THD_V , que não foi realizado com a fonte A1.

A Figura 28, Figura 29 e Figura 30 ilustram o comportamento das variáveis potência ativa, reativa e corrente registradas na entrada das fontes A1, B1 e B2, assim como a potência ativa na saída das mesmas. É válido lembrar que a potência de saída é o resultado da soma dos produtos da tensão pela corrente, para os canais monitorados: $12 V_{CC}$, $5 V_{CC}$ e $3,3 V_{CC}$.

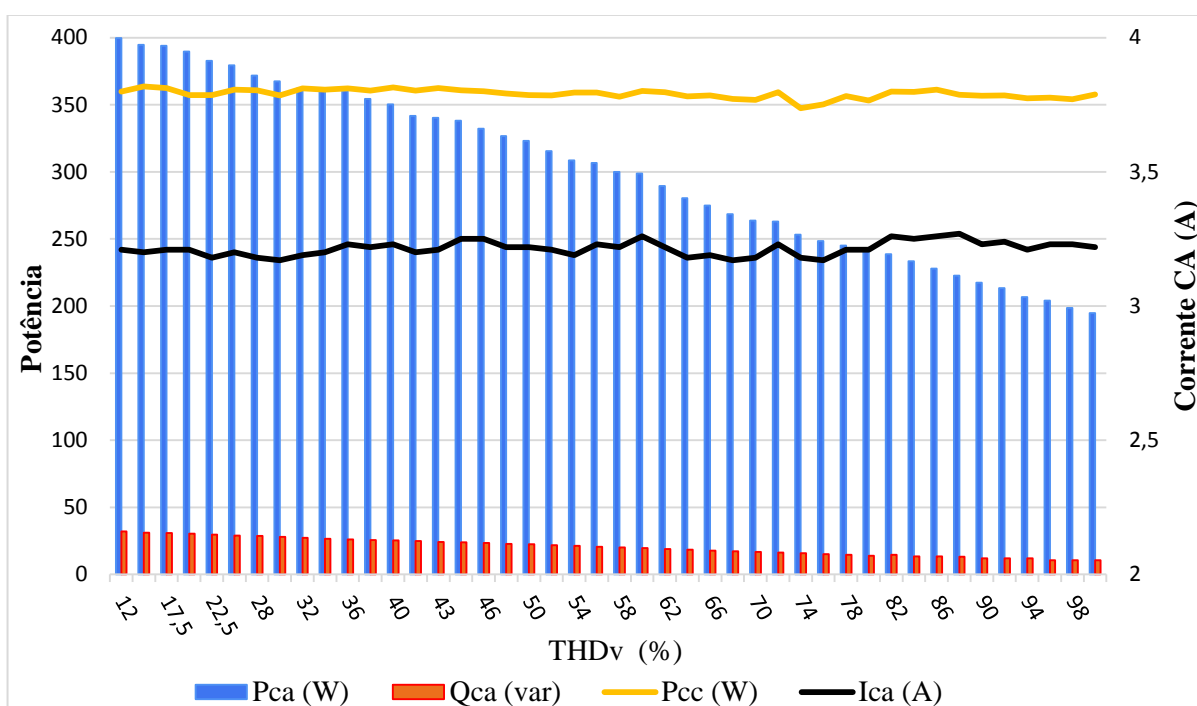


Figura 28 - Variáveis monitoradas em testes com distorção composta por 3ª, 5ª e 7ª componentes harmônicas: fonte A1.

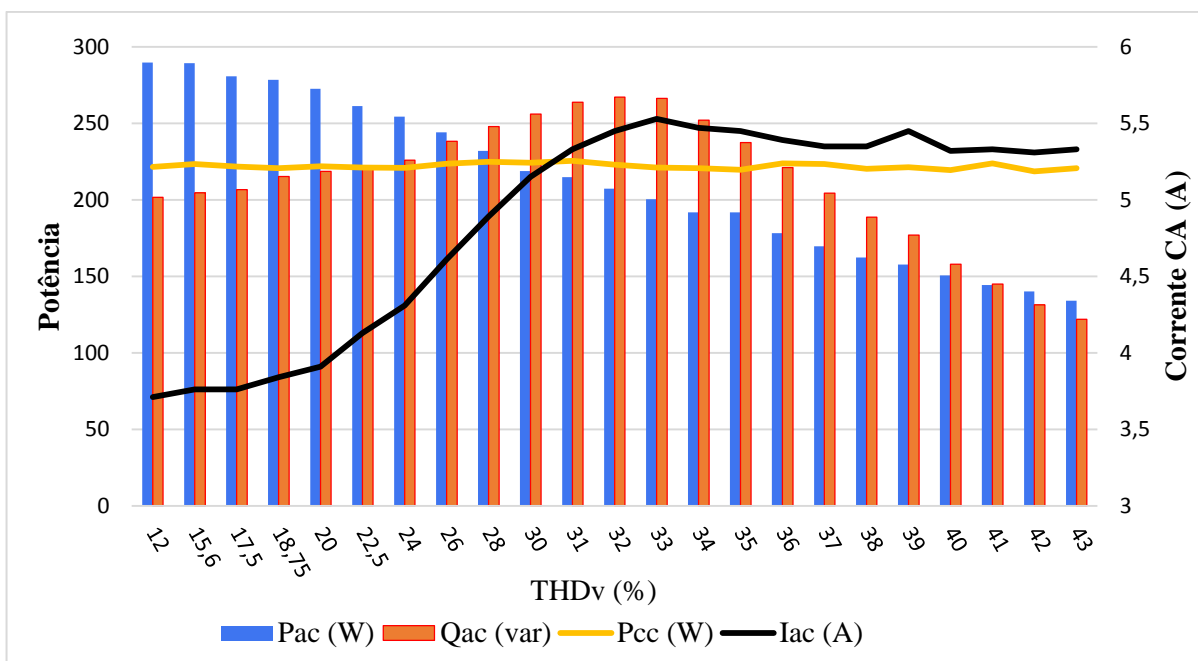


Figura 29 - Variáveis monitoradas em testes com distorção composta por 3ª, 5ª e 7ª componentes harmônicas: fonte B1.

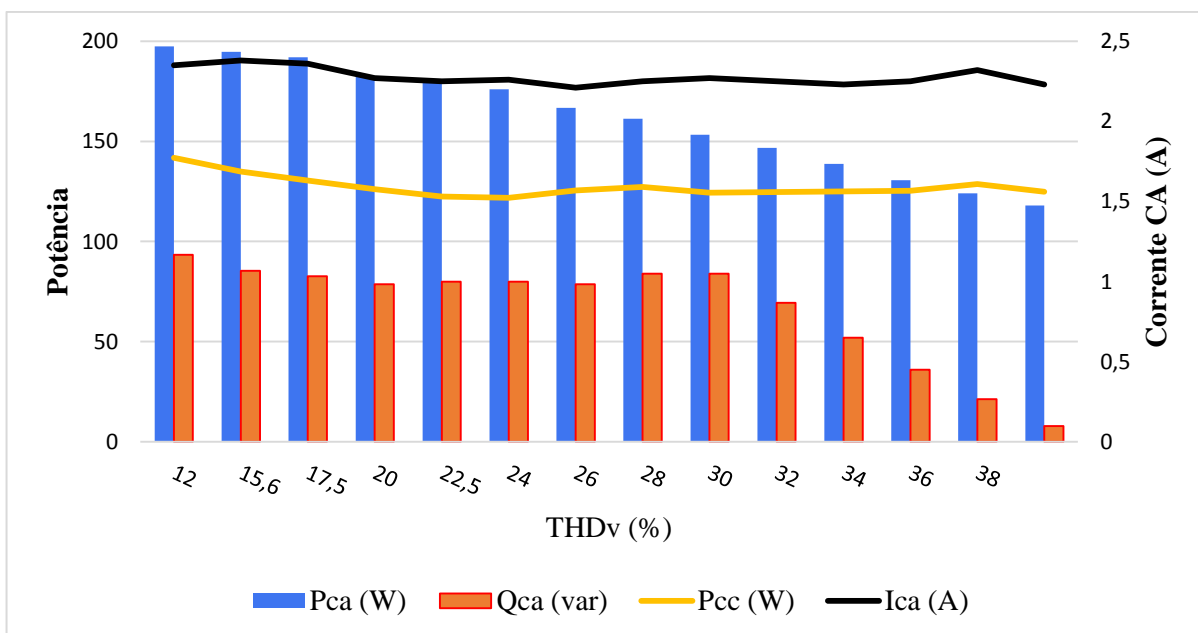


Figura 30 - Variáveis monitoradas em testes com distorção composta por 3ª, 5ª e 7ª componentes harmônicas: fonte B2.

Como a fonte A1 não apresentou anormalidade e a temperatura se manteve regular, foram realizados testes até 100% de THD_v com o percentual de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas de 77%, 51,2% e 38,3%, respectivamente.

Pela Figura 28 observa-se que a potência ativa e reativa na entrada da fonte A1 diminuiram a medida que o percentual harmônico foi elevado, chegando a cerca de 50% do

valor inicial para o teste com 100% de THD_v. Contudo, a corrente eficaz sofreu pouca variação ao longo dos testes, assim como os sinais de saída, na qual a potência se manteve regular, tendo em vista que os três canais de tensão se mantiveram constantes, conforme ilustrado pela Figura 31, cuja nomenclatura “V - 12V” corresponde ao registro de tensão CC do canal de 12 V na saída da fonte, “V - 5V” ao canal de 5 V e “V - 3,3V” a saída de 3,3 V.

Quanto à temperatura, pode-se dizer que a fonte A1 conseguiu manter os níveis observados durante os testes sem distorção harmônica, variando, principalmente conforme a variação da temperatura ambiente. A maior média registrada foi de 36,5 °C durante o teste com 92% de THD_v na região de saída da fonte, enquanto que a região de entrada atingiu 26,4 °C para a temperatura ambiente de 22,5 °C. A Figura 32 permite verificar a variação da média da temperatura durante os diferentes percentuais harmônicos para a fonte A1, onde “T Room” corresponde à temperatura ambiente, “T In” a temperatura na região de entrada da fonte e “T Out” a temperatura na região de saída da fonte.

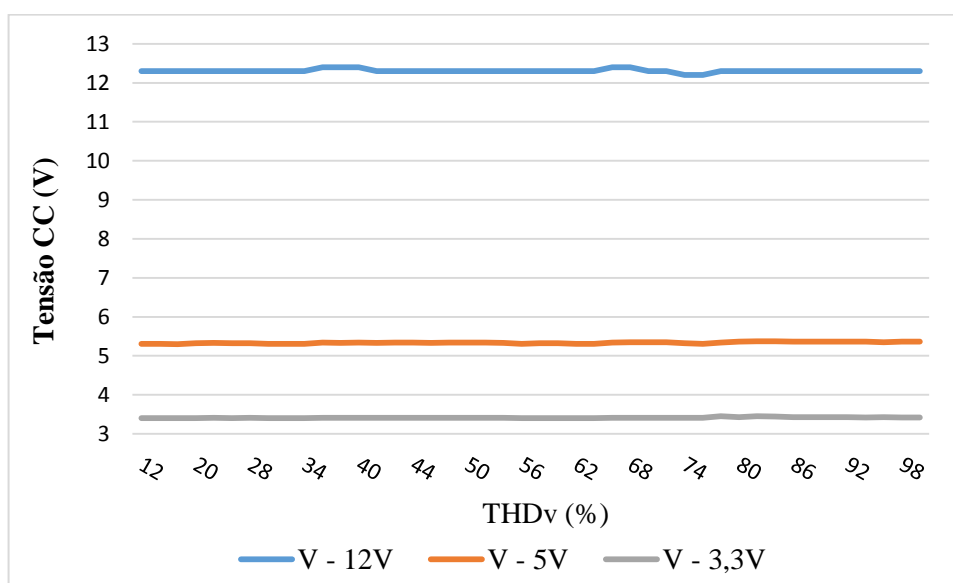


Figura 31 - Tensão de saída (CC) da fonte A1 durante os testes com distorção harmônica.

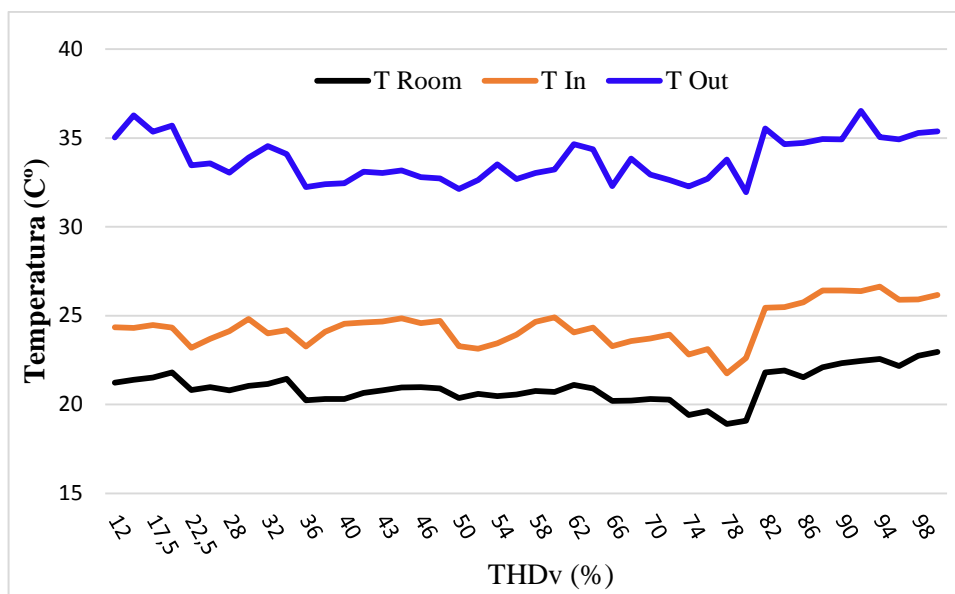


Figura 32 - Variação de temperatura durante os testes com distorção harmônica: fonte A1.

Diferentemente da fonte A1, a fonte B1 apresentou desgaste e aumento da temperatura durante os testes, levando o autor a elevar o THD_V com passo de 1%, a fim de obter mais detalhes. Logo, verifica-se a partir da Figura 29, que a potência ativa diminuiu gradativamente à medida que se aumentou o THD_V , enquanto a potência reativa teve comportamento similar a corrente de entrada até 32% de distorção, em que ambas as variáveis se elevaram. Após este teste a corrente teve ligeiro declínio de $5,53 A_{RMS}$ para $5,33 A_{RMS}$, enquanto a potência reativa saiu de $267,2 VAr$ para $122 VAr$, 65% menor, e 25% menor comparada a potência reativa no teste com sinal senoidal. Embora a potência de saída tenha se mantido constante ao longo dos testes e a corrente aparentemente estável após o teste com distorção de 40%, a temperatura teve comportamento ascendente desde o início dos testes. A partir do THD_V de 26% a elevação da temperatura tornou-se mais notória, chegando a $41,77^\circ C$ durante o teste de 43% de distorção, momento na qual a mesma sofreu avaria e parou de funcionar.

A Figura 33 e Figura 34 mostram o comportamento da tensão de saída (CC) e temperatura durante o cenário com distorção harmônica até a queima da fonte B1. As nomenclaturas das legendas correspondem às utilizadas na Figura 31 e Figura 32.

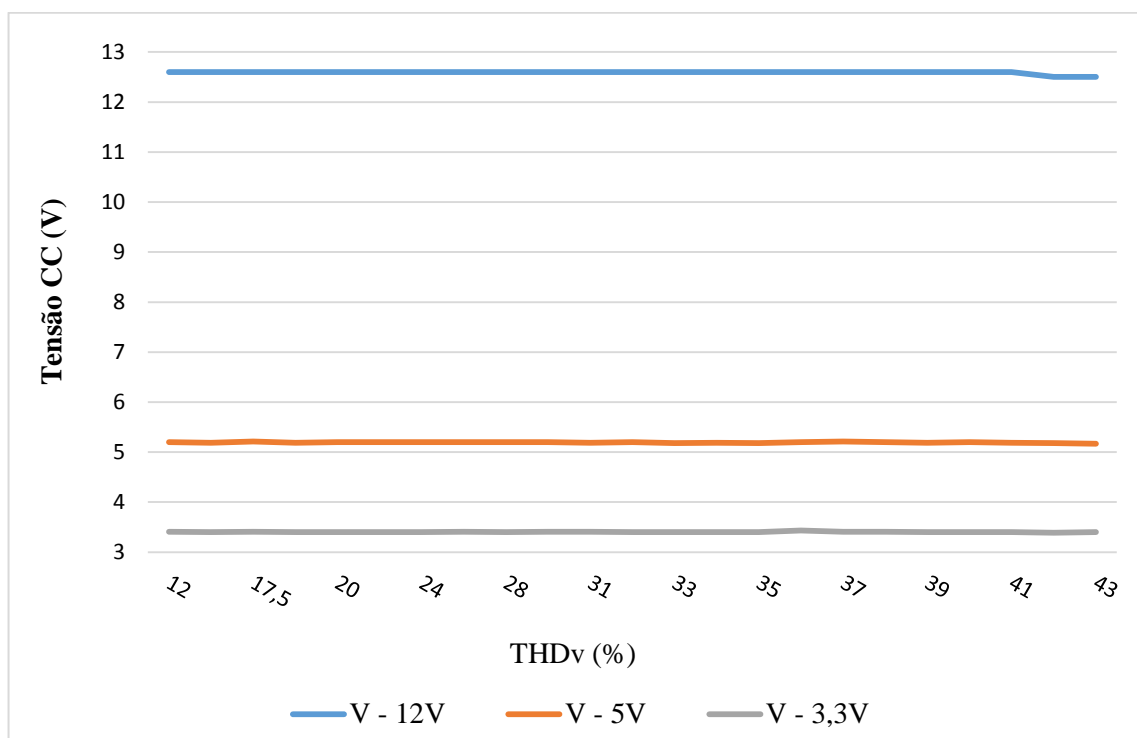


Figura 33 - Tensão de saída (CC) da fonte B1 durante os testes com distorção harmônica.

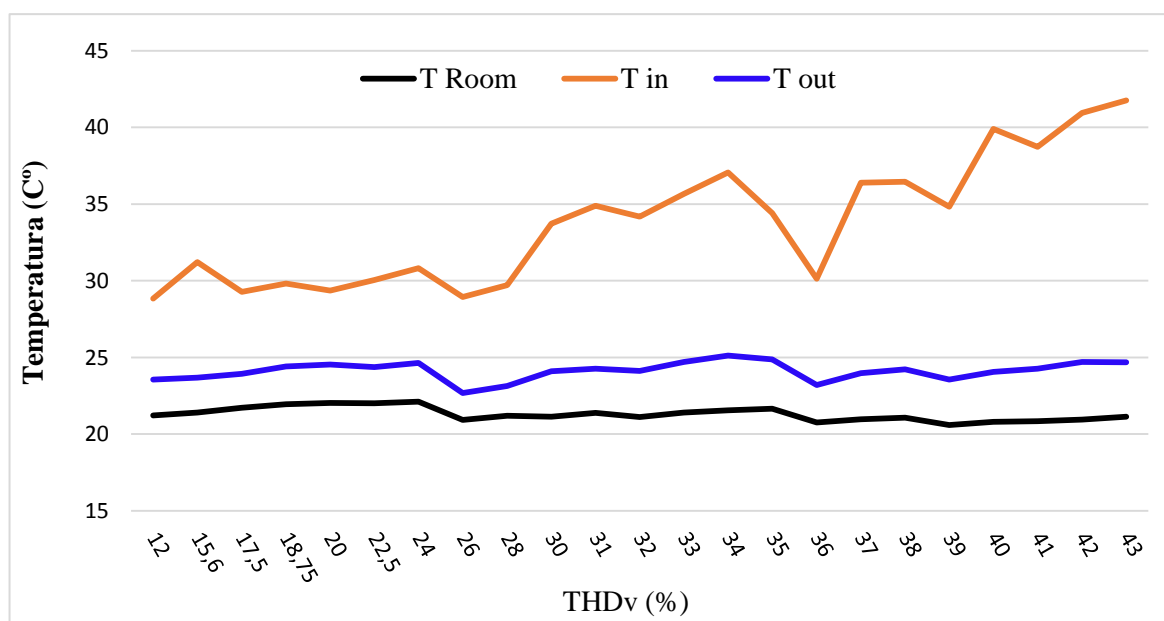


Figura 34 - Variação de temperatura durante os testes com distorção harmônica: fonte B1.

Após o teste de 30% de THD_V , era visível uma rachadura no termistor ligado ao circuito de entrada da fonte B1, e a medida que a distorção da tensão aumentava, este componente mudava de cor de preto para branco, e a rachadura se expandia como pode ser observado na Figura 35. Durante o teste com 43% de distorção da tensão o termistor se rompeu e um de seus terminais fechou curto circuito em uma trilha da placa, levando a atuação do fusível de proteção de entrada.

