



MOU
621.3
5.237d
TES/MEC

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESEMPENHO DE FONTES LINEARES E
CHAVEADAS NO CONTEXTO DA QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA

ANA CLÁUDIA DAROZ DOS SANTOS

Uberlândia, 27 de Setembro de 2001

SISBI/UFU



1000204130



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DESEMPENHO DE FONTES LINEARES E
CHAVEADAS NO CONTEXTO DA QUALIDADE
DA ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por Ana Cláudia Daroz dos Santos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

José Carlos de Oliveira, PhD (UFU) – Orientador

Ruth Pastora Saraiva Leão, PhD (UFC)

Aloísio de Oliveira, Dr. (UFU)

Antônio Carlos Delaiba, Dr. (UFU)

Uberlândia, 27 de Setembro de 2001

Dedico este trabalho aos meus pais, Olivar (in memoriam) e Aparecida, aos meus queridos filhos Ian e Bruna e ao meu marido Silmário pelo apoio, compreensão, amor, dedicação e incentivo a mim dispensados, essenciais para o desenvolvimento e conclusão desta dissertação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor **José Carlos de Oliveira** meu mais profundo agradecimento, pela confiança depositada, amizade, paciência, compreensão às minhas limitações e orientação segura, que fez com que metas fossem atingidas e este trabalho realizado.

Ao amigo **Marcelo Fandi**, pelo inestimável auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos amigos, **Anderson, Walkyria e Evandro**, pelos esclarecimentos e prestatividade durante a realização deste trabalho.

Aos amigos de todas as horas, **Sérgio e Isabel**, pelo companheirismo durante a minha estadia em Uberlândia.

À **Gradiente**, pelo aparelho de som gentilmente cedido, o qual foi submetido aos testes de laboratório.

Aos amigos da pós-graduação e funcionários da UFU, pelas valiosas sugestões, contribuições e atenção despendidas.

A **Deus** pela minha existência.

RESUMO

Na atualidade, as preocupações com os diversos temas relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica assumem importância destacada no cenário internacional e nacional. Destes, em particular, ressalta-se a questão do desempenho de componentes e dispositivos elétricos supridos por sistemas de potência contendo distúrbios considerados como itens de perda de qualidade. Neste contexto urge a necessidade de estudos voltados para o conhecimento dos níveis de dependências que as redes exercem sobre as mais diferentes cargas presentes nos sistemas residenciais, comerciais e industriais. Reconhecendo, pois, a importância destes fatos, esta dissertação de mestrado dedica-se a análise do desempenho de fontes lineares e chaveadas dentro do cenário da qualidade da energia elétrica. Utilizando equipamentos comerciais que empregam tais fontes como unidades primárias de alimentação, os desenvolvimentos descritos neste trabalho primam por estudos computacionais e experimentais envolvendo dois equipamentos eletrônicos, quais sejam, um aparelho de som e um microcomputador. O primeiro destinado a avaliação da operação de um tipo de fonte linear, e o segundo, como exemplo aplicativo de uma fonte chaveada. As atividades realizadas e que formam a essência desta pesquisa almejam, dentre outros fatores, esclarecer sobre os impactos produzidos por distúrbios no suprimento de tensão no funcionamento dos componentes enfocados, e obter informações sobre seus níveis de suportabilidade e sensibilidade.

ABSTRACT

Nowadays, researches and developments in relation to Electrical Power Quality rise as major concerns for both international and national communities. Amongst the various areas of interest emerge that associated to the operation of electrical components and devices supplied by non-ideal systems. In this way, it is necessary to carry on studies in order to achieve a good knowledge of the relationship between residential, commercial and industrial loads and the quality of the supply. Thus, this dissertation goes into the direction of studying the behaviour of linear and switched sources under power quality disturbances conditions. By using typical devices, which contain such types of supply units, i.e. a radio/CD player and a microcomputer, studies are performed by means of computational and experimental strategies. The first equipment illustrates the linear source performance and the second the switched source. The results to be given show, amongst others, the sources dependence on the quality of the supply and provide means to know the degree of equipment sensitivity or immunity to the problems related to Power System Quality.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução Geral.....	001
1.1. Considerações Iniciais.....	001
1.2. Síntese Bibliográfica e Motivação para os Estudos de Desempenho de Equipamentos Elétricos.....	003
1.3. Objetivos Gerais Desta Dissertação.....	006
1.4. Estrutura da Dissertação.....	007
CAPÍTULO II – Qualidade da Energia Elétrica: Desempenho de Equipamentos, Normas e Recomendações.....	009
2.1. Considerações Iniciais.....	009
2.2. Quadro Resumo dos Tipos de Distúrbios e Efeitos.....	010
2.3. Estado da Arte sobre os Estudos de Desempenho de Alguns Equipamentos Elétricos.....	013
2.4. Normas e Recomendações Brasileiras sobre Qualidade da Energia Elétrica.....	026
2.4.1. Interrupções Sustentadas.....	026
2.4.2. Tensões em Regime Permanente.....	029
2.4.3. Desbalanços ou Desequilíbrios de Tensão.....	030
2.4.4. Distorções Harmônicas.....	031
2.4.5. Oscilações ou Flutuações de Tensão.....	033
2.4.6. Estabilidade Eletromecânica.....	038
2.4.7. Variações na Frequência do Sistema Elétrico.....	040
2.4.8. Variações de Tensão de Curta Duração.....	041
2.1. Considerações Finais	041

CAPÍTULO III – Desempenho de Fontes Lineares no Contexto da	
Qualidade da Energia Elétrica – Uma Aplicação	
Típica: Aparelho de Som.....	
	043
3.1.	Considerações Iniciais..... 043
3.2.	Características e Circuito Equivalente do Equipamento Analisado..... 044
3.3.	Estratégias para os Estudos..... 047
3.3.1.	Ensaio Experimental..... 048
3.3.2.	Simulação Computacional..... 050
3.4.	Casos Estudados..... 051
3.4.1.	Caso 1 – Condição Ideal de Suprimento..... 053
3.4.2.	Caso 2 – Supridor Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração..... 060
3.4.2.1.	Funcionamento do Aparelho de Som No Modo Rádio..... 061
3.4.2.2.	Funcionamento do Aparelho de Som no Modo Reprodutor de <i>CDs</i> 066
3.4.3.	Caso 3 – Supridor Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração..... 066
3.4.3.1.	Funcionamento do Aparelho de Som no Modo Rádio..... 067
3.4.3.1.1.	Afundamento de Tensão de 60% com Duração de 100 Ciclos..... 067
3.4.3.1.2.	Afundamento de Tensão de 63% com Duração de 7 Ciclos..... 073
3.4.3.2.	Afundamento de Tensão de 90% com Duração de 7 Ciclos..... 076
3.4.3.2.	Funcionamento do Aparelho de Som no Modo reprodutor de <i>CDs</i> 077

3.4.4. Caso 4 – Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica.....	081
3.4.4.1. Funcionamento do Aparelho de Som no Modo Rádio.....	082
3.4.4.2. Funcionamento do Aparelho de Som no Modo Reprodutor de <i>CDs</i>	085
3.4.5. Caso 5 – Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão.....	088
3.4.6. Caso 6 – Suprimento com Oscilações de Tensão.....	098
3.5. Suportabilidade do Equipamento à Afundamentos de Tensão de Curta Duração e Interrupções.....	103
3.6. Considerações Finais.....	105

CAPÍTULO IV – Desempenho de Fontes Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica – Uma Aplicação Típica: Computador.....

4.1. Considerações Iniciais.....	108
4.2. Características e Circuito Equivalente do Equipamento Analisado.....	109
4.3. Estratégias para os Estudos.....	112
4.3.1. Estudos Experimentais.....	112
4.3.2. Simulação Computacional.....	114
4.4. Casos Estudados.....	115
4.4.1. Caso 1 – Condição Ideal de Suprimento.....	116
4.4.2. Caso 2 – Supridor Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração.....	123
4.4.3. Caso 3 – Afundamento de Tensão de Curta Duração.....	127
4.4.3.1. Funcionamento da Fonte Chaveada Diante de um Afundamento de Tensão de 40%.....	128