O termistor é um componente geralmente ligado em série aos circuitos de entrada de equipamentos, tendo as fontes de alimentação como exemplo. Tem a finalidade de proteger o circuito variando a sua resistência em função da temperatura, principalmente durante correntes transitórias provenientes de acionamentos. Segundo [55], a resistência do termistor empregado, tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), cai rapidamente para um valor muito baixo durante a energização, sendo a maneira mais econômica de reduzir a corrente de pico e proteger os componentes eletrônicos sensíveis contra danos.

Conforme a folha de dados do componente [55], a corrente máxima em regime permanente deve ser de 3 A e sua resistência de 5Ω em 25°C , sendo sua faixa de operação de -55 a 200°C e seu valor ôhmico aproximado para a corrente máxima igual a $0,210 \Omega$. Desta forma, o termistor operou sempre em condição de estresse, pois como verificado, a corrente média era superior a 3,5 A, corroborando com a elevada temperatura observada a partir das imagens termográficas, que acusavam temperatura média de 85°C . A Figura 36 indica o local do termistor e ilustra o último registro obtido minutos antes da fonte parar de funcionar.

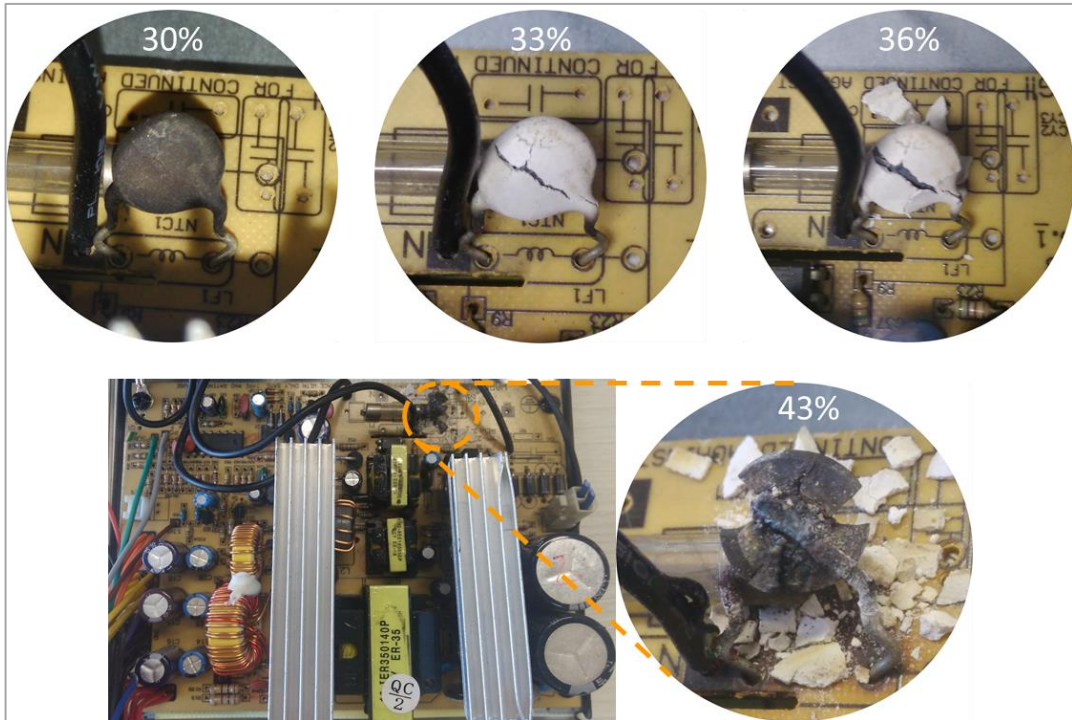


Figura 35 - Evolução da avaria ocorrida na fonte B1 de 30% de distorção até a queima.

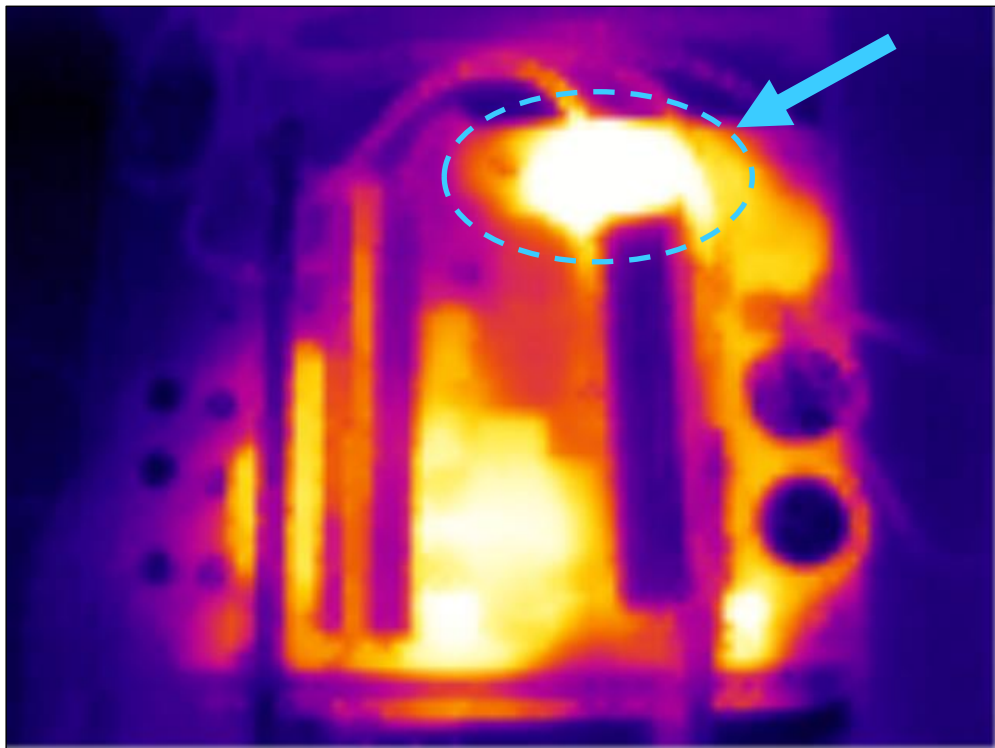


Figura 36 - Imagem termográfica da fonte B1 com 43% de THDv.

Para a fonte B2, a potência ativa reduziu à medida que se aumentou a distorção do sinal de tensão, assim como observado nas fontes citadas anteriormente. Contudo, a potência reativa diminuiu até o teste com 20% de THD_V , passando a partir deste a elevar-se até 30% de distorção, na qual posteriormente voltou a reduzir, assemelhando-se a fonte B1. Já a corrente até o teste realizado não apresentou grandes variações, apenas 0,17 A entre a maior e menor média de valores registrados (THD_V 15,6% e THD_V 26%). Contudo, é válido ressaltar que a potência demandada por esta fonte foi bem menor que a fonte B1 (mesmo modelo), além da potência de saída, que era baixa mesmo para o sinal senoidal: 12,5%, 16% e 2,8% menores que os valores nominais dos respectivos canais de 12 V, 5 V e 3,3 V.

A Figura 37 e Figura 38 apresentam a variação de tensão e temperatura durante os testes realizados com a fonte B2, na qual verifica-se que as tensões dos canais de 3,3 V e 5 V mantiveram-se regulares, enquanto que o sinal do canal de 12 V sofreu redução com a elevação da distorção até o teste com THD_V de 24%. Posteriormente, houve elevação do sinal, que se manteve regular e encerrando o teste com 40% de distorção com 9,53 V_{CC} , ou seja, 20,6% menor que o valor nominal.

Os registros de temperatura se mantiveram regulares, com elevação observada a partir do teste com 34% de distorção até 38%, havendo queda para o teste com 40% de THD_V . Contudo, é válido ressaltar que houve elevação da temperatura ambiente a partir do teste com 28% de THD_V , porém, consideravelmente menor no último teste (40% THD_V).

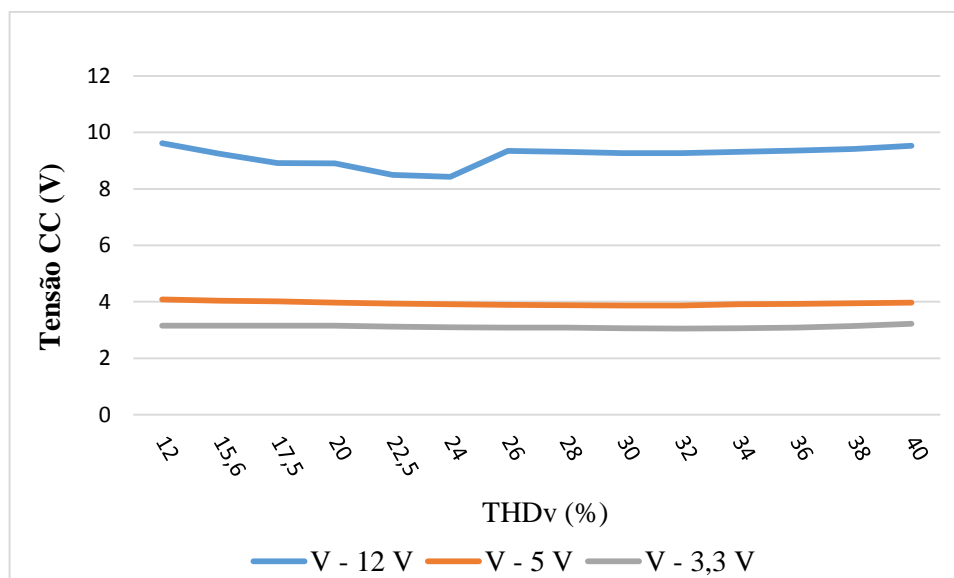


Figura 37 - Tensão de saída (CC) da fonte B2 durante os testes com distorção harmônica.

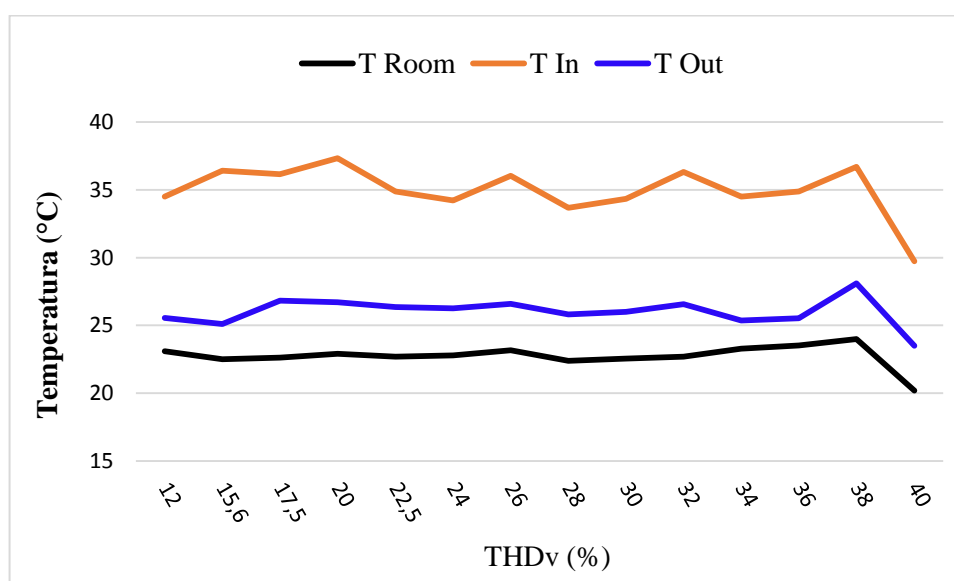


Figura 38 - Variação de temperatura durante os testes com distorção harmônica para fonte B2.

Em linhas gerais, a fonte A1 (modelo com PFC) apresentou maior imunidade para os testes aplicados neste cenário, além de conseguir manter os níveis de saída dentro dos limites estabelecidos em norma ($\pm 5\%$), mesmo submetida à distorção de 100% da tensão de entrada. O THD_I consumido quando submetida à alimentação com sinal senoidal foi bastante baixo, 4,34%, ou seja, ela consumia um THD de corrente correspondente à tensão aplicada, chegando a 109,04% no caso de 100% de THD_V. Por outro lado, as fontes B1 e B2, modelos

sem circuito PFC, se mostraram mais vulneráveis aos testes aplicados, consumindo altas correntes harmônicas. Para a alimentação com sinal senoidal o THD_I para a fonte B1 foi de 105,30% e B2 de 97,61%, sendo que nos últimos testes aplicados o valor foi até 3 vezes maior, chegando a 326,96% de THD_I para a fonte B1 no teste com THD_V de 43% e 209,09% para a fonte B2 no teste com 40% de distorção.

Conforme Figura 39, até 20% de THD_V a distorção de corrente da fonte B2 foi maior do que a fonte B1, e a partir deste, o THD_I da fonte B1 passou a ser maior, mas ambos seguindo a mesma tendência. Comparando o THD_I do último teste realizado com a fonte B2 (40%) e as demais, tem-se que a fonte A1 apresentou 40,48% de distorção e a B1 o maior valor, 268,14%.

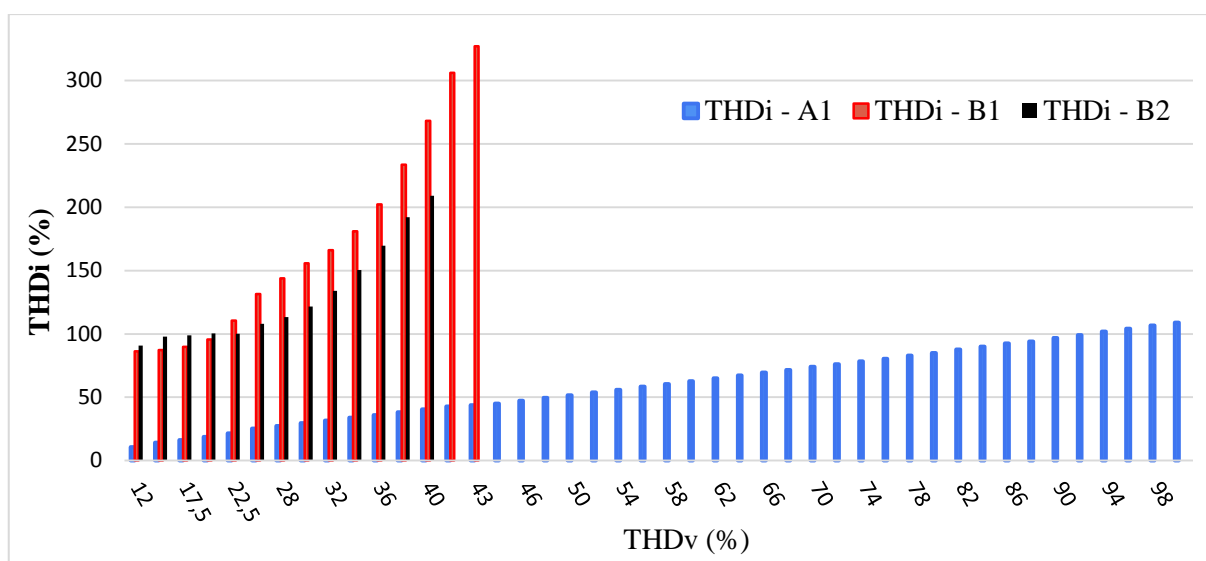


Figura 39 - Evolução do THD_I das fontes A1, B1 e B2 para diferentes percentuais de distorção do sinal de tensão.

Com relação às componentes harmônicas de corrente, para este cenário houve variação no perfil dos harmônicos consumidos comparados a ocasião quando as fontes foram alimentadas com sinal senoidal. A fonte A1 conforme mencionado, reproduziu o sinal de corrente em função da tensão, consumindo apenas as 3^a, 5^a e 7^a componentes harmônicas nas proporções do sinal de tensão gerado. Em contrapartida, as fontes B1 e B2 consumiram

correntes harmônicas de ordens superiores, porém com perfil distinto ao observado quando alimentadas com sinal sem distorção, tendo como exemplo a terceira componente que deixou de ser predominante.

A Figura 40 apresenta o espectro harmônico das três fontes para o cenário com THD_v de 40%.

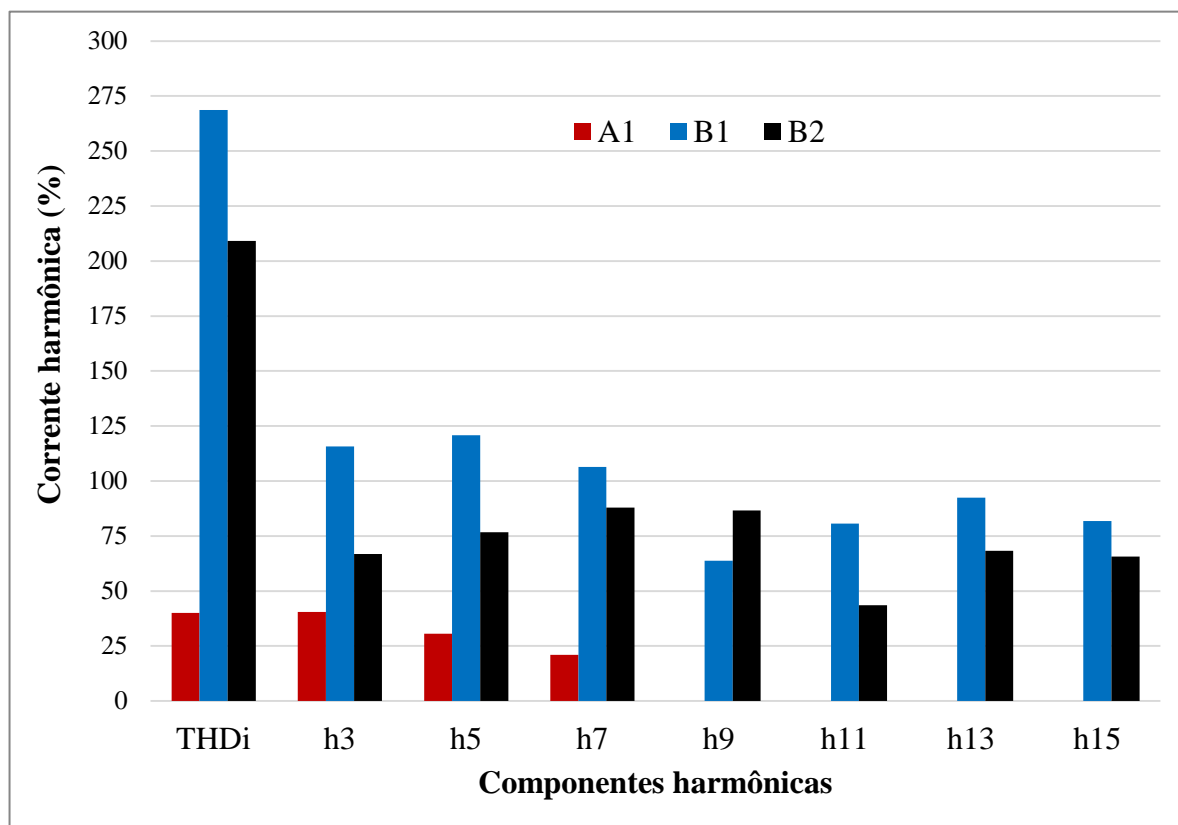


Figura 40 - Espectro harmônico de corrente e THD_i das fontes A1, B1 e B2 para 40% de THD_v .

Como visto na Figura 15, a corrente lida na entrada das fontes sem PFC é caracterizada por uma onda de pulso, portanto com THD_i alto. Ao serem submetidas a 40% de distorção na forma de onda do sinal de entrada, tiveram um aumento na quantidade e altura dos pulsos de corrente, ficando com 4 pulsos de tamanhos diferentes a cada meio ciclo. Contudo, o primeiro pulso de cada meio ciclo foi maior, ocasionando em altas correntes de pico, como $23,12 A_{pico}$ para a fonte B1 e $7,35 A_{pico}$ para fonte B2. A corrente de pico da fonte B1 foi consideravelmente elevada, resultando em $5,32 A_{RMS}$, provavelmente levando ao

estresse do termistor, diferentemente da fonte B2, cuja corrente eficaz foi de 2,23 A_{RMS} . Tendo em vista que os termistores de ambas as fontes eram iguais, supõe-se que a fonte B2 possa sofrer alguma avaria por parte deste componente com THD_V superior a 43%, haja vista a menor corrente circulando pelo mesmo. Em contrapartida, a fonte A1 possui uma forma de onda de corrente corresponde à forma de onda da tensão de entrada, apresentando registro médio de 3,23 A_{RMS} para 4,12 A_{pico} para o mesmo nível de distorção, sendo que para o último teste (100% de THD_V) a corrente de pico passou para 6,04 A_{pico} e a corrente eficaz se manteve no mesmo valor.