4.4.3.2.	Funcionamento da Fonte Chaveada Diante de um Afundamento de Tensão de 48%.....	133
4.4.3.3.	Comportamento da Fonte Chaveada Diante de um Afundamento de Tensão de 50% com Duração de 10 Ciclos.....	138
4.4.3.4.	Comportamento da Fonte Chaveada Diante de um Afundamento de Tensão de 50% com Duração de 11 Ciclos.....	143
4.4.3.5.	Comportamento da Fonte Chaveada Diante de um Afundamento de Tensão de 55% com Duração de 7 Ciclos.....	147
4.4.3.6.	Comportamento da Fonte Chaveada Diante de um Afundamento de Tensão de 55% com Duração de 8 Ciclos.....	149
4.4.4.	Caso 4 – Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica.....	152
4.4.4.1.	Interrupção do Fornecimento de Tensão com Duração de 7 Ciclos	153
4.4.4.2.	Interrupção do Fornecimento de Tensão com Duração de 8 Ciclos	157
4.4.5.	Caso 5 – Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão.....	160
4.4.6.	Caso 6 – Suprimento com Oscilações de Tensão.....	167
4.5.	Suportabilidade do Equipamento à Afundamentos de Tensão e Interrupções.....	171
4.6.	Considerações Finais.....	172

CAPÍTULO V – Conclusões Gerais.....	175
Referências Bibliográficas.....	180
Anexo A – Casos Estudados – Fonte Linear.....	184
Anexo B – Casos Estudados – Fonte Chaveada.....	189

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A energia elétrica caracteriza-se por ser um produto ou serviço altamente flexível, pois permite a sua conversão em diversos outros tipos de energia, tais como: térmica, luminosa, mecânica, etc.. Desta maneira, para que os diversos processos, nos quais esteja envolvida a energia elétrica, ocorram de maneira satisfatória, é de extrema importância que a mesma apresente o melhor grau de qualidade. Contudo, devido a uma série de fatores, a qualidade da energia entregue aos consumidores, sobretudo sob o ponto de vista da qualidade da tensão, pode se apresentar significativamente comprometida.

Destas preocupações surge o termo “**Qualidade da Energia**”, que é dirigido a uma extensa variedade de distorções na forma com que a energia elétrica é fornecida aos consumidores. Estas podem originar e/ou manifestar-se em vários pontos da rede elétrica, as quais podem ser de natureza local, ou seja, um distúrbio ocorrendo dentro da instalação consumidora, ou de natureza externa ou remota.

Face à nova realidade do setor elétrico brasileiro, onde, com a privatização as diversas concessionárias encontram-se sob controle de grupos oriundos de outros países, com padrões e gerências diversificadas, o assunto “Qualidade da Energia Elétrica” assume destacada importância no cenário energético nacional.

Em decorrência disto e de outros aspectos, sob o controle da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS), vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos têm sido realizados através dos grupos de trabalhos específicos, a exemplo daquele (GTE – QEE) incumbido de estabelecer as diretrizes para a normatização dos padrões da Qualidade da Energia na rede elétrica brasileira.

De forma complementar aos estudos voltados para a normatização da matéria, é fundamental que sejam estabelecidos parâmetros e dados confiáveis no sentido de definir, de forma qualitativa e quantitativa, diversos aspectos relacionados com o tema Qualidade da Energia Elétrica. Neste sentido reconhece-se os diferentes esforços conduzidos por centros de pesquisa, universidades, fabricantes, concessionárias, etc., todos voltados para um pleno domínio de temas como:

- Fontes responsáveis pela perda de qualidade dos suprimentos elétricos;
- Mecanismos de propagação dos distúrbios nos complexos elétricos;
- Efeitos sobre os componentes elétricos e cargas supridas, com destaque aos níveis de suportabilidade dos mesmos;
- Técnicas de medição e quantificação das grandezas associadas aos problemas de qualidade;
- Recomendações e normas para o controle dos níveis de perda de qualidade, etc..

Inseridos, pois, dentro deste universo de estudos, encontram-se os objetivos delineados pelo presente trabalho de pesquisa, o qual dedica-se a desenvolvimentos voltados para o conhecimento do desempenho de cargas elétricas, quando da operação sob condições não ideais de suprimento.

1.2. SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA E MOTIVAÇÃO PARA OS ESTUDOS DE DESEMPENHO DE EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

A exemplo de qualquer outro trabalho de pesquisa, este iniciou-se através de um profundo levantamento bibliográfico sobre os mais diversos assuntos relacionados com a operação de cargas elétricas sob condições de suprimento não ideal. Desta etapa, apresenta-se, na sequência, uma síntese a respeito das principais publicações encontradas e que realçam a importância das investigações.

Na referência [1], encontra-se um estudo realizado pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*), o qual define a sensibilidade de alguns equipamentos eletrônicos submetidos a afundamentos de tensão. Tais resultados incluem controladores de resfriamento, testadores de chips eletrônicos, robôs, CLP's e acionadores CC. Destaque deve ser dado ao comportamento dos CLP's que aponta para valores de suportabilidade que giram em torno de 50 a 60% da tensão nominal.