Para muitas cargas, as correntes harmônicas não estão correlacionadas às tensões harmônicas, que geralmente apresentam pequenas magnitudes, e desta forma, em muitos casos não é transferida nenhuma energia útil através das tensões e correntes harmônicas. No entanto, para fontes de alimentação com PFC, o ângulo de cada ordem de corrente harmônica corresponde ao ângulo da tensão harmônica, de modo que a energia útil é realmente transferida com as tensões e correntes harmônicas. Portanto, há melhor aproveitamento energético, caso que ocorre com a fonte A1[56].

A Figura 41 permite comparar a forma de onda da corrente das três fontes assistidas para o caso de 40% de distorção do sinal de entrada, contribuindo e validando as afirmativas acima.

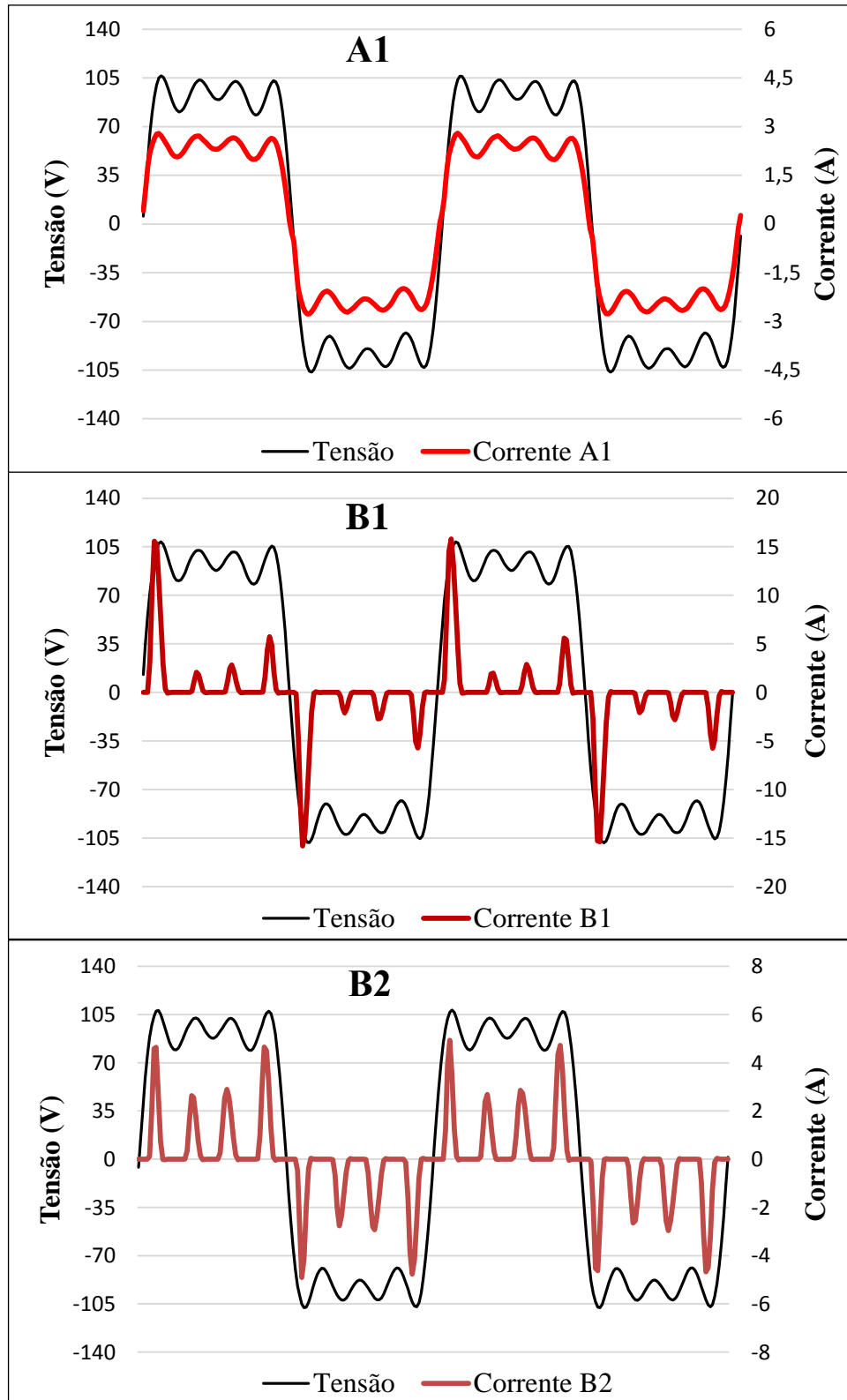


Figura 41 - Forma de onda de corrente das fontes A1, B1 e B2 para 40% de THDv.

5.3 Combinação 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas com defasagem angular: fonte A1 e B2.

Este item contempla testes similares ao cenário anterior, mesmas frequências harmônicas e proporção, com a diferença que as componentes harmônicas foram defasadas da componente fundamental em 90° e 180° graus. Logo, pretende-se avaliar o comportamento das fontes diante de sinais com o mesmo percentual harmônico já avaliado, porém com formas de ondas diferentes, além da passagem do sinal de tensão pelo zero em um mesmo ciclo mais de duas vezes (*zero crossing*). Contudo, são apresentados testes com apenas 20% e 40% de distorção do sinal de entrada (tensão) para as fontes A1 e B2.

Embora, com pequenas variações entre um teste e outro neste cenário, e ainda comparado aos cenários anteriores, à fonte A1 apresentou desempenho satisfatório, mantendo a tensão de saída constante, além do THD_I em conformidade com o sinal de tensão (alimentação). Já a fonte B2 apresentou maiores variações para as grandezas mensuradas, podendo ser observado a partir da Tabela 27 e Tabela 28.

O valor eficaz da corrente para ambas as fontes sofreu pouca variação comparado aos demais testes, porém a corrente de pico apresentou valores significativos, em especial para o caso com defasagem angular de 90°, cujo sinal de tensão apresenta maior pico devido ao formato da onda ser mais pontiagudo. Para o caso com 40% de distorção a fonte A1 chegou a 6,96 A_{pico} e a fonte B2 a 20,01 A_{pico} com distorção harmônica de 251,15%.

Tabela 27 - Grandezas avaliadas para as fontes A1 e B2 durante testes com defasamento angular das componentes harmônicas.

| Grandeza (entrada) | | Fonte A1 | | | Fonte B2 | | |
|--------------------------------------|-----|----------|--------|--------|----------|--------|--------|
| | | 0° | 90° | 180° | 0° | 90° | 180° |
| Ângulo e THD _V | | | | | | | |
| Corrente (A) | 20% | 3,21 | 3,17 | 3,17 | 2,27 | 3,66 | 2,77 |
| | 40% | 3,23 | 3,35 | 3,17 | 2,23 | 4,35 | 3,1 |
| Corrente de pico (A) | 20% | 4,25 | 5,88 | 5,26 | 6,82 | 12,7 | 7,18 |
| | 40% | 4,12 | 6,96 | 5,52 | 7,35 | 20,01 | 10,22 |
| Potência ativa (W) | 20% | 389,72 | 381 | 380,2 | 182,67 | 240 | 220 |
| | 40% | 350,2 | 342,4 | 344,8 | 117,95 | 193,32 | 213,22 |
| Potência reativa (var) | 20% | 30,33 | 38,4 | 28,8 | 78,67 | 9,33 | 81,33 |
| | 40% | 25,4 | 34,8 | 27,6 | 7,89 | 37,61 | 51,37 |
| THD _I (%) | 20% | 18,75 | 20,01 | 24,21 | 100,5 | 160,57 | 107,16 |
| | 40% | 40,48 | 39,68 | 39,19 | 209,09 | 251,15 | 134,37 |
| Saída (CC): potência ativa (W) | 20% | 357,14 | 352,05 | 353,62 | 126,16 | 180,18 | 167,14 |
| | 40% | 363,03 | 353,97 | 356,24 | 124,80 | 208,37 | 184,83 |

Fonte: do autor.

Tabela 28 - Tensão de saída das fontes A1 e B2 durante testes com defasamento angular das componentes harmônicas.

| Tensão de saída (V) | | Fonte A1 | | | Fonte B2 | | |
|---------------------------|-----|----------|------|------|----------|------|------|
| | | 0° | 90° | 180° | 0° | 90° | 180° |
| Ângulo e THD _V | | | | | | | |
| + 12 V | 20% | 12,3 | 12,3 | 12,3 | 8,9 | 10,7 | 10,3 |
| | 40% | 12,4 | 12,3 | 12,3 | 9,53 | 12,5 | 11,7 |
| + 5 V | 20% | 5,32 | 5,37 | 5,37 | 3,97 | 4,83 | 4,71 |
| | 40% | 5,34 | 5,37 | 5,37 | 3,97 | 5,21 | 4,89 |
| + 3,3 V | 20% | 3,4 | 3,46 | 3,46 | 3,16 | 3,34 | 3,3 |
| | 40% | 3,41 | 3,46 | 3,46 | 3,22 | 3,33 | 3,31 |

Fonte: do autor.

Embora a tensão de saída da fonte A1 tenha permanecido constante para os dois percentuais de distorção e diferentes formas de ondas avaliadas, para o caso de 90° a potência ativa consumida foi menor e a geração de reativos maior, em especial para a distorção de 20%, chegando a 38,4 vars. Já para a fonte B2, no caso de 20% com ângulo de 90° a potência ativa consumida foi maior, 240 W, sendo gerado apenas 9,33 vars. Nota-se que para este cenário a tensão de saída subiu, chegando a níveis próximos da tensão nominal para os três canais, em especial para 40% de THD_v , quando a potência de saída chegou a 208,37 W, ou seja, 21,3% maior comparada ao caso em que foi suprida com tensão senoidal.

Diferente da preocupação de [53] quanto ao consumo de corrente com distorção próxima ao cruzamento pelo zero por equipamentos que operem a partir de circuitos com PFC e de [57], quanto à propagação e efeitos dessa distorção do sinal de corrente principalmente em redes fracas devido à instalação de vários inversores fotovoltaicos em paralelo, ao realizar os testes com ângulo de 180° a intenção era avaliar alguma possível anomalia ao alimentar as fontes com *zero crossing* no sinal de tensão. Contudo, não foi percebido nenhuma diferença com os sinais mensurados, mesmo com a fonte A1, que ao replicar o sinal de tensão teve a corrente passando pelo zero ao menos cinco vezes no mesmo ciclo. Para a fonte B2 o sinal de corrente foi caracterizado por um pulso positivo e outro negativo, ambos menores e mais largos que os observados durante o teste com ângulo de 90° .

A Figura 42 ilustra as formas de ondas para este cenário permitindo a comparação entre as oscilografias das fontes A1 e B2.

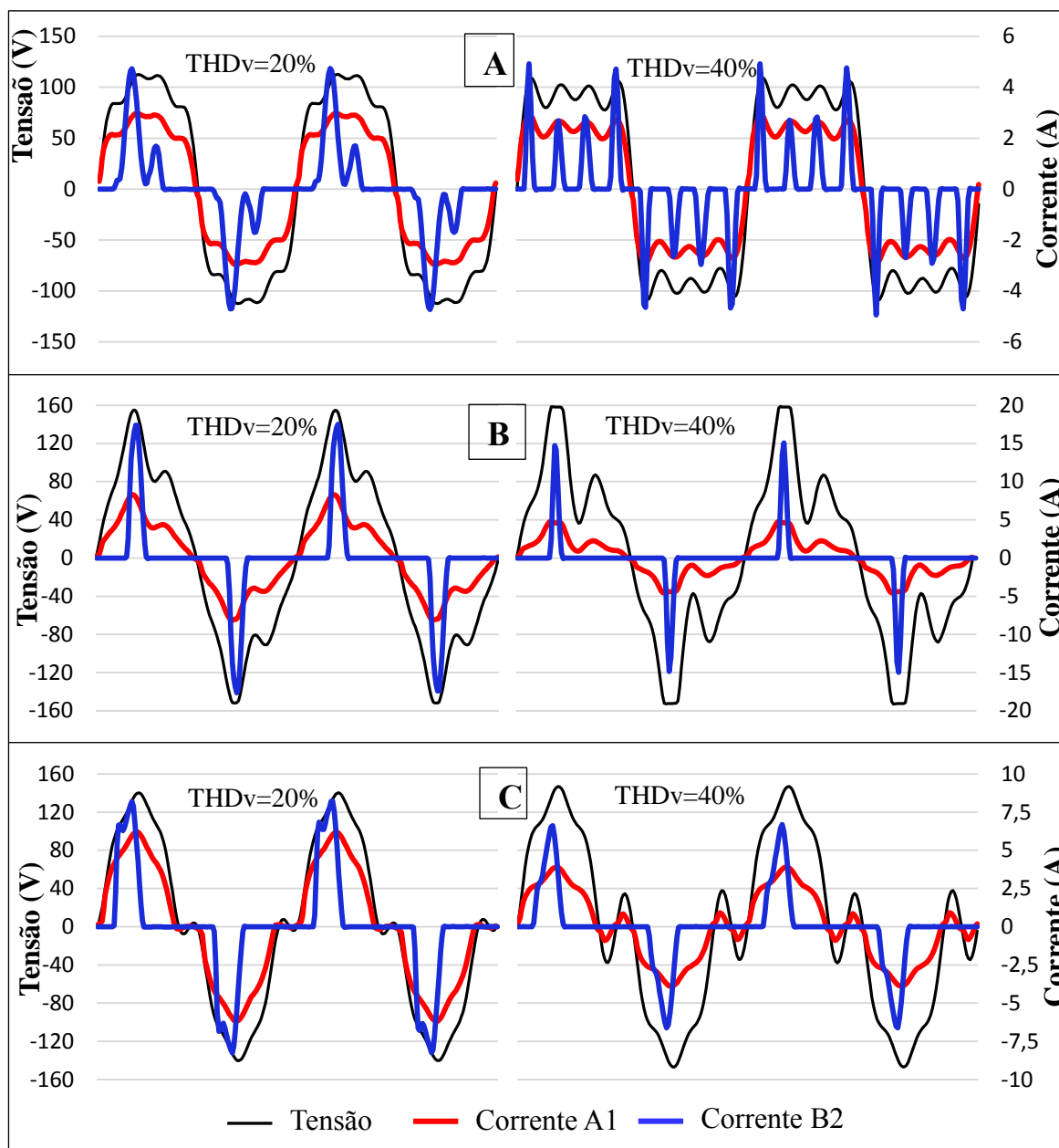


Figura 42 - Oscilografia das fontes A1 e B2 para distorção com defasagem angular das componentes harmônicas: A) 0°; B) 90°; C) 180°.

Quanto à temperatura pode-se afirmar que não houve variações significativas entre um teste e outro. Para a fonte A1 a maior temperatura foi de 35,69 °C, porém a maior diferença com relação à temperatura ambiente foi de 15,08 °C para THD_v de 40% e ângulo de 90°, que é menor comparada ao teste sem distorção harmônica (16,4 °C), quando se registrou 40,1 °C. Para a fonte B2 as diferenças de temperatura foram maiores comparadas ao teste com sinal senoidal, quando foram registrados 6,1 °C e 1,4 °C para o canal de entrada e saída,

respectivamente. No entanto, a maior diferença foi no caso de 20% de distorção total e ângulo de 180 °C, com as diferenças de 15,41 °C para o canal de entrada e 4,48 °C para a saída.

A Tabela 29 apresenta as temperaturas médias registradas durante os testes com distorção de 20% e 40% e ângulos de 0°, 90° e 180° entre as componentes harmônicas e a frequência fundamental para as fontes A1 e B2.

Tabela 29 - Temperatura média dos canais de entrada e saída das fontes A1 e B2 durante testes com defasamento angular das componentes harmônicas.

| Temperatura (°C) | | Fonte A1 | | | Fonte B2 | | |
|---------------------------|-----|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Ângulo e THD _V | | 0° | 90° | 180° | 0° | 90° | 180° |
| Ambiente | 20% | 21,81 | 19,27 | 19,49 | 22,9 | 22,45 | 22,78 |
| | 40% | 20,31 | 19,62 | 19,83 | 20,18 | 22,71 | 20,54 |
| Circuito de entrada | 20% | 24,33 | 22,46 | 22,84 | 37,34 | 37,86 | 37,74 |
| | 40% | 24,55 | 23,27 | 22,91 | 29,74 | 34,9 | 29,82 |
| Circuito de saída | 20% | 35,69 | 32,41 | 33,22 | 26,71 | 26,93 | 27,14 |
| | 40% | 32,45 | 32,88 | 34,91 | 23,49 | 26,3 | 23,23 |

Fonte: do autor.

5.4 Combinação 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas com afundamentos de tensão: fonte A1 e B2.

Para este cenário a análise também é centrada no sinal de corrente de entrada (CA) do OT e sua tensão de saída (CC). Contudo, devido ao fenômeno reproduzido ser de curta duração (afundamentos) é dada maior atenção a corrente de pico, principalmente no primeiro ciclo após o evento e no retorno do sinal de tensão para seu valor nominal, momentos em que há maior discrepância com relação aos sinais durante operação normal.

Conforme visto anteriormente, quando em operação em regime permanente com a carga descrita, a fonte A1 consome 3,22 A (4,68 A_{pico}), enquanto a fonte B2 necessita de 2,60

A ($6,40 A_{\text{pico}}$). Estes valores podem ser observados na Tabela 30, que apresenta as correntes registradas para cada distorção aplicada e servem de referência para análise destas variáveis após os afundamentos aplicados. É válido lembrar, que para cada teste, o tempo de estabilização para controle de temperatura foi realizado antes de ocasionar o afundamento.

Tabela 30 - Corrente RMS e pico das fontes A1 e B2 antes dos afundamentos.

| THD | Fonte A1 | | Fonte B2 | |
|-----|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Corrente RMS (A) | Corrente de pico (A) | Corrente RMS (A) | Corrente de pico (A) |
| 0% | 3,22 | 4,68 | 2,6 | 6,45 |
| 10% | 3,24 | 4,40 | 2,45 | 6,76 |
| 20% | 3,21 | 4,03 | 2,27 | 6,82 |
| 30% | 3,24 | 4,00 | 2,27 | 6,72 |
| 40% | 3,22 | 4,00 | 2,43 | 8,26 |

Fonte: do autor.

Nota-se que a corrente de pico da fonte A1 diminuiu à medida que se elevou a distorção harmônica, contrário a fonte B2, cuja corrente de pico foi maior durante 40% de THD_v. Para este caso, o valor observado se refere ao primeiro pulso, tendo em vista que na ocasião a corrente é caracterizada por quatro pulsos em cada meio ciclo. Conforme mencionado no tópico 4.2.2, para cada sinal avaliado foram realizados quatro afundamentos com intervalo de tempo entre um e outro conforme tempo de atuação de um religador configurado na filosofia rápida. No entanto, a fim de simplificar a escrita e análise ao manter padronizado o ponto de início do afundamento em zero grau, no decorrer são apresentadas constatações e ilustrações referentes principalmente ao 1º afundamento, sendo exibidas observações pertinentes aos demais quando julgadas relevantes. Desta forma, os gráficos a seguir mostram o comportamento da corrente de entrada no primeiro afundamento de tensão da sequência, cuja cada distorção de tensão é apresentada conforme legenda.

Para a fonte A1 e B2 as correntes registradas no início do afundamento de tensão, em especial no primeiro meio ciclo, diminuíram com a severidade do evento, sendo que para a redução em 50% da tensão nominal, a corrente instantânea da fonte B2 foi para zero, tanto com sinal senoidal quanto para os sinais distorcidos, como apresentado na Figura 43. Também é observado, em especial quanto à fonte B2, que comparando os diferentes níveis de distorção harmônica a corrente foi superior para o caso com 40% de THD_v. Todavia, cabe ressaltar que embora a corrente instantânea tenha sido nula por um período de tempo, os sinais de saída (CC), mesmo baixos, foram mantidos como apresentado na Figura 46.

A partir da Figura 43 verificam-se comportamentos distintos entre ambas as fontes durante o período em que a tensão ficou reduzida: quanto maior a distorção harmônica, menor foi a corrente de pico registrada para a fonte A1, enquanto para a fonte B2 tem-se o contrário. Já com relação à severidade do afundamento, quanto menor a tensão aplicada, menor foi a corrente da fonte B2 e maior para a fonte A1, que busca manter a potência de entrada constante, portanto faz uma compensação conforme variação da tensão de alimentação.