Em [2] é abordada também a sensibilidade de equipamentos eletrônicos como controladores de velocidade e CLP's. Nesta, os CLP's se mostram mais sensíveis a afundamentos de tensão, pois seu funcionamento pode ser comprometido para tensões da ordem de 80% a 85% da nominal. Ainda nesse trabalho, é possível encontrar o desempenho de lâmpadas de descarga de alta intensidade e bobinas de contadores para acionamento de motores elétricos.

Considerando ainda comportamento de controladores de processos, em [3] e [4] são também estabelecidas curvas de desempenho para várias famílias destes, as

quais permitem concluir não haver um comportamento homogêneo para os mesmos.

As referências [5], [6], [7] e [8], por sua vez, apresentam curvas de sensibilidade para computadores relacionadas a afundamentos de tensão e interrupções no fornecimento de energia elétrica. Através de comparações das curvas contidas em cada trabalho e mostradas no capítulo II desta dissertação, percebe-se que a tolerância de tensão varia para cada tipo de computador. Adicionalmente, as curvas apresentadas nas referências [5] e [6] definem também a operação destes equipamentos, e outros, para sobretensões transitórias e elevações de tensão.

Estudos dedicados a verificar o comportamento de fornos microondas, relógios digitais e videocassetes diante de afundamentos de tensão, interrupções no fornecimento de energia elétrica, elevações de tensão e sobretensões transitórias estão presentes na referência [9]. Através dessas investigações, obteve-se curvas que retratam a sensibilidade dos eletrodomésticos supracitados para interrupções e afundamentos de tensão. Similarmente à referência anterior, em [10] também é apresentado um estudo de desempenho de eletrodomésticos, a exemplo de relógios digitais, aparelhos de TV, fornos microondas, *fontes lineares e fontes chaveadas* diante de transitórios de tensão.

O desempenho de alguns tipos de lâmpadas fluorescentes compactas operando sob a influência de harmônicos é avaliado em [11]. Nesse artigo, ficou evidenciado que o tipo de reator que a lâmpada emprega é fator determinante na definição de sua sensibilidade.

A operação de aparelhos de televisão sob alimentação distorcida no que tange a harmônicos inteiros e fracionais foi verificada em [12]. Nessa pesquisa, ficou constatado que um dos grandes problemas para a operação de aparelhos de

televisão é a presença de inter-harmônicos, que podem ocasionar distorções em sua imagem.

Embora um exaustivo trabalho de busca por artigos tenha sido realizado, é plausível que trabalhos importantes tenham deixados de serem consultados. Contudo, diante do presente levantamento bibliográfico, pode-se constatar que:

- Ficou evidenciada a existência de inúmeros trabalhos dedicados a analisar o desempenho de diversos equipamentos elétricos perante afundamentos e elevações de tensão. Muito embora em todos os estudos os equipamentos tenham se mostrado sensíveis, não houve consenso com relação aos patamares suportáveis;
- Investigações sobre a sensibilidade de equipamentos submetidos a flutuações de tensão não foram encontradas;
- Existem vários estudos enfocando a sensibilidade de equipamentos eletrônicos, porém estes não co-relacionam o comportamento de suas fontes de alimentação conjuntamente ao funcionamento dos mesmos;
- Nenhuma das literaturas consultadas apresentou estudos computacionais, ferramenta esta de extrema utilidade no contexto da engenharia elétrica, assim como em outras áreas do conhecimento humano.

Reconhecendo-se então as limitações das publicações consultadas, surgiu a idéia desta dissertação, a qual encontra-se voltada para os estudos da interdependência de fontes chaveadas e lineares dentro do contexto da qualidade da energia elétrica.

1.3. OBJETIVOS GERAIS DESTA DISSERTAÇÃO

Dentro do cenário configurado, conforme anteriormente estabelecido, surge então este trabalho de mestrado, que se propõe a investigar o comportamento de fontes lineares e chaveadas no contexto da Qualidade da Energia Elétrica. As atividades previstas e executadas foram direcionadas para atender a esta área de investigação enfocando aspectos considerados relevantes, a exemplo de:

- Identificação das estruturas físicas das citadas fontes;
- Obtenção de circuitos elétricos equivalentes e representativos das mesmas;
- Modelagem e estudos computacionais e experimentais;
- Análise da operação sob diferentes condições não ideais de suprimento;
- Validação de modelos;
- Obtenção de curvas de sensibilidade aos mais diferentes itens de definição da qualidade da energia elétrica.

Vale ressaltar que, a maioria das publicações encontradas, como já dito, exploram o funcionamento dos equipamentos sob a ação individual de um ou outro item de qualidade. Para a investigação aqui relatada, muito embora os estudos sejam conduzidos dentro desta mesma sistemática, deve-se destacar que tanto os modelos computacionais como os experimentais permitem que o desempenho das fontes possa contemplar de forma individual ou conjunta os seguintes tipos de distúrbios:

- Elevações de tensão de curta duração (*voltage swell*);
- Afundamentos de tensão de curta duração (*voltage sag*);
- Interrupções;
- Harmônicos;
- Oscilações de tensão.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com vistas a atender as premissas supramencionadas, esta dissertação de mestrado encontra-se dividida na forma de 5 capítulos, os quais, excluindo o presente, são:

CAPITULO II – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA: DESEMPENHO DE EQUIPAMENTOS, NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo destina-se a apresentar um resumo de todos os itens de qualidade, suas causas e efeitos. Na continuidade, encontra-se exposto, com mais detalhes que o apresentado no capítulo I, o estado da arte sobre as principais constatações de equipamentos eletro-eletrônicos submetidos a problemas de qualidade de suprimento. Além disso, são ainda apresentadas as normas e recomendações brasileiras sobre Qualidade da Energia Elétrica que estão em vigor desde outubro de 2000.

CAPITULO III – DESEMPENHO DE FONTES LINEARES NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – UMA APLICAÇÃO TÍPICA: APARELHO DE SOM

Este capítulo encontra-se voltado para os estudos de desempenho de uma fonte linear. Tendo em vista que o exemplo prático escolhido está atrelado à operação de um aparelho de som, este corresponde ao equipamento a ser analisado ante os distúrbios presentes na rede elétrica. A estratégia empregada consiste no estabelecimento de procedimentos experimentais e computacionais, sendo que estes últimos fazem uso do Simulador *SABER*. Utilizando-se dos resultados experimentais e computacionais, termos comparativos são estabelecidos com vistas ao estabelecimento de um procedimento de validação dos modelos e

conhecimento da operação e sensibilidade da fonte sob a ação de um suprimento não ideal.

CAPITULO IV – DESEMPENHO DE FONTES CHAVEADAS NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – UMA APLICAÇÃO TÍPICA: COMPUTADOR

De forma análoga ao capítulo III, esta unidade da dissertação encontra-se voltada para a investigação do desempenho de uma fonte chaveada e, por conseguinte, de uma carga típica suprida por tal tipo de fonte. Para o caso em questão, a seleção recaiu sobre um computador comercial, o qual foi submetido ao mesmo conjunto de estudos supra definidos. Mais uma vez, os desenvolvimentos compreenderam estudos computacionais e testes de bancada.

CAPITULO V – CONCLUSÕES GERAIS

Finalmente, este capítulo relata, de uma forma geral, os aspectos mais importantes observados em cada capítulo. Adicionalmente, são feitos alguns comentários associados às comparações necessárias aos resultados obtidos, donde é possível tecer os comentários mais relevantes com respeito aos dados extraídos da pesquisa, principalmente com relação à importância do trabalho e suas principais contribuições. Ainda, são também enumeradas algumas sugestões e diretrizes para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA: DESEMPENHO DE EQUIPAMENTOS, NORMAS E RECOMENDAÇÕES

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

É cada vez mais crescente a preocupação com o comportamento de dispositivos e equipamentos elétricos operando nos sistemas de potência com problemas de qualidade. Neste sentido, fica evidente a necessidade de estudos voltados para a análise do desempenho dos mais diversos componentes e dispositivos elétricos dentro de um cenário em que os suprimentos elétricos apresentam anomalias na forma de distúrbios diversos. Reconhecendo pois a importância destes fatos e, em vista dos objetivos desta dissertação, considera-se relevante a apresentação e discussão de trabalhos publicados pela literatura própria, que expressem o estado da arte sobre a operação de diferentes dispositivos elétricos sob condições não ideais de alimentação.

Fixando-se pois estas premissas, este capítulo contempla, inicialmente, uma síntese dos principais problemas e efeitos da perda de qualidade de energia de um sistema e, na sequência, caminha na direção de apresentar um resumo das principais publicações encontradas sobre a interdependência entre a operação de pequenas cargas com características eletrônicas e o seu suprimento elétrico. Como ênfase principal para tais discussões, ressalta-se, sobremaneira, o que se denomina por níveis de suportabilidade ou insensibilidade dos dispositivos aos tipos de distúrbios normalmente encontrados.