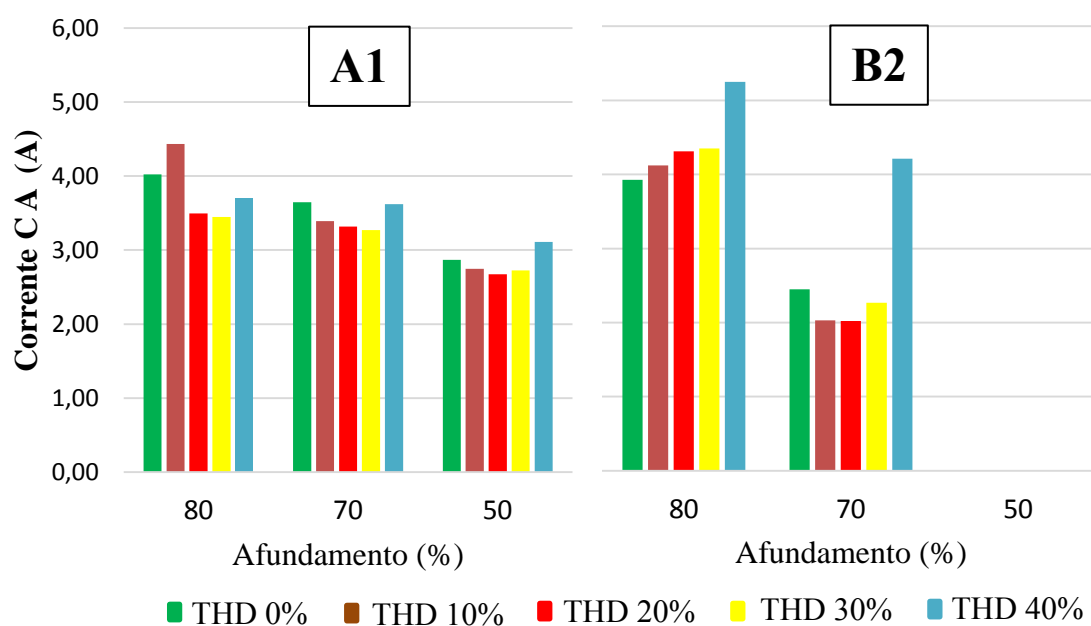


Figura 43 - Corrente máxima (CA) no início do afundamento - 1º meio ciclo.

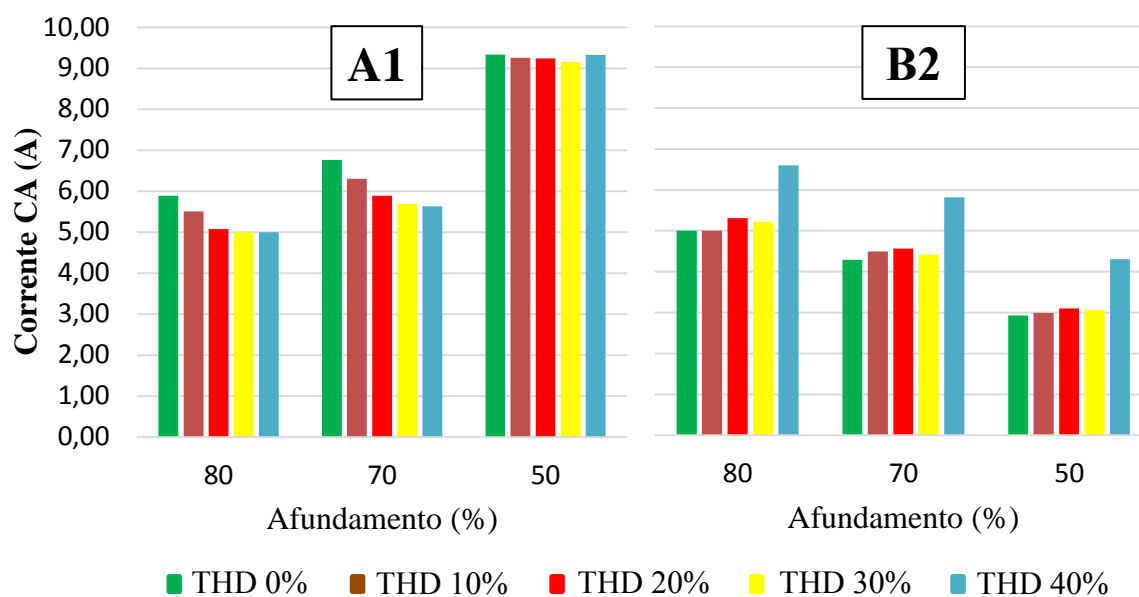


Figura 44 - Corrente máxima (CA) durante o afundamento de tensão.

Em todos os três níveis de afundamentos de tensão executados a fonte B2 não conseguiu manter constante os sinais de saída (CC), todos sofrendo redução proporcional a severidade do afundamento. No entanto, em nenhum caso, mesmo com as diferentes distorções harmônicas aplicadas, estes sinais ficaram nulos. Em contrapartida, a fonte A1 apresentou melhor desempenho na maioria dos testes, sofrendo principalmente durante o afundamento de maior magnitude. Neste caso, quando do sinal senoidal, aproximadamente oito ciclos após o afundamento do sinal de tensão, a corrente de entrada (CA) da fonte ficou nula por aproximadamente 70 ms, chegando a zerar os sinais em sua saída (12V, 5V e 3,3V). Para os afundamentos de mesma intensidade, porém, com diferentes distorções harmônicas o período em que a corrente ficou em zero foi menor, em torno de 40 ms, com exceção do sinal com THD_V de 40%, em que a corrente CA não ficou nula, conforme observado na Figura 46.

Como mencionado, quanto mais severo o afundamento de tensão, maior foi a corrente da fonte A1 durante o mesmo, e em especial para o sinal sem distorção harmônica, o qual a corrente RMS é menor, mas com a corrente de pico maior ($9,5 A_{pico}$) comparada aos sinais distorcidos. Portanto, provavelmente a corrente chegou ao limite do sistema de proteção

de sobrecorrente integrado ao circuito de controle da fonte, levando a mesma a desligar-se evitando possíveis avarias.

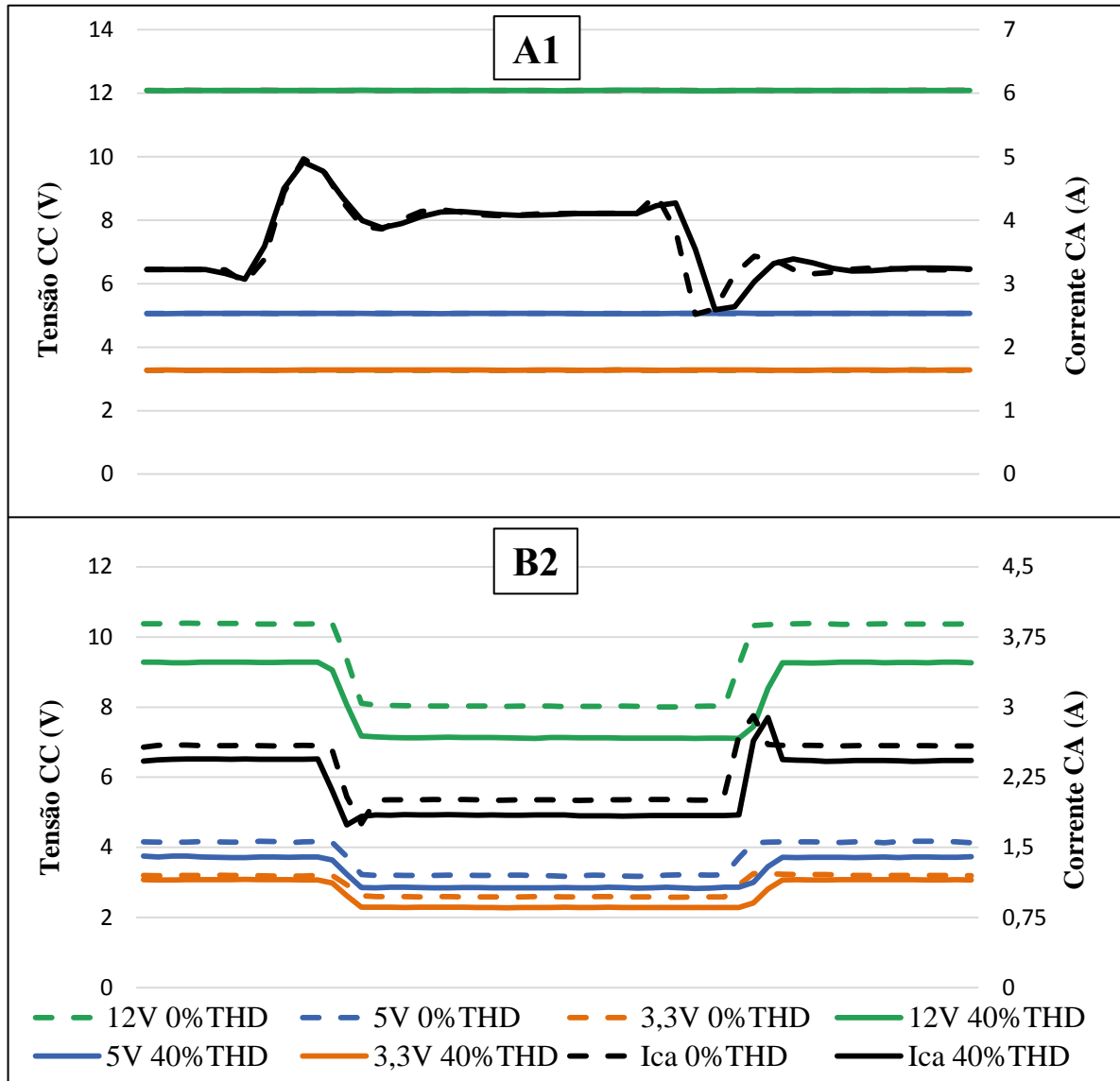


Figura 45 - Corrente RMS (CA) e sinais de saída (CC) das fontes A1 e B2 no primeiro afundamento para 80% da tensão nominal.

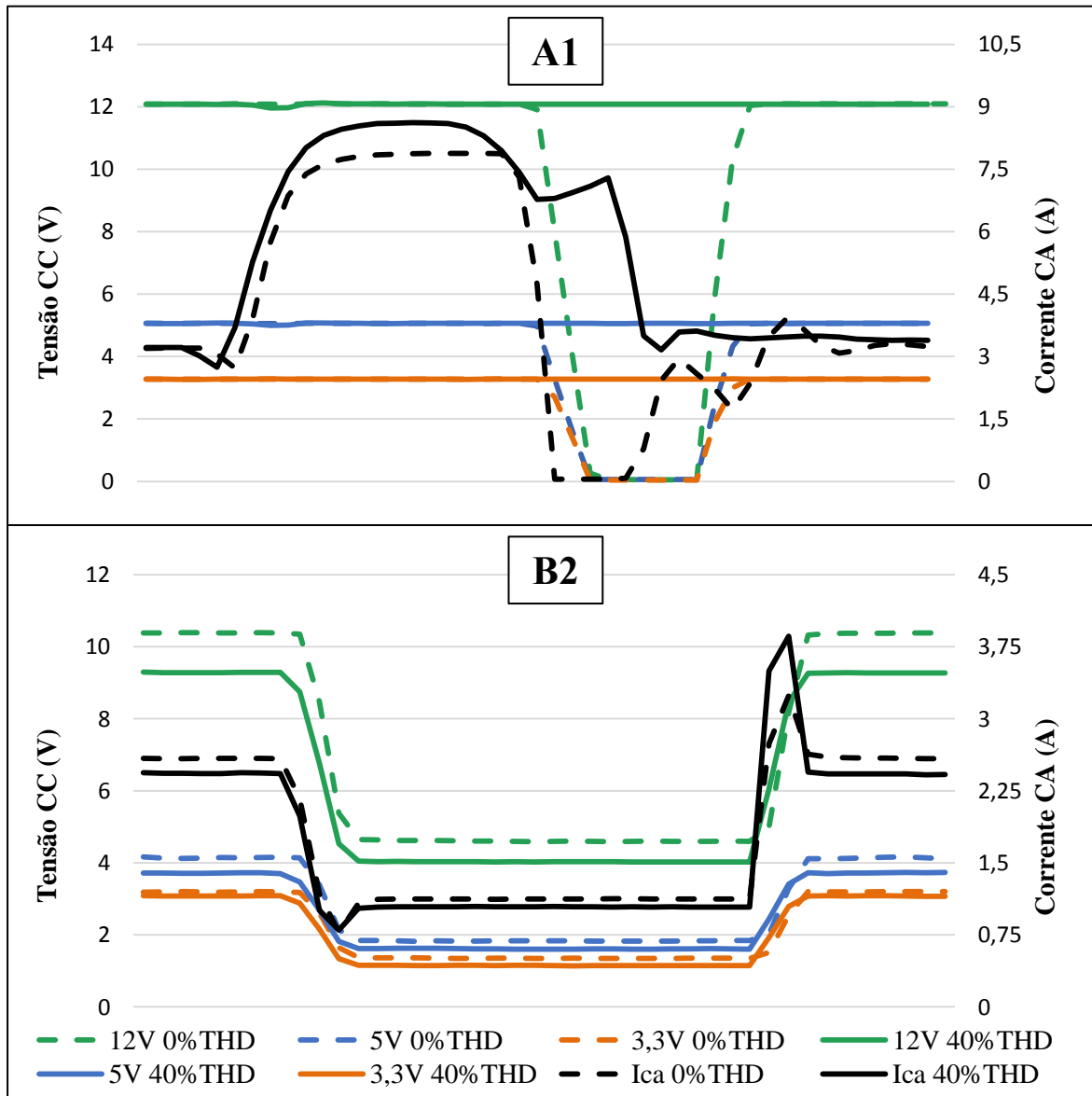


Figura 46 - Corrente RMS (CA) e sinais de saída (CC) das fontes A1 e B2 no primeiro afundamento para 50% da tensão nominal.

Durante os afundamentos em 50% da tensão nominal, com exceção dos casos com sinal senoidal e o primeiro afundamento com maior distorção total (THD de 40%), para os demais a fonte A1 apresentou pequena variação nos sinais de 5 V_{CC} e 12 V_{CC} logo após o afundamento (descida), como ilustrado na Figura 47. A máxima oscilação ocorreu durante o terceiro afundamento no caso com 30% de THD_v, variando de 4,79 a 5,38 V para o sinal de 5

V e de 11,61 a 12,41 V para 12 V. Contudo, cabe ressaltar que este ocorrido teve duração máxima de 25 ms, e apenas o canal de 5 V violou o limite superior recomendado por [47].

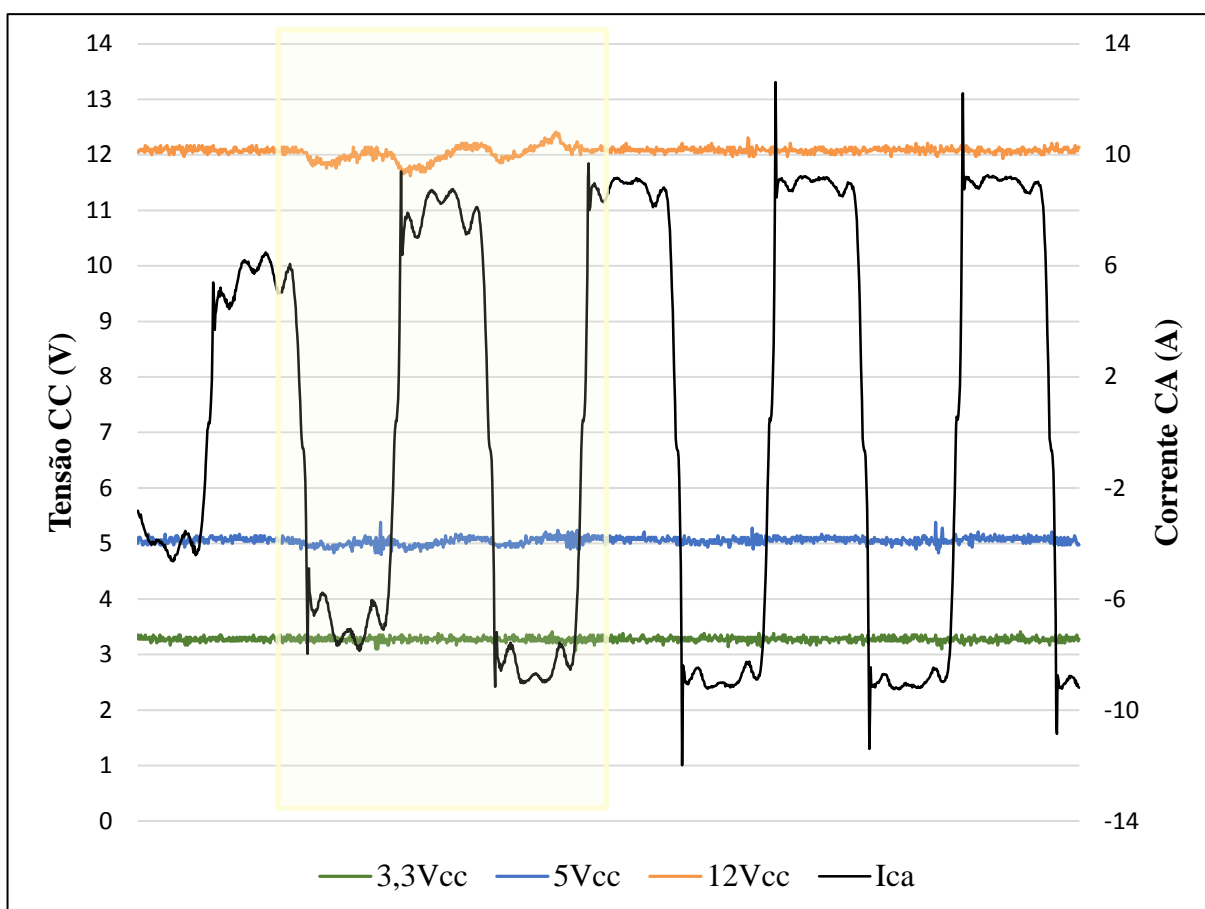


Figura 47 - Variação do sinal CC durante afundamento em 50% da tensão nominal com 30% de THDv: fonte A1.

Como esperado e assim observado na Figura 45 e Figura 46, após o término, ou seja, no retorno do afundamento houve elevação da corrente CA para todos os casos experimentados, sendo que quanto menor a tensão aplicada na fonte B2, maior foi a corrente demandada pela mesma. Já para a fonte A1, a corrente foi menor no retorno do afundamento em 50% da tensão nominal, com exceção do caso em que o THD_V foi de 40%, quando a mesma consumiu $16,05 A_{pico}$ no 1º afundamento da sequência. Nos afundamentos mais severos associados às maiores distorções (30% e 40% de THD), houve aumento significativo do surto de corrente da fonte B2, como visto na Figura 48, que mostra $18,03 A_{pico}$ para a

maior distorção. Surtos como esses podem danificar os componentes do equipamento, levando à avaria ou reduzindo sua vida útil.

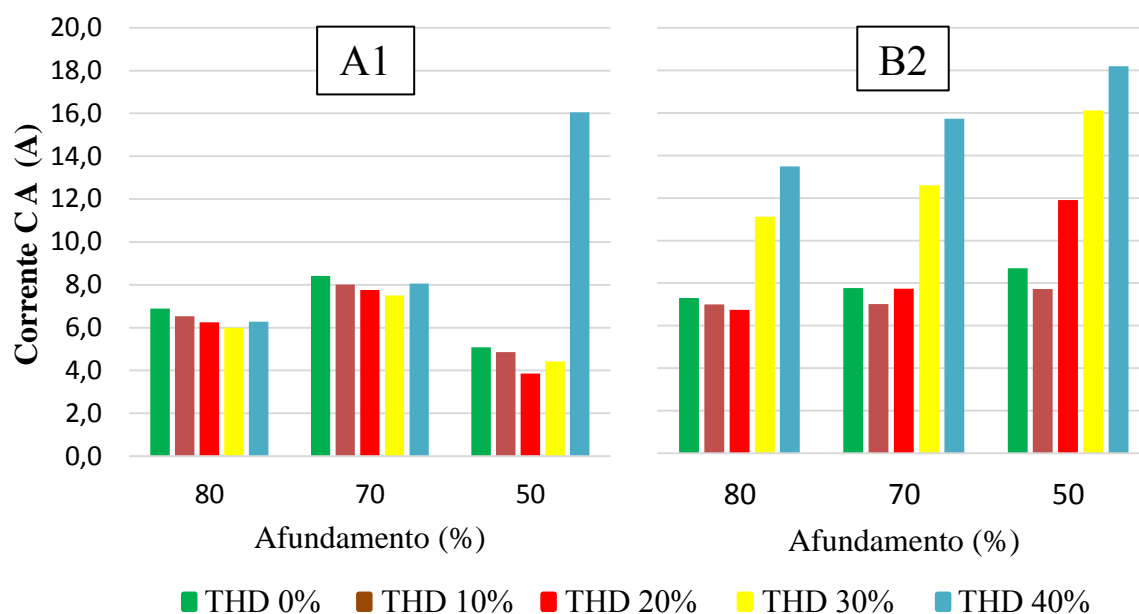


Figura 48 - Corrente máxima (CA) durante o término do 1º afundamento de tensão (subida).

Quando as fontes ficam sujeitas a afundamento de tensão, em especial para modelos similares aos objetos de teste do tipo B, a tensão de entrada fica muito baixa para recarregar o capacitor, podendo derrubar a corrente da linha temporariamente para zero. A tensão do capacitor atinge um valor inferior ao seu estado estacionário normal, então quando a tensão retorna ao valor nominal, o surto de corrente resultante é o principal problema de muitos dos danos enfrentados em equipamentos industriais [58].

O primeiro afundamento de tensão da sequência de testes foi aplicado no início do ponto na onda, ou seja, em 0°. No entanto, pelo fato dos demais afundamentos da sequência serem aplicados em intervalos de tempos diferentes e até mesmo devido a atrasos na aplicação do evento pela fonte programável, resultaram em afundamentos iniciando e terminando em pontos diferentes, como no topo da onda, por exemplo. Desta forma, o último e penúltimo afundamento da sequência obtiveram o início, e conseqüentemente um final de onda

diferente, cujo sinal da corrente ficou ainda mais intenso após o evento, causando transitórios em algumas ocasiões. De acordo com [59], a sensibilidade das fontes de alimentação a quedas de tensão aumenta com o ângulo (ponto da onda), sendo crítica a 90° , ou seja, quando o capacitor não está totalmente carregado.

A Figura 49 mostra os sinais de corrente da fonte A1 e B2 no retorno do terceiro afundamento de 50% da tensão com distorção harmônica total de 40%.

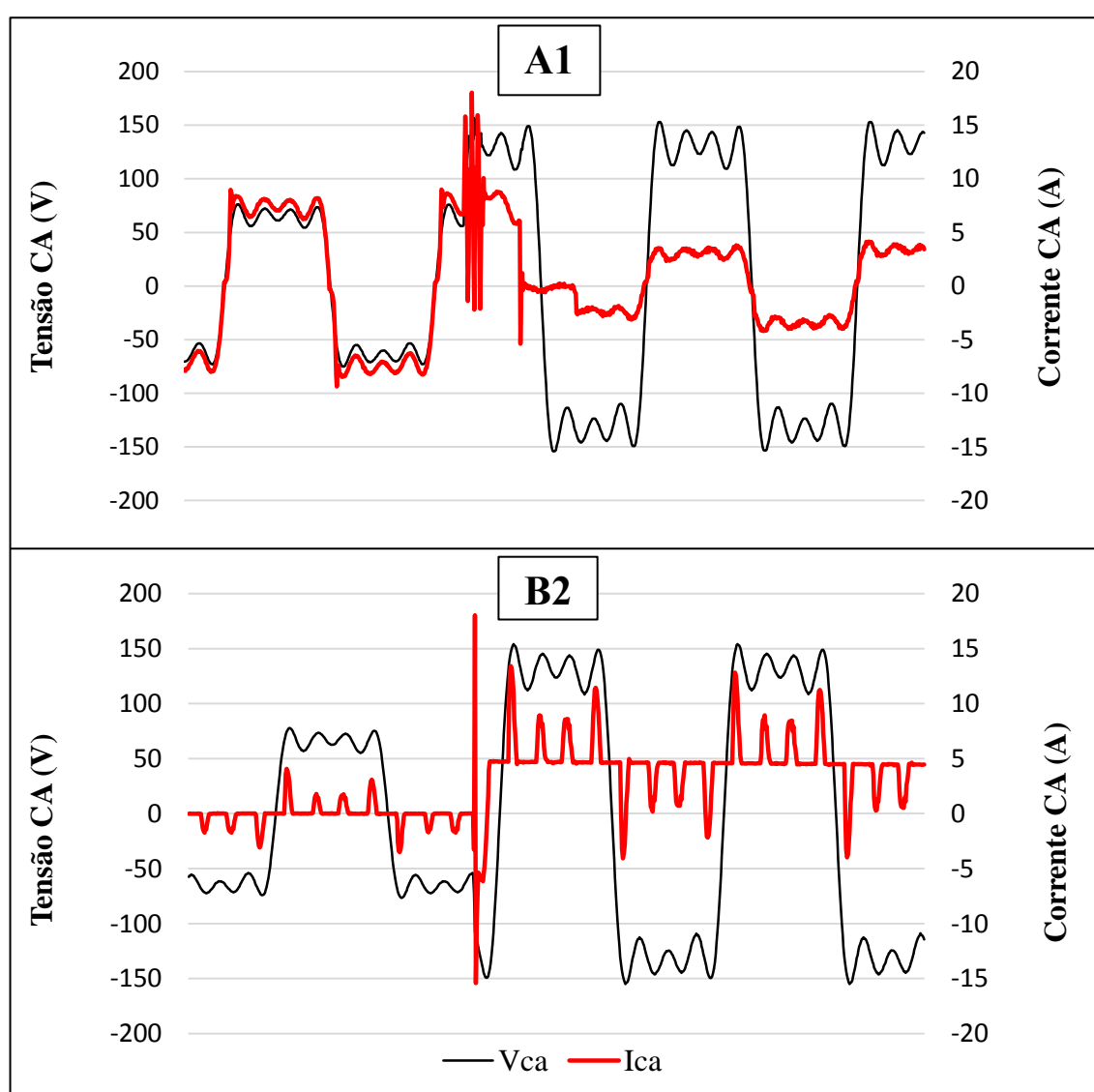


Figura 49 - Corrente de retorno no término do terceiro afundamento em 50% da tensão nominal com 40% de THD_V .

Para todos os testes aplicados os sinais de saída (CC) se mantiveram estáveis após os afundamentos de tensão, como pode ser observado nos casos com redução em 80% e 50% da tensão nominal para sinais sem distorsão harmônica e com 40% de THD_V apresentados na Figura 45 e Figura 46. Sendo assim, a Tabela 31 e Tabela 32 trazem os valores médios dos sinais de saída (3,3 V, 5 V e 12 V) antes do primeiro afundamento e após o último afundamento da sequência para todos os casos realizados. Desta forma, é possível mostrar que os sinais se mantiveram mesmo após os objetos de testes serem submetidos a quatro afundamentos de tensão com mesma intensidade e duração, mas com diferentes tempos entre a ocorrência de um e outro (2, 15 e 30 segundos).

Tabela 31 - Valores médios antes e após a sequência de afundamentos para fonte A1.

| Tensão de saída | | 3,3 Vcc | | 5 Vcc | | 12 Vcc | |
|-----------------|-----|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Afundamento | THD | Antes | Depois | Antes | Depois | Antes | Depois |
| 80% | 0% | 3,30 | 3,24 | 5,12 | 5,06 | 12,13 | 12,04 |
| | 10% | 3,32 | 3,27 | 5,06 | 5,17 | 12,03 | 12,07 |
| | 20% | 3,27 | 3,27 | 5,06 | 5,07 | 12,03 | 12,03 |
| | 30% | 3,25 | 3,27 | 5,12 | 5,11 | 12,05 | 12,08 |
| | 40% | 3,29 | 3,28 | 5,12 | 5,09 | 12,08 | 12,11 |
| 70% | 0% | 3,25 | 3,29 | 5,12 | 5,11 | 12,13 | 12,05 |
| | 10% | 3,28 | 3,34 | 5,12 | 5,10 | 12,03 | 12,07 |
| | 20% | 3,26 | 3,31 | 5,12 | 5,08 | 12,03 | 12,05 |
| | 30% | 3,27 | 3,28 | 5,11 | 5,10 | 12,04 | 12,07 |
| | 40% | 3,27 | 3,26 | 5,07 | 5,08 | 12,02 | 12,05 |
| 50% | 0% | 3,28 | 3,26 | 5,10 | 5,12 | 12,03 | 12,03 |
| | 10% | 3,27 | 3,27 | 5,07 | 5,10 | 12,01 | 12,07 |
| | 20% | 3,26 | 3,27 | 5,14 | 5,09 | 12,04 | 12,07 |
| | 30% | 3,32 | 3,28 | 5,06 | 5,07 | 12,07 | 12,07 |
| | 40% | 3,30 | 3,25 | 5,09 | 5,10 | 12,05 | 12,06 |

Fonte: do autor.

Tabela 32 - Valores médios antes e após a sequência de afundamentos para fonte B2.

| Tensão de saída | | 3,3 Vcc | | 5 Vcc | | 12 Vcc | |
|-----------------|-----|---------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Afundamento | THD | Antes | Depois | Antes | Depois | Antes | Depois |
| 80% | 0% | 3,05 | 3,10 | 4,34 | 4,10 | 10,18 | 10,21 |
| | 10% | 3,17 | 3,07 | 4,11 | 4,25 | 9,95 | 9,64 |
| | 20% | 3,03 | 2,99 | 3,96 | 3,84 | 9,38 | 9,38 |
| | 30% | 2,93 | 3,06 | 3,73 | 4,10 | 9,09 | 9,00 |
| | 40% | 3,06 | 3,05 | 3,74 | 3,72 | 9,38 | 9,31 |
| 70% | 0% | 3,16 | 3,12 | 4,32 | 4,11 | 10,50 | 10,23 |
| | 10% | 3,06 | 3,06 | 4,07 | 4,23 | 9,83 | 9,62 |
| | 20% | 3,05 | 3,06 | 3,85 | 3,93 | 9,48 | 9,29 |
| | 30% | 3,08 | 3,05 | 3,74 | 3,76 | 9,15 | 9,06 |
| | 40% | 3,08 | 3,10 | 3,75 | 3,75 | 9,28 | 9,25 |
| 50% | 0% | 3,09 | 3,08 | 4,05 | 4,27 | 10,33 | 10,44 |
| | 10% | 3,05 | 3,07 | 4,29 | 4,33 | 9,69 | 9,70 |
| | 20% | 3,01 | 3,00 | 3,76 | 3,97 | 9,11 | 9,40 |
| | 30% | 2,99 | 3,02 | 3,99 | 3,81 | 9,08 | 9,07 |
| | 40% | 3,09 | 3,10 | 3,72 | 3,73 | 9,25 | 9,25 |

Fonte: do autor.

Cabe ressaltar que os dados apresentados nas tabelas são valores médios obtidos durante certos instantes, o que justifica as diferenças de até 0,11 V e 0,37 V, para as fontes A1 e B2, respectivamente. Estas diferenças poderiam ser menores caso fosse utilizado a média dos valores registrados por um período de tempo.

Em especial a fonte B2 (sem PFC), na qual as tensões CC de saída tiveram redução considerável durante os afundamentos de tensão, chegando a tensões de 50% do valor esperado, e que mesmo quando em operação em estado estacionário fornece menos tensão do que o nominal, que é de até $\pm 5\%$, conforme [47], pode-se dizer que ambas as fontes se recuperaram, não necessitando de intervenção para que as mesmas funcionassem após os testes. Contudo, caso os objetos de teste estivessem alimentando um computador pessoal

(*desktop*), como são utilizadas normalmente, provavelmente o computador apresentaria falhas e se desligaria.

Como as fontes se destinam a alimentar diferentes componentes em um computador: refrigerador (12V), unidade óptica (5V), chips de memória (3,3V), por exemplo, devido à drástica diminuição da tensão CC durante os afundamentos, o funcionamento e mesmo integridade destas partes poderia ser afetada, e em alguns casos sendo necessário a substituição/reparos.

Os dados registrados durante a medição da temperatura não mostraram nenhuma mudança significativa perceptiva. Para registrar mudanças bruscas e menores de temperatura, é necessário refinar a instrumentação, uma vez que os eventos são de curta duração. Todavia, a Figura 50 e Figura 51 ilustram o comportamento da temperatura nos três pontos mensurados durante os testes para a sequência de quatro afundamentos em 80%, 70% e 50% da tensão nominal com sinal senoidal e com distorção total de 40%, para ambas as fontes.

Como em tópicos anteriores, para simplificar a escrita da legenda nas figuras, foram utilizadas notações oriundas do inglês, estando “T room” associada a temperatura ambiente, “T in” a temperatura próximo ao circuito de entrada da fonte (retificação) e “T out” ao circuito de saída (após os transformadores abaixadores). As partes realçadas em amarelo correspondem aos intervalos de tempo em que foram provocadas as reduções de tensão, havendo um intervalo compreendido entre cinco a dez minutos entre grupos de afundamentos de intensidades e durações diferentes, conforme representado na Figura 52.

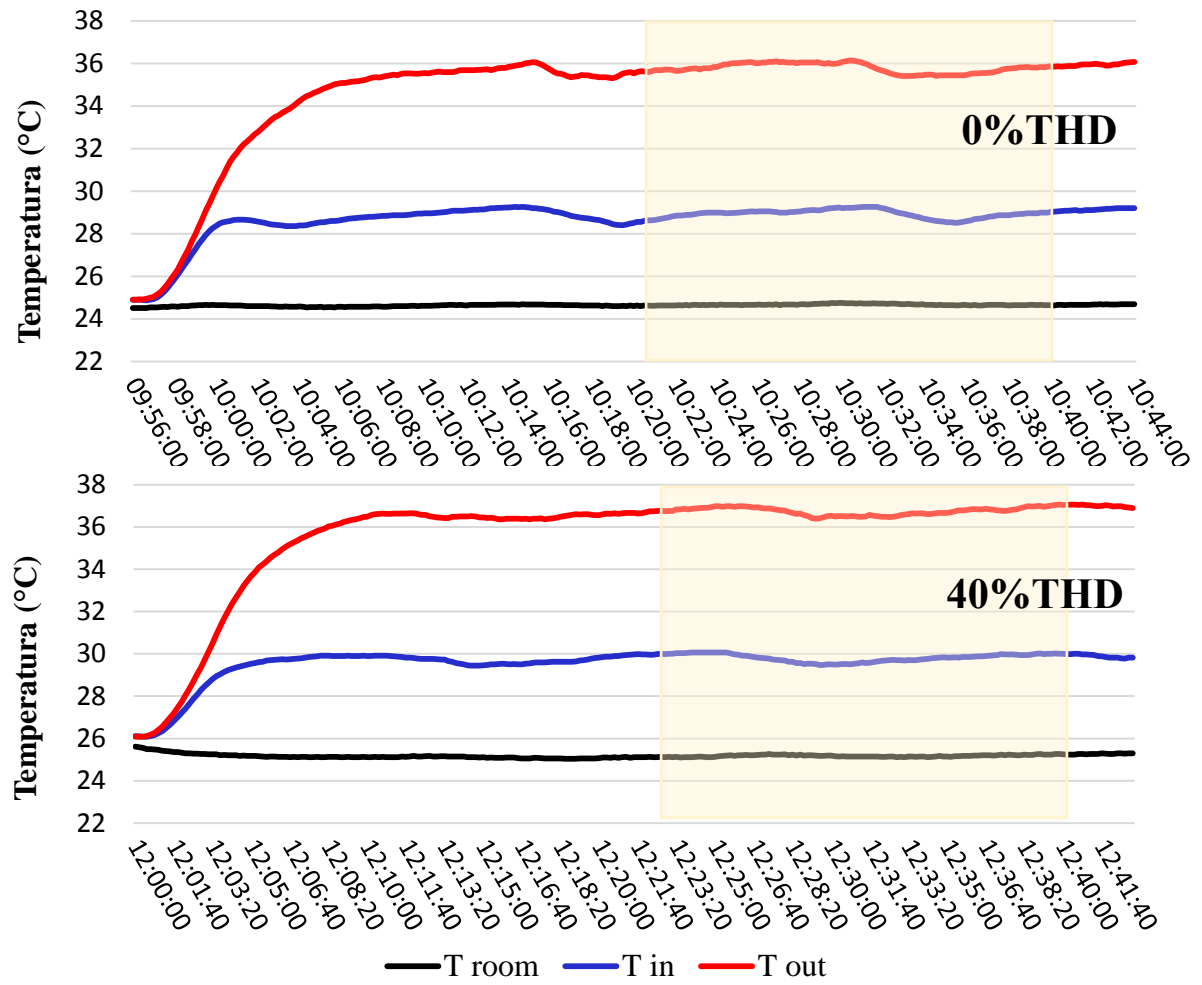


Figura 50 - Evolução da temperatura durante afundamentos de tensão com sinal senoidal e 40% de THDv: fonte A1.

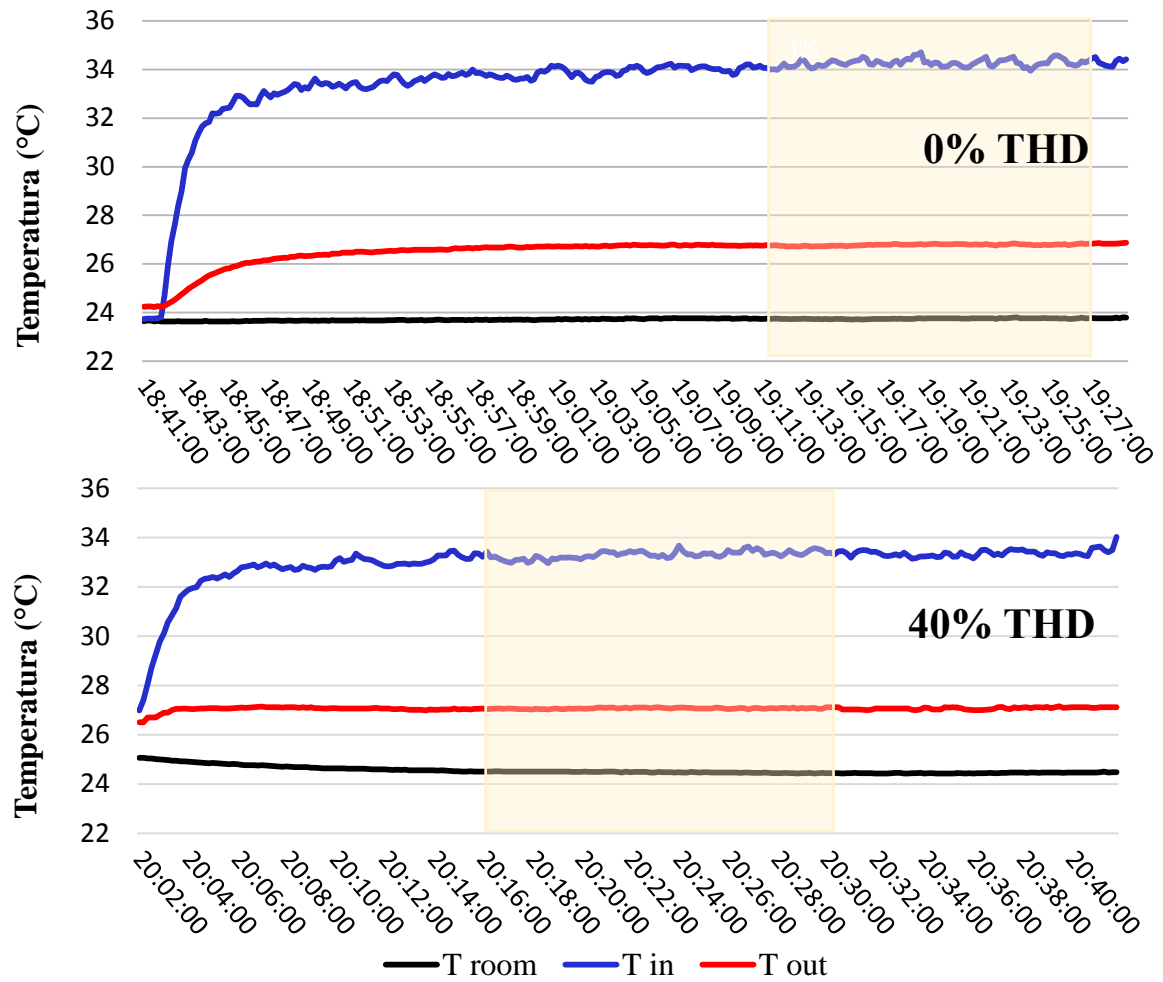


Figura 51 - Evolução da temperatura durante afundamentos de tensão com sinal senoidal e 40% de THDv: fonte B2.

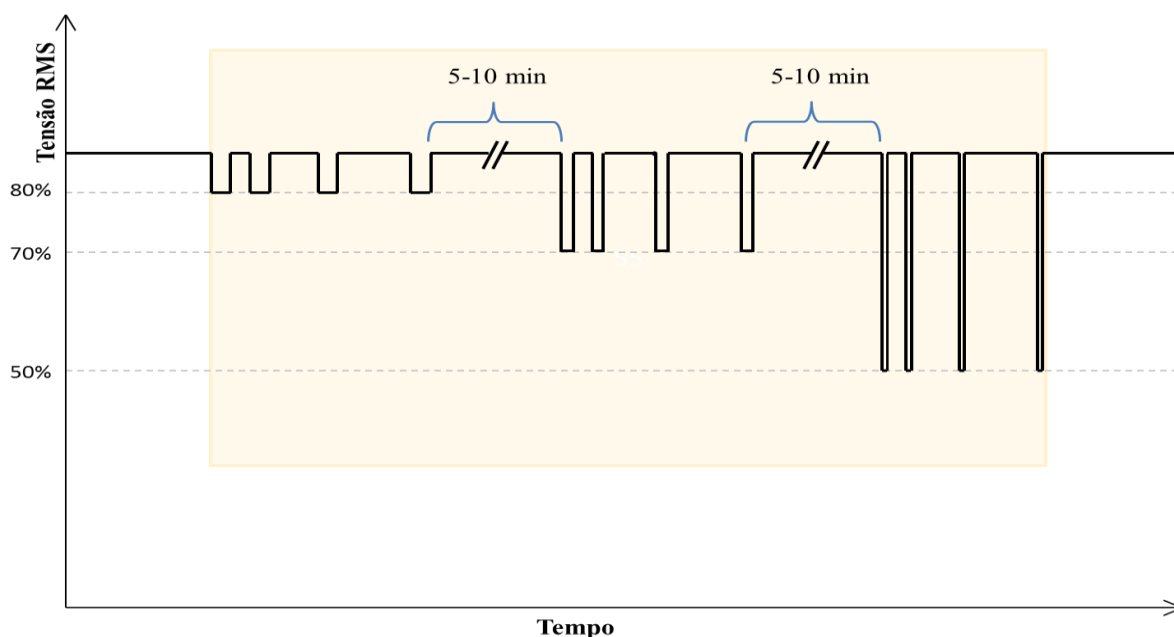


Figura 52 - Representação da sequência de afundamentos de tensão relacionados aos destaques das Figura 50 e Figura 51.

Embora haja variações nas temperaturas de entrada e saída da fonte A1, pode-se afirmar que estes eventos não tem relação com os afundamentos de tensão, haja vista os mesmos ocorrerem mesmo antes dos eventos programados. No entanto, esta observação mostra que durante o ciclo normal de operação da fonte A1 ocorre oscilações de temperatura, o que não foi constatado para a fonte B2.

A partir da Figura 51 verifica-se uma diferença perceptível da temperatura de entrada e da temperatura de saída com relação a temperatura ambiente, comparando o cenário sem distorção com o caso onde foi aplicado 40% de THD_V . Para este tipo de fonte a eficiência diminui com o aumento da distorção harmônica, entregando menos potência à carga, conforme abordado em [56].

Após os vários apontamentos realizados com base nos testes laboratoriais, e que os resultados vão ao encontro das discussões apresentadas em várias referências utilizadas, o próximo capítulo traz um compilado das informações necessárias para encerrar o trabalho com as considerações finais do autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos na área de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) são fundamentais para garantir a qualidade e eficiência na prestação de serviços e do produto energia elétrica, principalmente no atual cenário intensificado pelo constante avanço tecnológico. Os equipamentos eletrônicos ganham cada vez mais espaço no mercado, trazendo preocupação por muitas vezes serem sensíveis aos diversos distúrbios na QEE, ou mesmo por serem os responsáveis por efeitos indesejáveis, como as distorções harmônicas, por exemplo. Todavia, outros equipamentos de construção simples e consolidada a anos, como motores de indução, podem provocar afundamentos de tensão durante a partida, assim como também sofrem quando alimentados com tensões muito abaixo ou acima dos limites impostos pelo fabricante, ou também por receberem sinais poluídos com harmônicos, o que reduz sua vida útil. Portanto, com base nas diversas pesquisas acerca deste assunto, lança-se mão de normas e regulamentações que estabelecem diretrizes visando minimizar os problemas que ocorrem nos sistemas elétricos em geral, ou de forma a garantir o bom funcionamento e vida útil de equipamentos.

Embora a rede elétrica esteja exposta a diversos fenômenos que deterioram a qualidade da mesma, este trabalho se limitou a avaliar o comportamento de fontes chaveadas utilizadas em computadores submetidas a distorções harmônicas e afundamentos de tensão. Apesar de parecer um tema saturado, os diversos trabalhos nesta vertente trazem contribuições significativas, principalmente por ser um assunto vasto e complexo. E este por sua vez, a partir de uma extensa quantidade de experimentos, estressa os objetos de testes a níveis superiores às diretrizes apresentadas, e que são as mais utilizadas quanto aos dois fenômenos. Sendo assim, com o objetivo de avaliar o comportamento e imunidade das fontes de computador, o trabalho permite inferir o quão rigorosas são as normas e recomendações propostas. Além disso, aponta lacunas a serem preenchidas para que se tenha melhor

compreensão quanto aos possíveis impactos das distorções harmônicas e afundamentos de tensão em equipamentos conectados as redes elétricas.

Conforme apresentado, os limites acerca das distorções harmônicas variam de uma norma para outra, além de serem prescritas com abordagens diferentes, podendo, em alguns casos, não se aplicar efetivamente às cargas e equipamentos com interface eletrônica, por exemplo. Desta forma, estes limites tentam descrever um fenômeno de várias dimensões e complexidade em um único número, possivelmente ocultando informações sobre seu verdadeiro impacto na QEE.

Tendo em vista os diversos cenários os quais as fontes foram submetidas, como os altos valores de distorção harmônica, tanto a fonte de melhor qualidade, quanto o modelo inferior, e que não possui PFC, mostraram experimentalmente terem alta imunidade. A fonte B1 (sem PFC) teve sua eficiência reduzida com a elevação da distorção, além de sua corrente de entrada (RMS) ter se elevado consideravelmente, a mesma sofreu avaria com 43% de THD_V . Já a fonte B2 (mesmo modelo) foi avaliada até 40% de THD_V aparentando ter imunidade maior, já que as variáveis corrente e temperatura estavam a níveis inferiores comparados a fonte B1 para o mesmo percentual harmônico. Em contrapartida, a fonte de alimentação com PFC apresentou maior eficiência, corrente RMS estável e pode operar corretamente com THD de tensão superior a 100%, ou seja, dez vezes o maior limite recomendado para baixa tensão.

Embora os testes com as componentes individuais (3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª ordens) não tenham chegado a níveis elevados como nos testes em que foram combinados 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, os níveis foram superiores aos limites recomendados e mostraram que para determinadas frequências o comportamento dos objetos de teste pode variar. No entanto, para a fonte A1 houve variações mínimas, sendo que para a 3ª ordem harmônica, a distorção da corrente ficou menor, não ultrapassando o valor de distorção da tensão. Já a fonte B1 teve a

distorção de corrente elevada com o aumento da frequência harmônica e sua potência de saída reduzida. Contudo, a corrente eficaz na entrada não mostrou comportamento regular, com seu valor médio maior para algumas frequências, como no caso da 11ª ordem em que a mesma chegou a 5,38 A_{RMS} com 12% de distorção no sinal de tensão.

Ao aplicar sinais com distorções harmônicas cuja frequências estavam defasadas da componente fundamental foram observados resultados significativos principalmente para a fonte B2 com o ângulo de 90°. Neste cenário, a corrente de pico consumida ficou bastante elevada (20,01 A para 40% de THD_V) e conseqüentemente o THD_I. Além dos sinais de entrada, os canais de saída tiveram aumento, chegando a valores próximos aos valores nominais, portanto maiores que os sinais quando a fonte foi alimentada com sinal senoidal. Já para a fonte A1 as variações foram menores, embora a corrente de pico também tenha se elevado com a defasagem de 90° e principalmente para a maior distorção (6,96 A). No entanto, mesmo ocorrendo o *zero crossing* no sinal de corrente da fonte A1 com o defasamento em 180°, nada de anormal foi registrado, e o sinais de saída, que poderiam impactar no bom funcionamento de um computador, se mantiveram constantes.

Quanto aos testes com afundamentos de tensão, as fontes assistidas não sofreram nenhum dano, mesmo quando este evento ocorreu concomitantemente à distorção harmônica de tensão. No entanto, um computador alimentado por estas fontes poderia apresentar mau funcionamento com os distúrbios provocados.

A tensão CC de saída da fonte B2 apresentou redução drástica, principalmente quando aplicada quedas de tensão de 50% e associada a maiores distorções harmônicas (40% THD_V). Sua corrente de entrada chegou a zerar por alguns instantes (meio ciclo) durante o afundamento mais severo, porém ainda manteve tensão em sua saída. Já a fonte A1 conseguiu manter a tensão de saída constante para os afundamentos em 80% e 70% da tensão nominal, porém chegando a zerar estes sinais quando alimentada com apenas 50% da tensão nominal

(63,5V). Como a corrente de entrada da fonte A1 se eleva em compensação a redução da tensão, para o caso mais severo de afundamento a corrente subiu até atingir o limite do circuito de proteção de sobrecorrente, assim cortando os sinais em sua saída.

No retorno para a tensão nominal, ou seja, ao término do afundamento (subida), a corrente de pico de ambas as fontes aumentaram, em especial quando o sinal estava com 40% de distorção. Todavia, a corrente chegou a valores mais críticos quando os afundamentos iniciaram e/ou terminaram em pontos da onda diferente de zero grau, momentos em que ocorreram correntes transitórias. Eventos indesejados por geralmente estarem associados à avaria de componentes como capacitores, por exemplo, que carregam e se descarregam em intervalo de tempo muito curto com elevados sinais desgastando prematuramente o dielétrico.

Embora nenhum dos dois modelos de fonte tenha sofrido avaria neste cenário de testes, pode-se concluir que os afundamentos de tensão têm um grande impacto no desempenho das mesmas, ainda mais quando associados a distorções harmônicas. A fonte B2, modelo sem PFC, apresentou maiores correntes transitórias e menores níveis de tensão CC em sua saída. Desta forma, caso as fontes estivessem em seu uso normal, ou seja, alimentando as diversas partes constituintes de um computador, certamente o mesmo teria sua performance comprometida, podendo simplesmente se desligar ou até mesmo alguma placa sofrer avaria, sendo necessário reparo.

Ao findar deste trabalho conclui-se que limitar as componentes harmônicas é uma tarefa difícil, pois é uma questão complexa a qual vários aspectos precisam ser considerados, além da distorção harmônica total (THD). Cada situação tem uma natureza distinta, assim como o tempo de exposição e a sensibilidade das diversas cargas variam, implicando em níveis de compatibilidade harmônica diferentes, enquanto as recomendações e padrões procuram fornecer diretrizes para estabelecer níveis singulares de compatibilidade ou mesmo planejamento. Os níveis de teste de imunidade são limitados a condições específicas,

preferindo situações relevantes que poderiam trazer informações adicionais sobre determinados dispositivos e/ou sistemas.

Tendo em vista que os limites estabelecidos têm sido ao longo do tempo baseados em aspectos térmicos e não são reavaliados com a mesma intensidade que mudam as características das cargas e assim das próprias redes elétricas, e ainda apoiado nas observações realizadas durante este trabalho, sugere-se uma ponderação para que estes limites de distorção harmônica sejam aplicados com maior eficácia, de forma que os mesmos sejam restritivos em determinadas situações e não tão rigorosos em outras. Para tal, alguns parâmetros básicos precisam ser avaliados e bem estabelecidos:

- Formas de onda da tensão e conseqüentemente seu valor de pico;
- Defasagem entre componentes harmônicas e frequência fundamental;
- Valor de pico da corrente;
- Impactos das distorções harmônicas em diferentes níveis de tensão;
- Impacto das diferentes frequências harmônicas individualmente;
- Tempo de exposição às distorções harmônicas;
- Expansão de cargas não lineares no sistema, implicando em cancelamento dos harmônicos, ou mesmo do surgimento de maiores frequências;
- Curva de sensibilidade de equipamentos frente a distorções harmônicas e também associados a outros eventos, como os afundamentos de tensão.

Ao avaliar com maior rigor estes itens será possível conhecer de fato o real impacto das distorções harmônicas, tanto pelas componentes individuais como pela distorção total em diferentes equipamentos e, assim, permitir que os limites sejam readequados, havendo maior flexibilidade para os diversos casos, seja conforme grupos de equipamentos, ou mesmo sistemas elétricos. Desta forma, abre-se a possibilidade que para alguns casos os limites de

compatibilidade aumentem, já que os objetos de teste, assim como outros equipamentos podem suportar distorções muito maiores que os atuais limites. Todavia, cabe ressaltar que outros cenários devem ser avaliados, assim como outros equipamentos, pois as fontes assistidas mostraram alta imunidade para as condições adotadas neste trabalho, porém a resposta das mesmas poderia ser diferente caso o tempo de avaliação e/ou temperatura ambiente, a qual foram submetidas, fossem maiores, por exemplo.

O autor acredita que seria de grande valia se os fabricantes dos diversos equipamentos fornecessem a curva de sensibilidade para afundamentos de tensão e outra relacionada ao desempenho dos mesmos com relação às distorções harmônicas. Associar este tipo de informação aos parâmetros de qualidade da energia elétrica disponibilizada pelas distribuidoras diminuiria a preocupação, ou mesmo chamaria a atenção para os cuidados com a inserção dos equipamentos nas redes elétricas. Também contribuiria para que ações precipitadas não fossem tomadas, como ocorre em algumas ocasiões em que equivocadamente associam a queima de equipamentos a distorções harmônicas, tornando esta a grande vilã da QEE. Outro quesito que o autor considera relevante é a implementação de PFCs em todos os modelos possíveis de fontes, pois mesmo que esta ação encareça o produto final, este aumento seria compensado pelo maior desempenho e eficiência das mesmas, assim como aumento da imunidade aos distúrbios da QEE. Além do mais, seria um fator positivo para as redes elétricas, por demandarem menores correntes harmônicas e terem maior fator de potência, por exemplo.

Embora os testes de afundamentos tenham se apresentado bastante significativos, para mais detalhes do comportamento de equipamentos quanto a este evento é necessário aplicar testes com maior número de pontos, como a exemplo da curva ITI (teste de compatibilidade), ou mesmo os indicados na IEEE1668 para teste de suportabilidade (*left-right*, *top-down* e *box-in*), por exemplo. No entanto, como discutido na literatura, é importante

realizar as adequações dos testes sugeridos com as reais condições experimentais. Além disso, será de grande valia se os testes forem realizados concomitantemente a distorções harmônicas, mesmo que a níveis típicos aos encontrados nos sistemas elétricos. Desta forma, não só testes relacionados a afundamentos de tensão, mas qualquer outro tipo de teste deveria ser realizado aplicando-se não apenas sinais senoidais, mas também sinais distorcidos e com componentes harmônicas defasadas da frequência fundamental. E ainda, com relação aos afundamentos de tensão, é interessante realizar testes com maior tempo de duração, não se limitando apenas aos tempos de atuação de dispositivos de proteção empregados no sistema elétrico. Desta forma, testes como os realizados neste trabalho poderiam ter maior tempo tendo em vista a própria classificação dos afundamentos, que são limitados a um minuto conforme as diretrizes internacionais e até três minutos no cenário nacional. Além do tempo de duração, os testes de suportabilidade e sensibilidade devem levar em consideração o ponto de incidência do evento no sinal de tensão, portanto serem realizados não só na passagem pelo 0° , mas também em 90° , que é o cenário mais crítico. Também devem ser considerados testes com mais de um nível de tensão para equipamentos “bivolts”.

Com base ao exposto, a seguir são listadas propostas futuras relacionadas à avaliação do desempenho e imunidade de equipamentos, no sentido da melhoria nas recomendações e diretrizes associadas às distorções harmônicas e afundamentos de tensão:

- Realizar os mesmos testes com outros tipos de fontes, como as de celulares, por exemplo, e outros equipamentos cuja às fontes de alimentação sejam integradas;
- Aumentar o tempo dos testes visando melhor avaliação dos efeitos de longo prazo das distorções harmônicas;
- Realizar diferentes testes mantendo a temperatura ambiente constante;
- Repetir os testes com diferentes temperaturas de referência (ambiente);

- Melhorar a instrumentação associada aos registros de temperatura e corrente de saída (CC) da fonte;
- Avaliar as oscilações dos sinais de saída (*ripple*) para cada teste;
- Traçar a curva de suportabilidade para afundamentos com sinal senoidal e distorcido;
- Realizar testes de afundamentos e também para distorções harmônicas com menor e maior tensão, conforme faixa de alimentação do equipamento a ser avaliado;
- Aumentar o tempo de duração dos afundamentos (afundamentos temporários);
- Elaboração de classificações conforme características e imunidade de equipamentos frente a distorções harmônicas;
- Realizar simulações computacionais cujos resultados se aproximem dos obtidos experimentalmente e, a partir disso, criar modelos genéricos para cada classe de equipamentos (conforme item anterior), a fim de estimar a vida útil dos mesmos;
- Realizar tratamento estatístico de erros, principalmente com relação às medições, a fim de maximizar a precisão e exatidão dos valores a serem apresentados.

REFERÊNCIAS

- [1] EIA. U.S. Energy Information Administration. **Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050 - AEO2019**". Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy, Washington, jan. 2019. Disponível em: <www.eia.gov/aeo>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- [2] DUGAN, R.C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 3. ed. McGraw-Hill, 2012.
- [3] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. Material disponibilizado na disciplina IT741 da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2009. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it741/cap1.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2021.
- [4] LINCOLN, P.M. **Wave form distortions and their effects on electrical apparatus**. In: Convention of the American Institute of Electrical Engineers, Nova York, fev. 1913. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4765048>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- [5] JOHN, J.J. **Observation of harmonics in current and in voltage wave shapes of transformers**. In: Meeting of the American Institute of Electrical Engineers, 248. São Francisco, mai. 1910. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6659994>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- [6] BEDELL, F. **II - Distortion factors**. In: Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, 32. Deer Park, jun. 1915. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6590201>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- [7] RIBEIRO, P.F. **Time-Varying Waveform Distortions in Power Systems**. 1. ed. Michigan: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-71402-7.
- [8] OUYANG, S. **Test and analysis on sensitivity of low-voltage releases to voltage sags**. The Institution of Engineering Technology - IET Generation Transmission Distribution, v. 9, p. 2664-2671, 2015.
- [9] WAGNER, V.E. et al. **Effects of Harmonics on Equipment: Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment**. IEEE Transactions on Power

Delivery, v. 8, n° 2, abril 1993. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/216874>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[10] CAVALLINI, A. et al. **A Parametric Investigation on the Effect of Harmonic Distortion on Life Expectancy of Power Capacitors.** In: Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference on Industrial Applications in Power Systems, Computer Science and Telecommunications (MELECON 96), Bari, Itália, mai. 1996. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/551586>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[11] MIYAZAKI, S. et al. **Immunity Test Results of a Quick Power Failure Detector of Uninterruptible Secondary Battery System.** In: Proceedings of Power Conversion Conference (PCC '97), Nagaoka, Japão, ago. 1997. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/645659>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[12] ABREU, J.P.G.; EMANUEL, A.E. **Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 38, jan/fev. 2002. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/980339>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[13] ELMOUDI, A.; LEHTONEN, M.; NORDMAN, H. **Effect of harmonics on transformers loss of life.** In: Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, jun. 2006. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/1665344>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[14] DELAIBA, A.C. et al. **Effect of harmonics on transformers loss of life.** In: 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Proceedings, Rio de Janeiro, Brasil, ago. 1995. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/510243>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[15] RYLANDER, M.; GRADY, W.M.; NARENDORF, M. **Experimental Apparatus, Testing Results, and Interpretation of the Impact of Voltage Distortion on the Current Distortion of Typical Single-Phase Loads.** IEEE Transactions on Power Delivery, V. 24, abril 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4801548>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

[16] ELPHICK, S. et al. **Voltage sag susceptibility of 230 V equipment.** IET Generation, Transmission & Distribution. v. 7, jun. 2013. Disponível em:
<<https://ieeexplore.ieee.org/document/6542286>>. Acesso em: 11 mar. 2021.

- [17] MAZZANTI, G. **Reliability evaluation of insulation subjected to harmonic voltages within the limits set by international standards.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 21, out. 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6927331>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- [18] SINGH, S. et al. **A power quality improved bridgeless converter-based computer power supply.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 52, set/out. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7482690>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- [19] DJOKIC, S. et al. **On evaluation of power electronic devices' efficiency for nonsinusoidal voltage supply and different operating powers.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. v. 66, set. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7940001>>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- [20] XIAO, X. et al. **Operating Cycle Performance, Lost Periodicity, and Waveform Distortion of Switch-Mode Power Supplies.** IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 67, out. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8328925>>. Acesso em: 28 mar. 2021.
- [21] IEC/TR 61000-3-6-2008, **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.** International Electrotechnical Commission - IEC, 2 ed., 2008.
- [22] IEEE Std. 519-2014, **IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems.** Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, mar. 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>>. Acesso em: 02 mar. 2021.
- [23] EUROPEAN STANDARD EN 50160, **Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.** European Committee for Electrotechnical Standardization - CENELEC, *Draft* maio 2005. Disponível em: <https://www.se.com/ww/library/SCHNEIDER_ELECTRIC/SE_LOCAL/APS/204836_1312/DraftStandard0026rev2-DraftEN501602005-05.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2021.
- [24] IEC Std 61000-2-2-2002, **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems.** International Electrotechnical Commission - IEC, 2 ed., 2002.

- [25] IEC 61000-3-2, **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3.2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current < 16 A per phase)**. International Electrotechnical Commission - IEC, 3 ed. CENELEC, *Draft* fev. 2014.
- [26] ANEEL PRODIST-M8, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, jan. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- [27] ONS, **Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica**. Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, jan. 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- [28] IEC/TR 61000-3-4, **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A**. International Electrotechnical Commission - IEC, 1998.
- [29] IEC 61000-3-12, **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase**. International Electrotechnical Commission - IEC, 2012.
- [30] IEEE Std 1668-2017, **IEEE Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, jun. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8120227>>. Acesso em: 29 mar. 2021.
- [31] IEEE Std 1159-2009, **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, jun. 2009. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5154067>>. Acesso em: 03 mar. 2021.
- [32] Information Technology Industry Council (ITI). **ITI (CBEMA) Curve application note**. Disponível em: <<http://www.itic.org>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- [33] Semiconductor & Industrial PQ Services EPRI. **Overview of SEMI F47-0706**. SEMICON, Japão 2006. Disponível em: <[http://dom.semi.org/web/wstandards.nsf/19A2E6E9C088D3958825733100743B15/\\$file/4OverviewofSEMIF47-0706.pdf](http://dom.semi.org/web/wstandards.nsf/19A2E6E9C088D3958825733100743B15/$file/4OverviewofSEMIF47-0706.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2021.

- [34] IEC 61000-4-11, **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-11: Testing and measurement techniques – Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests**. International Electrotechnical Commission - IEC, 2 ed., 2004.
- [35] FGV. **Pesquisa Anual do Uso de TI nas Empresas, 2019**. Centro de Tecnologia de Informação Aplicada da EAESP, Fundação Getúlio Vargas – FGV, 30ª edição, 2019. Disponível em: < www.fgv.br/cia/pesquisa>. Acesso em: 10 mar. 2021.
- [36] MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. **Power electronics: converters, applications, and design**. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- [37] RASHID, M.H. **Eletrônica de Potência - Circuitos, dispositivos e aplicações**. Tradução Favato, C.A. São Paulo, Makron Books, 1999. Do original em inglês: Power Electronics - Circuits, devices, and applications. 2 ed.
- [38] TOLLIK, D; PIETKIEWICZ, A. **Comparative analysis of 1-phase active power factor correction topologies**. In: Fourteenth International Telecommunications Energy Conference - INTELEC '92, Washington, USA, 1992. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/268393>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- [39] LAMAR, D. et al. **On the Limit of the Output Capacitor Reduction in Power-Factor Correctors by Distorting the Line Input Current**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n°. 3, mar. 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5571011>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- [40] RASHAD, M. **PFC Topologies for AC to DC Converters in DC Micro-Grid**. In: 18th Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON 2016, Limassol, Cyprus, abr. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7495376>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- [41] JOVANOVIC, M.M.; JANG, Y. **State-of-the-Art, Single-Phase, Active Power-Factor-Correction Techniques for High-Power Applications - An Overview**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 52, n°. 3, jun. 2005. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1435681>>. Acesso em: 18 mar. 2021.
- [42] NIU, H. et al.. **A Robust Design Method for MOSFET Degradation in SMPS**. In: First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE 2015), Beijing, China, out. 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7366502>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

- [43] SINGH, S. et al. **Improved Power Quality Bridgeless Converter Based Multiple Output SMPS**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 51, nº1, jan/fev. 2015. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6844872>>. Acesso em: 30 mar. 2021.
- [44] SINGH, S. et al. **A Power Quality Improved Bridgeless Converter Based Computer Power Supply**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 52, nº 5, set/out. 2016. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7482690>>. Acesso em: 30 mar. 2021.
- [45] INTEL CORPORATION. **ATX Specification, v. 2.2**. Disponível em: <https://web.archive.org/web/20120725150314/http://www.formfactors.org/developer/specs/atx2_2.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- [46] INTEL CORPORATION. **ATX12V Power Supply Design Guide**, v. 2.2, mar. 2005. Disponível em: <https://www.techpowerup.com/articles/160/images/ATX_2_2.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2021.
- [47] INTEL CORPORATION. **Power supply design guide for desktop platform form factors**, rev 1,31, abr. 2013. Disponível em: <https://www.intel.com.br/content/dam/www/public/us/en/documents/guides/power-supply-design-guide.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- [48] CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **Generalized Test Protocol for Calculating the Energy Efficiency of Internal Ac-Dc and Dc-Dc Power Supplies**, rev. 6.7, mar. 2014. Disponível em: <<https://efiling.energy.ca.gov/GetDocument.aspx?tn=213578&DocumentContentId=23321>>. Acesso em: 13 mar. 2021.
- [49] INMETRO - **Programa de Análise de Produtos**: relatório da análise em fontes de alimentação para computadores do tipo desktop. Divisão de Orientação e Incentivo à Qualidade - Diviq, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO, Rio de Janeiro, Brasil, dez. 2011. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/fontes_computador.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2021.
- [50] IEC 61000-4-30, **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods**. International Electrotechnical Commission - IEC, 1 ed., 2003.
- [51] IEC 61000-4-7, **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics**

measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. International Electrotechnical Commission - IEC, 2 ed., 2002.

[52] **Clearexult 80 Plus, 2020.** Página “*Programs Detail*”. Disponível em: <<https://www.clearexult.com/80plus>>. Acesso em 25 mar. 2021.

[53] SUN, J. **On the Zero-Crossing Distortion in Single-Phase PFC Converters.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 19, n.º. 3, mai. 2004. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1296744>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

[54] HO, J.M.; LIU, C.C. **The Effects of Harmonics on Differential Relay for a Transformer.** In: 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution – CIRED, Amsterdam, Netherlands, jun. 2001. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/942900>>. Acesso em: 19 mar. 2021.

[55] CANTHERM - **MF72 Datasheet termistor.** Disponível em: <<https://www.datasheets360.com/part/detail/mf72-5d9/2990945508213110008/>>. Acesso em: 15 mar. 2021.

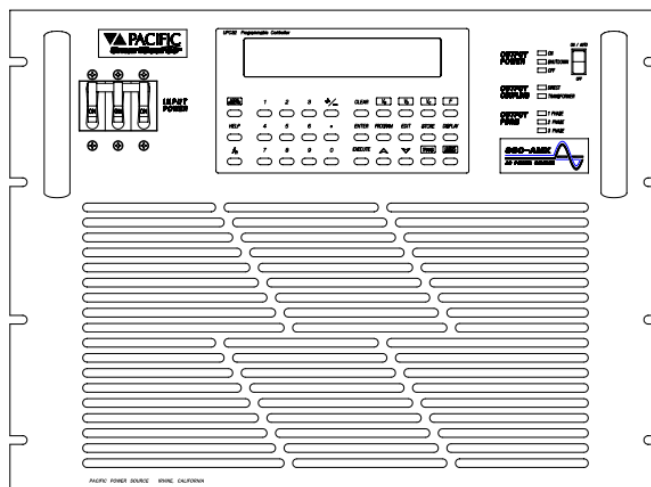
[56] MOTTA, L.J. et al. **Immunity of Power Supplies to Highly Distorted AC Voltage.** In: IEEE PES General Meeting 2018, Portland, EUA, ago. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8586216>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

[57] KOTSOPOULOS, A.; HESKES, P.J.M.; JANSEN, M.J. **Zero-Crossing Distortion in Grid-Connected PV Inverters.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 52, n.º. 2, abril 2005. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1413563>>. Acesso em: 27 mar. 2021.

[58] A. BENDRE et al. **Are Voltage Sags Destroying Equipment? Equipments failure caused by power quality disturbances.** IEEE Industry Applications Magazine, pp 12-21, ago. 2006. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1678326>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

[59] S. M. AKOLKAR; B. E. KUSHARE. **Effect of Point on Wave Angle on Sensitivity of AC Coil Contactor and SMPS to Voltage Sags.** In: IEEE Conference Proceedings IPEC, Singapura, out. 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5696951>>. Acesso em: 30 mar. 2021.

APÊNDICE A – Características técnicas da fonte geradora de sinais arbitrários



A fonte programável utilizada, modelo 345AMX do fabricante Pacific Smart Source, é um conversor CA de alta performance designado para instalação em racks padrão 19". Este dispositivo é utilizado para testes de equipamentos de modo a variar a tensão e frequência de saída através de um controlador intercambiável. O controlador UPC32 empregado nesta fonte permite o controle manual da tensão e frequência e quando associado a *software* específico possibilita simular eventos transitórios e distúrbios na forma de onda.

A fonte em questão pode gerar três sinais de saída (trifásica) com tensão de fase variando de 0-135 V_{AC} (fase-neutro). A separação das fases é fixada em 180° quando opera no modo bifásico, em 120° no modo trifásico, ou podendo o ângulo de fase ser alterado através do controle (programável).

Principais características da fonte 345AMX:

- Tensão de entrada: 220 V_{AC} ± 10%, 47-63 Hz (trifásica);
- Corrente de entrada: 20 A_{RMS};
- Tensão de saída: 0-135 V_{AC} (fase-neutro);
- Corrente de saída: monofásico – 36 A_{RMS}; 165 A_{pico};
 bifásico – 12 A_{RMS}; 55 A_{pico};
 trifásico – 12 A_{RMS}; 55 A_{pico};
- Potência de saída: 4,5 kVA;
- Fator de potência: igual ao fator de potência da carga até 0,7. Abaixo deste valor deve-se consultar manual (gráfico de *derating*);
- Frequência de saída: 20-5000 Hz ± 0,25% db (± 3%);
- Distorção de saída:
 menor que 0,10% para frequências até 1 kHz;
 menor do que 0,25% para frequências até 5 kHz

- Ruído: 0,25 db \pm 3%;
- Componente DC na saída: menor que 5 mV_{CC};
- Dimensões: 356 x 483 x 597 mm (altura, largura e profundidade, respectivamente);
- Massa: 77 kg.

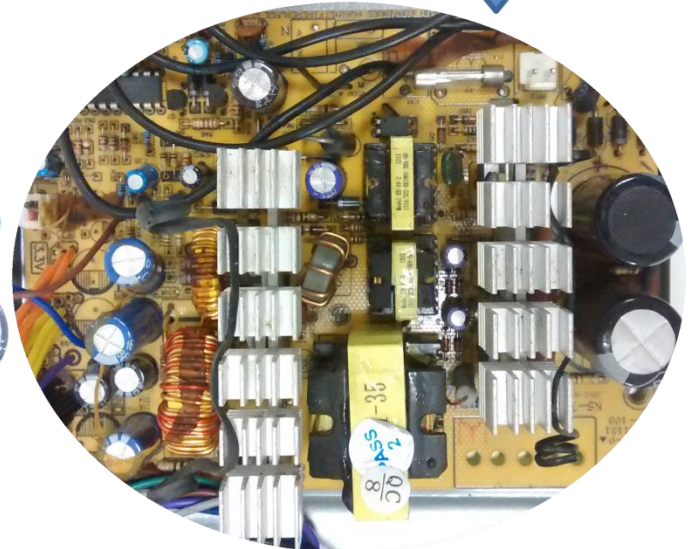
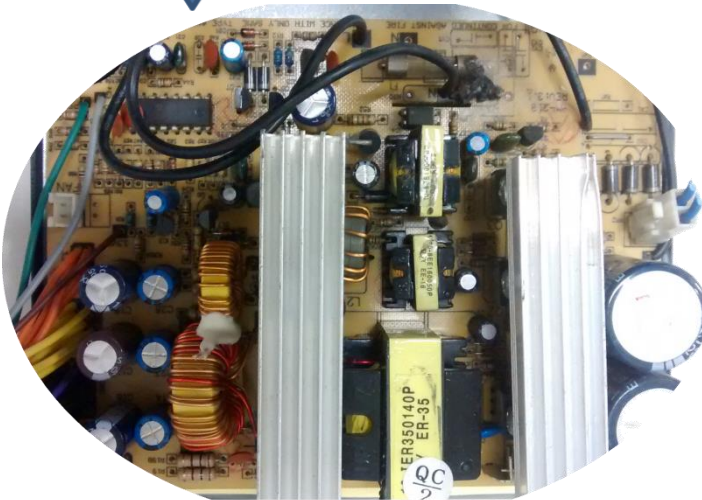
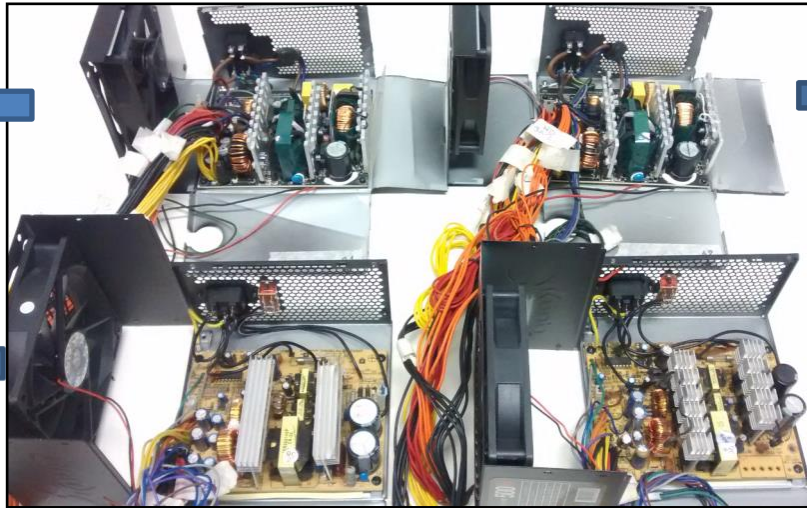
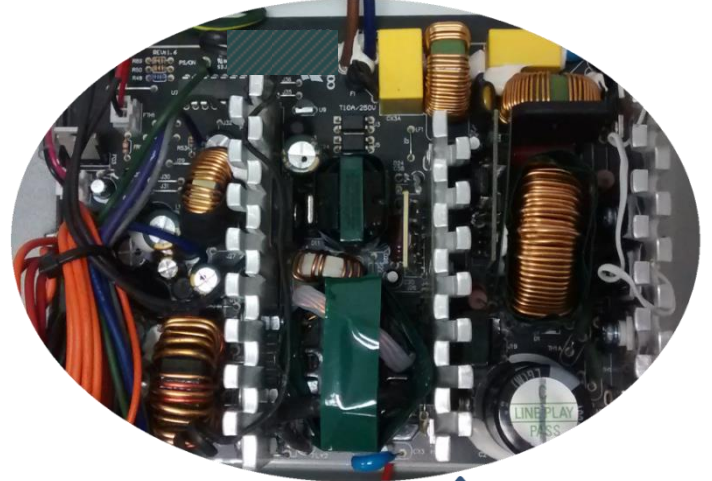
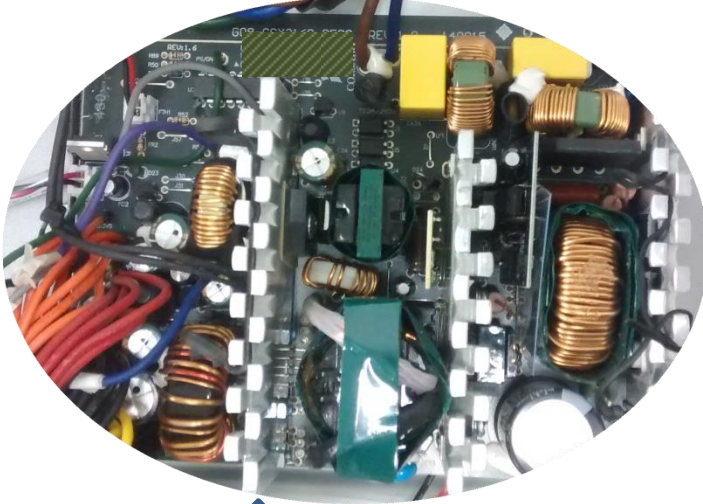
Principais características do controlador UPC32:

- Frequência de 20 a 5 kHz em 3 faixas com precisão 0,01% da escala total;
20-99,99 Hz - resolução 0,01 Hz
100-999,9 Hz - resolução 0,1 Hz
1000-50000 Hz - resolução 1 Hz
- Tensão de 0 a 150 V com resolução de 0,1 V;
precisão de 0,5% quando CSC (*continuous self calibration*) desabilitado
precisão de 0,05 quando CSC habilitado
- Angulo de fase de 0-359° com resolução de $\pm 1^\circ$ e precisão de $\pm 0,5^\circ$
- Forma de onda produzida da ordem 2 até 51;
Magnitude com faixa de 0-9999%
Resolução de 1%
Precisão de +/- 1% com relação a fundamental
- Angulo de fase com faixa de 0-359,9° (referente à forma de onda gerada);
Resolução de 1°
Precisão de +/- 2% F.S.

APÊNDICE B – Fontes de computadores utilizadas durante os testes

Fonte A1

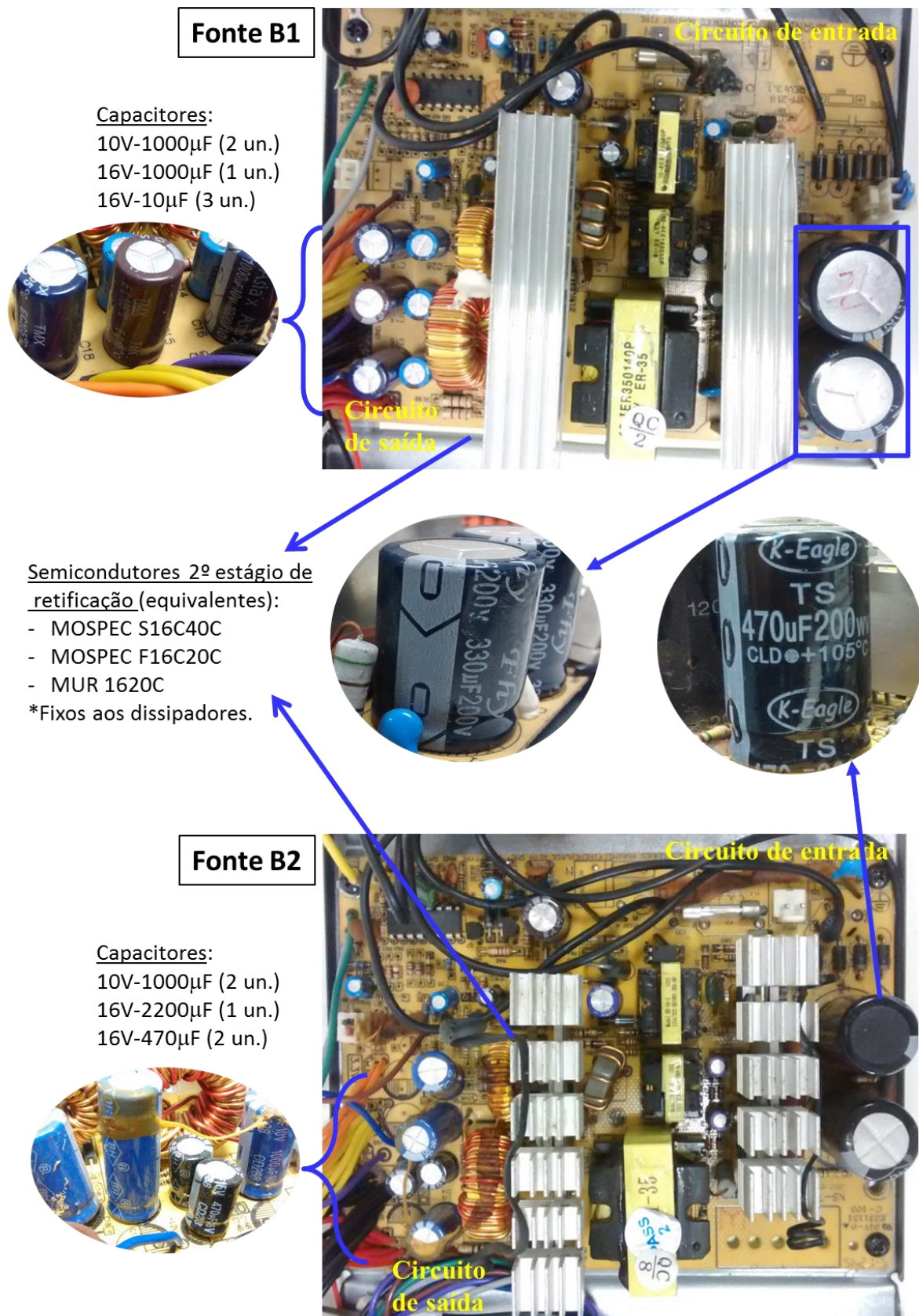
Fonte A2



Fonte B1

Fonte B2

APÊNDICE C – Ilustração comparativa entre as fontes B1 e B2



ANEXO A – Características técnicas do medidor 1

O medidor 1, modelo 434 com algumas características adicionais do modelo 435, do fabricante Fluke permite a avaliação do sistema elétrico através das medições de tensão, corrente e frequência. Através dessas grandezas é possível analisar potência, energia, flutuações (*flicker*), afundamentos e elevações de tensão, desequilíbrio de tensão e corrente, distorções harmônicas, etc. Os dados podem ser visualizados instantaneamente através do *display* ou a partir dos registros com a função “*Logger*”.

O medidor pode ser utilizado para análise de sistemas monofásicos e trifásicos, com arranjo em delta ou estrela, por exemplo.

Principais características do medidor Fluke 434

- Tensão RMS: 1-1000 $V_{RMS} \pm 0,5\%$ da tensão nominal com resolução de 0,1 V_{RMS} ;
- Tensão de pico: 1-1400 V_{pico} com precisão de 5% da tensão nominal e resolução de 1 V;
- Corrente RMS com *clamp* i400s: 0-40/400 $A_{RMS} \pm 1\% \pm 5$ dígitos e resolução de 0,1/1 A_{RMS} ;
- Corrente de pico com escala de 1 mV/A: 0-5500 $A_{pico} \pm 5\%$ com resolução de 1A;
- Frequência para 60 Hz: 51-69 Hz $\pm 0,01$ Hz com resolução de 0,01 Hz;
- Potência ativa e reativa: 1-20 M(W, var) $\pm 1,5\% \pm 10$ dígitos com resolução de 0,1-1 k(W, var);
- Fator de potência: 0-1 $\pm 0,03$ com resolução de 0,01;
- Fator de deslocamento: 0-1 $\pm 0,03$ com resolução de 0,01;
- Tensão RMS para afundamento e elevação de tensão em ½ ciclo: 0-200% da tensão nominal $\pm 1\%$ da tensão nominal com resolução de 0,1 V_{RMS} ;
- Duração do afundamento e elevação de tensão com precisão de 1 ciclo e resolução de ½ ciclo;
- Ordem harmônica: 1-50 de acordo com IEC 61000-4-7;
- Tensão RMS relativa (%f) para harmônicos: 0-100% $\pm 0,1\% \pm n \times 0,1\%$;
- Tensão RMS absoluta para harmônicos: 0-1000 $V_{RMS} \pm 5\% \pm 2$ dígitos com resolução 0,1 V_{RMS} ;
- Corrente RMS relativa (%f): 0-100% $\pm 0,1\% \pm (n \times 0,1\%)$ com resolução de 0,1%;
- Corrente RMS absoluta: 0-4000 mV x escala do *clamp* $\pm 5\% \pm 5$ dígitos com resolução de 1 mV_{RMS} x escala do *clamp*;
- THD_(n=40) em %f: 0-100% $\pm 2,5\%$ (para tensão e corrente) e resolução de 0,1%;
- Frequência harmônica: 0-3500 Hz ± 1 Hz com resolução de 1 Hz;
- Ângulo de fase harmônica: -360°-.+0° $\pm (n \times 1,5^\circ)$ com resolução de 1°;
- Sistema de amostragem através de conversores analógico-digital com resolução de 16 bits em 8 canais;
- Velocidade de amostragem de até 200 kS/s em cada canal simultaneamente;

ANEXO B – Características técnicas do medidor 2

O medidor 2, do fabricante *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL), modelo SEL734P, classe CL20 (corrente até 20 A), possibilita medições referentes à potência e energia (demanda), assim como parâmetros da qualidade da energia elétrica (flutuações, afundamentos e elevações de tensão, harmônicos, etc). Este medidor é bastante empregado em subestações sendo fixado em painéis conectado em série aos circuitos, geralmente trifásicos, por meio de transformadores de corrente (TC). No entanto, o mesmo pode ser utilizado como um medidor portátil adaptado em um *case* do fabricante.

O medidor SEL734P permite a análise numérica de dados através do *display*, além de registros armazenados na memória com auxílio de *software* específico.

Principais características do medidor SEL734P

- Tensão RMS de entrada: 0-300 V;
- Corrente RMS de entrada: 0,15-20 A;
- Frequência de entrada: 45-65 Hz;
- Precisão de medição (RMS) com média de um segundo:
 - Tensão: $\pm 0,15\%$;
 - Corrente na fase: $\pm 0,15\%$;
 - Corrente no neutro: $\pm 1\%$;
 - Frequência: $\pm 0,01$ Hz;
- Precisão de medição para valores instantâneos (25ms):
 - Tensão: $\pm 1\%$;
 - Corrente na fase: $\pm 1\%$;
 - Corrente no neutro: $\pm 2\%$;
 - Frequência: $\pm 0,01$ Hz;
- Precisão para harmônicos conforme IEC 61000-4-7-2002:
 - Tensão: $V_{h_n} \geq 1\% V_n - 5\% V_{h_n}$;
 - $V_{h_n} < 1\% V_n - 0,05\% V_n$;
 - Corrente: $I_{h_n} \geq 3\% I_n - 5\% I_{h_n}$;
 - $I_{h_n} < 3\% I_n - 0,15\% I_n$;

(V_n e I_n são a tensão e corrente nominal, V_{h_n} e I_{h_n} são as enésimas ordens harmônicas para tensão e corrente, respectivamente)
- THD: $\pm 5\%$ ($\pm 10\%$ para pior caso);
- 16 amostras por ciclo do sistema de potência para quantidades instantâneas;
- 8.000 amostras por segundo para valores RMS e harmônicas.

ANEXO C – Características técnicas do medidor 3

O medidor 3, do tipo portátil, é do fabricante Dranetz-BMI, modelo PowerGuide 4400. É um dispositivo medidor/monitor de qualidade da energia elétrica, que pode monitorar, registrar e exibir dados em quatro canais de tensão e quatro canais de corrente simultaneamente. Faz medições das variáveis tensão, corrente e frequência, além da análise de distúrbios da qualidade da energia elétrica. Este equipamento atende aos requisitos de medidores de classe A, conforme IEC 61000-4-30-2004.

A partir do display, com tecnologia *touch screen* é possível avaliar dados numéricos e gráficos instantaneamente. O medidor também possibilita fazer registros com os dados sendo armazenados em cartão do tipo *flash* a partir de medições em sistemas monofásicos ou trifásicos, como em arranjos em delta ou estrela, por exemplo.

Principais características do medidor Power Guide 4400

- Tensão: 10-600 $V_{RMS} \pm 0,1\%$ da leitura, $\pm 0,05\%$ da escala completa;
- Corrente: 10-200% da faixa das sondas/*clamps* utilizados na entrada $\pm 0,1\%$ da leitura $\pm 0,05\%$ da escala completa mais precisão do *clamp*;
- Frequência: 30-70 Hz com até 25% $V_{THD} \pm 0,2\%$ da leitura;

ANEXO D – Características técnicas do osciloscópio

O osciloscópio utilizado é o modelo digital TPS2014 do fabricante Tektronix. Possui 4 canais isolados, largura de banda de 100 MHz e taxa de amostragem de 1 GS/s, com registro de 2500 pontos por canal. Este equipamento permite o registro de dados através de cartão de memória, possibilita análises harmônicas, além de possuir função específica para o cálculo de potência.

Principais características do osciloscópio TPS2014

- Resolução do digitalizador vertical: 8 bits por canal simultaneamente;
- Sensibilidade da faixa de V/divisão: 2 mV para 5 V/divisão;
- Precisão vertical (DC): $\pm 3\%$;
- Precisão para medição de sinal DC com média ≥ 16 formas de ondas (posição vertical no zero): $\pm [3\% \times (\text{leitura} + \text{posição vertical}) + 1\% \text{ da posição vertical} + 0,2 \text{ divisões}]$;
- Tensão máxima de entrada: 300 V_{RMS} para conexão no terminal BNC;
- Precisão da tensão para duas médias na aquisição ≥ 16 formas de ondas: $\pm (3\% \times \text{leitura} + 0,05 \text{ divisões})$;
- Faixa de posição: 2 mV para 200 mV/divisão $\pm 2 \text{ V}$; $>200 \text{ mV}$ para 5V/divisão $\pm 50 \text{ V}$;
- Faixa de tempo: 5 ns para 50s/divisão com precisão de 50 ppm;
- Ponta de prova padrão: P2220 200 MHz, atenuação de 1X/10X;
Largura de banda: 200 MHz para 10X e 6 MHz para 1X;
Relação da atenuação: 10:1 $\pm 2\%$ para 10X e 1:1 $\pm 2\%$ para 1X;
Máxima tensão de entrada: 300 V_{RMS} ou 300 V_{DC} (CAT II) para 10X e 150 V_{RMS} ou 150 V_{DC} (CAT II) para 1X.

ANEXO E – Características técnicas do registrador de temperatura

O registrador de temperatura da Eurotherm Chessell modelo 6100E permite uma taxa de amostragem completa de 125 ms para seus 6 canais de entrada isolados, cada um podendo ser configurado individualmente. Além de tela com tecnologia *touch screen*, o medidor possui capacidade de armazenamento de dados através de memória interna, cartão de memória, ou mesmo por meio de dispositivos com conexão USB, como *pendrives*, por exemplo.

Principais características do registrador de temperaturas 6100E

- Tipo de entrada: tensão DC, corrente DC (com *shunt*), termopar, RTD 2/3 fios, contato seco > 60 ms;
- Isolação de canal para canal: 300 V_{RMS/DC};
- Método de conversão A/D: > 16 bits;
- Taxa de atualização/acionamento: entrada/saída de relé, taxa de amostragem de 8 Hz;
- Faixa de entrada:
 - 38 mV a 38mV: resolução de 1,4 μ V com erro de 0,013% I/P + 0,031% da faixa;
 - 20 V a 20 V: resolução de 720 μ V com erro de 0,075% I/P + 0,027% da faixa;
- Erro devido ao shunt: 0,1% da entrada;
- Erro compensação junção de referência (termopar): 1°C com instrumento a 25°C;
- Resolução e erro para resistência:
 - 0 Ω a 150 Ω : 5 m Ω / 0,027% I/P + 0,034% da faixa;
 - 0 Ω a 5 k Ω : 148 m Ω / 0,030% I/P + 0,034 da faixa.

ANEXO F – Características técnicas do multímetro com termografia

O multímetro térmico True-RMS, modelo 279 FC do fabricante Fluke, possui termovisor integrado, além de 15 funções de medição: tensão CA com filtro passa baixo, tensão CC, resistência, continuidade, teste de diodos, corrente CA, frequência, etc. Este multímetro permite salvar medições e imagens enquanto se comunica sem o uso de fios com um *smartphone* em até 6,1 m de distância (sem obstruções), com resolução da imagem de 80 x 60 em uma tela de LCD colorida de 3,5 pol./8,89 cm.

Principais características do multímetro termográfico 279 FC

- Categoria da medição CAT III 1000 V, CAT IV 600 V;
- Medição de tensão: CA e CC até 1000 V;
- Medição de corrente: CA até 2.500 A (com iFlex opcional);
- Frequência: 100 kHz;
- Precisão básica: 0,09% em CC;
- Largura de banda: 1% de 45 Hz a 65 Hz, filtro passa baixo em tempo total;
- Medição de temperatura: -10 °C a 200 °C;
- Resolução de infravermelho: -80 x 60;
- Frequência de captura de imagens: 8 Hz;
- Campo de visão: 36° (l) x 27° (a);
- NETD: ≤ 200 mK;
- Faixa espectral do infravermelho: 7,5 a 14 microns;
- Precisão para temperatura: ± 5 °C de -10 °C a 200 °C;
- Emissividade: 0,95 fixo;
- Compensação em segundo plano: 20 °C fixo;
- Coeficiente de temperatura: adicionar 0,1 x precisão especificada para cada °C acima de 28 °C ou abaixo de 18 °C.

ANEXO G – Artigo 01

Título: *Immunity of Power Supplies to Highly Distorted AC Voltage*;

Autores: L. J. da Motta; F. L. L. Jung; P. F. Ribeiro; F. N. Belchior; A. McEachern;

Apresentado em: *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*;

Data da conferencia: 5 a 10 de Agosto de 2018;

Local da conferência: Portland, EUA;

Data de adição ao *IEEE Xplore*: 24 de dezembro de 2018;

ISBN (eletrônico): 978-1-5386-7703-2;

ISSN (eletrônico): 1944-9933;

Número de acesso: 18364316;

DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586216;

Editora: IEEE.

Immunity of Power Supplies to Highly Distorted AC Voltage

L. J. da Motta, F. L. L. Jung, P. F. Ribeiro, Fellow, IEEE
Institute of Electrical Systems
UNIFEI
Itajubá, Brazil
luciomotta@unifei.edu.br,
fernandojung@unifei.edu.br,
pfribeiro@ieee.org

F. N. Belchior, Member, IEEE
Faculty of Science and Technology
UFG
Aparecida de Goiânia, Brazil
fnbelchior@hotmail.com

A. McEachern, Fellow, IEEE
Power Standards Lab
Alameda, California USA
alex@powerstandards.com

Abstract—Power supplies for electronic devices are now a significant segment of the total load on AC power grids. Many standards and recommendations have been developed to improve compatibility between power grids and electronic devices, including standards that set limits on voltage distortion. This work experimentally tests the compatibility of computer power supplies with high levels of voltage harmonics. It is demonstrated that the tested power supplies can tolerate much higher voltage distortions than typical limits recommended by standards. The work also shows that switched mode power supplies with unity-power-factor control (PFC) tolerate even higher levels of voltage distortion than traditional power supply designs.

Index Terms—harmonic limits, switched mode power supply, immunity, PFC circuit.

In most standards today, harmonic distortion limits are related primarily to thermal impact, so they are not effectively applied to compatibility with electronic devices [5]. Many of today's limits also try to describe a multidimensional and complex phenomenon into a single number, or a small group of numbers, possibly hiding information about its true impact on PQ compatibility.

This work proposes to investigate experimentally one specific aspect of PQ compatibility: the impact of voltage harmonic distortion on computer power supplies.

II. OVERVIEW

A. Harmonic Distortion

Harmonic analysis is a common way to describe distortion of voltage and current waveforms. It is useful because most

ANEXO H – Artigo 02

Título: *Power Supplies Under Sags and Distorted AC Voltage*;

Autores: L. J. da Motta; F. L. L. Jung; T. A.S. Rezende; P. F. Ribeiro; F. N. Belchior; A. McEachern;

Apresentado em: *IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*;

Data da conferencia: 4 a 8 de Agosto de 2019;

Local da conferencia: Atlanta, EUA;

Data da adição ao *IEEE Xplore*: 30 de janeiro de 2020;

ISBN (eletrônico): 978-1-7281-1981-6;

ISSN (eletrônico): 1944-9933;

Número de acesso (INSPEC): 19302534;

DOI: 10.1109/PESGM40551.2019.8973538;

Editora: IEEE.

Power Supplies Under Sags and Distorted AC Voltage

L. J. da Motta, F. L. L. Jung, T.
A.S. Rezende, P. F. Ribeiro,
Fellow, IEEE
Institute of Electrical Systems
UNIFEI
Itajubá, Brazil
luciomotta@unifei.edu.br,
fernandojung@unifei.edu.br,
tulio10005@gmail.com
pfribeiro@ieee.org

F. N. Belchior, Member, IEEE
Faculty of Science and Technology
UFG
Aparecida de Goiânia, Brazil
fnbelchior@hotmail.com

A. McEachern, Fellow, IEEE
Power Standards Lab
Alameda, California USA
alex@powerstandards.com

Abstract— This paper describes the performance of switched mode computer power supplies under voltage sags and harmonic distortions. The tests were carried out in a controlled lab environment where the basic parameters were recorded to allow a detailed analysis of the condition of the power supply under the different voltage excitations. The results show the impact of the waveforms that may affect the performance of the supplied load, but did not cause any observable damage on the power supply. With the massive use of power electronic converters for generation and load supply it is expected that higher levels of voltage distortions be present on the electric distribution system. The experiments show the need for more investigation with different types and topologies of power supplies for a comprehensive assessment of their performance.

Index Terms—power supply, harmonic distortion, voltage sag, measurements.

I. INTRODUCTION

This work proposes to investigate experimentally the impact of voltage harmonic distortion associated to voltage sags on computer power supplies, continuing the work from [1].

II. VOLTAGE SAG - OVERVIEW

Voltage sags mainly occur due to faults on the electrical system (i. e., short-circuits), or even due to heavy loads. As in standard IEEE 1668-2017 [6], different elements may influence the propagation of the voltage sag: topology of the electrical system, type and location of fault, line impedance and transformer connections. Therefore, any equipment may go through this power quality disturbance.

Even though it is one of the most common PQ events, voltage sags are seldom normalized with imposing limits. As in National Electric Power Agency in Brazil (ANEEL) [7], it was just recently regimented with the addition of Impact Factor, and, even so, it is not a strict regulation.

ANEXO I – Artigo 03

Título: Análise do desempenho de fontes de computadores frente a distorções harmônicas e afundamentos de tensão;

Autores: L. J. da Motta; F. L. L. Jung; P. F. Ribeiro; F. N. Belchior;

Apresentado em: Será apresentado;

Data da conferencia: 29 de Agosto a 01 de Setembro de 2021;

Local da conferencia: *Online* (sede em Foz do Iguaçu, Brasil);


Editora: SBQEE.



**XIV
CBQEE**
Conferência Brasileira sobre
Qualidade da Energia Elétrica



sbqee
Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica



UDC
CENTRO
UNIVERSITÁRIO

Análise do desempenho de fontes de computadores frente a distorções harmônicas e afundamentos de tensão

L.J. Motta¹
F.L.L. Jung¹
P.F. Ribeiro¹
F.N. Belchior²

¹Universidade Federal de Itajubá
²Universidade Federal de Goiás

Resumo—As fontes de alimentação são amplamente utilizadas em equipamentos eletroeletrônicos, havendo vários modelos e diferentes topologias a fim de promover melhor desempenho e eficiência. Nesta vertente, este trabalho, busca avaliar o impacto em fontes de computadores submetidas a afundamentos de tensão concomitantemente a distorções harmônicas. A partir de dados laboratoriais é mostrado que o objeto de teste, que faz uso de corretor de fator de potência (PFC), teve melhor performance do que o modelo sem PFC mediante as condições impostas. Embora nenhum dos dois modelos tenha sofrido avaria, ou necessitado de intervenção para continuar funcionando, com base nos resultados pode-se presumir que um computador ligado a suas saídas terá o desempenho comprometido dependendo do distúrbio de qualidade da energia elétrica a qual a fonte é submetida.

Palavras chaves—fontes de computador, distorção harmônica, afundamento de tensão.

Os computadores, assim como a maioria dos equipamentos, fazem uso de conversores de energia, tendo como exemplo as fontes de alimentação CA-CC, que para a maioria dos consumidores é o quesito que menos importa durante a compra de um computador, segundo [2]. No entanto, esta unidade é uma das que mais deveriam ser levadas em consideração, pois a qualidade destas está associada ao desempenho do computador como um todo, assim como no bom uso da rede elétrica. Sendo assim, vários estudos têm sido relacionados ao desempenho, eficiência e diferentes topologias de fontes de computadores [3,4,5]. Em [6] dois modelos de fontes, com e sem corretor de fator de potência (PFC), foram submetidas a elevadas distorções harmônicas, mostrando que ambas tiveram alta imunidade ao sinal de alimentação composto por 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas, principalmente o modelo com PFC, que operou com distorção harmônica total de tensão (DTH) 10 vezes maior que o limite de 10% recomendado por [7].

ANEXO J – Artigos não relacionados com a dissertação produzidos durante o período de mestrado

Título: Considerações Sobre Fator de Potência em Prédio Universitário com Geração Fotovoltaica;

Autores: L. J. da Motta; F. L. L. Jung; P. F. Ribeiro; F. N. Belchior;

Apresentado em: XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE);

Data da conferencia: 21 a 23 de Agosto de 2017;

Local da conferência: Curitiba, Brasil;

Editora: SBQEE.

Título: Análise da Contribuição de Inversores Fotovoltaicos no Fator de Potência de uma Instalação Real;

Autores: L. J. da Motta; F. L. L. Jung; T.S.S. Lino; P. F. Ribeiro; F. N. Belchior;

Apresentado em: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE);

Data da conferencia: 01 a 04 de Setembro de 2019;

Local da conferência: São Caetano do Sul, Brasil;

ISSN: 2236-8531;

Editora: SBQEE.

Título: *A Proposal for Power Quality Management System;*

Autores: E.L.N. Carvalho; F.O. Passos; I.O. Cyrillo; J. Miranda; J.M.C. Filho; J.R. Carneiro;

L.J. Motta; M.V. Costa; N.B. Pereira; P.M. Silveira; T.C. Oliveira;

Apresentado em: *XIX International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP);*

Data da conferencia: 6 a 7 de Julho de 2020;

Local da conferência: Dubai, Emirados Árabes;

ISBN: 978-1-7281-3698-1

DOI: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177914;

Editora: IEEE.

Título: Proposta de um Sistema de Gerenciamento de Qualidade da Energia;

Autores: E.L.N. Carvalho; F.O. Passos; I.O. Cyrillo; J. Miranda; J.M.C. Filho; J.R. Carneiro;

L.J. Motta; M.V. Costa; N.B. Pereira; P.M. Silveira; T.C. Oliveira;

Apresentado em: XIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica (CBQEE);

Data da conferencia: 01 a 04 de Setembro de 2019;

Local da conferência: São Caetano do Sul, Brasil;

ISSN: 2236-8531;

Editora: SBQEE.