Finalmente, objetivando consubstanciar o leitor sobre os indicadores de qualidade previstos pela legislação nacional, mostra-se as principais recomendações previstas pelos órgãos regulamentadores do país, quais sejam, as diretrizes acordadas pela ANEEL e ONS.

2.2. QUADRO RESUMO DOS TIPOS DE DISTÚRBIOS E EFEITOS

Os principais fenômenos responsáveis pela degradação da qualidade da energia, definidos como Itens de Qualidade, são:

- Transitórios;
- Afundamentos de tensão de curta duração “*Voltage Sag*”;
- Elevações de tensão de curta duração “*Voltage Swell*”;
- Subtensão em Regime Permanente;
- Sobretensão em Regime Permanente;
- Interrupções no Fornecimento de Energia;
- Oscilações de Tensão;
- Harmônicos;
- Desequilíbrios;
- Nível CC;
- Interharmônicos;
- “*Notching*”;
- Ruídos;
- Variações na frequência da tensão do sistema.

As tabelas 2.1 (a) e (b) fornecem, de maneira resumida, definições, causas e efeitos em equipamentos elétricos desses itens de qualidade da energia.

Tabela 2.1(a) – Características dos Itens de Qualidade

Tipo de Distúrbio	Definições	Causas	Efeitos
Transitórios	Manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais do sistema de energia elétrica.	<ul style="list-style-type: none"> • Descargas atmosféricas; • Chaveamento de cargas, capacitores, linhas, cabos e transformadores, etc.. 	<ul style="list-style-type: none"> • Excitação de circuitos ressonantes; • Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.; • Mal funcionamento de equip. controlados eletronicamente, conversores de potência, etc..
Afundamentos de tensão de curta duração "Voltage Sag"	Afundamentos de tensão de curta duração são caracterizados por uma redução no valor eficaz da tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto.	<ul style="list-style-type: none"> • Partida de grandes motores; • Energização de transformadores (corrente de "inrush"); • Conexão de cargas de grande potência à rede elétrica; • Curtos-circuitos ocorridos nas redes de distribuição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; • Falhas em equipamentos eletrônicos, como controladores de resfriamento, testadores de chips eletrônicos, acionadores CC, CLP's, robôs, computadores, etc..
Subtensões em Regime Permanente	Uma subtensão sustentada é caracterizada por um decréscimo no valor eficaz da tensão CA a valores menores que 0,9 pu, na frequência da rede, e com período de duração maior que 1 minuto.	<ul style="list-style-type: none"> • Carregamento excessivo de circuitos alimentadores; • Conexão de cargas à rede elétrica; • Desligamento de bancos de capacitores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possível interrupção na operação de equipamentos eletrônicos; • Redução do índice de iluminação para lâmpadas incandescentes; • Elevação do tempo de partida das máquinas de indução; • Redução no reativo fornecido pelos bancos de capacitores, etc..
Elevações de tensão de curta duração "Voltage Swell"	Uma elevação de tensão de curta duração é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto.	<ul style="list-style-type: none"> • Curtos-circuitos fase-terra no sistema elétrico; • Perda de grandes blocos de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior solitação do material isolante, podendo acarretar redução de vida útil de alguns equipamentos, como máquinas rotativas, transformadores, etc.; • Má operação de aparelhos eletrônicos, ou até a completa inutilização dos mesmos.
Sobretensões em Regime Permanente	Uma sobretensão é caracterizada por um aumento no valor eficaz da tensão CA acima de 1,1 pu (valores típicos entre 1,1 e 1,2 pu), na frequência da rede, por um período de duração maior que 1 minuto.	<ul style="list-style-type: none"> • Desligamento de grandes cargas; • Energização de bancos de capacitores, etc.. 	<ul style="list-style-type: none"> • Danos em equipamentos eletrônicos; • Redução de vida útil de TP's, TC's, cabos e máquinas rotativas; • Operação indevida de relés de proteção.
Interrupções	Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo que varia de 0,5 ciclo a 1 minuto. Quando a tensão de suprimento permanece em zero por um período de tempo superior a 1 minuto, está caracterizada uma interrupção sustentada.	<ul style="list-style-type: none"> • Faltas no sistema de energia; • Falhas de equipamentos; • Mal funcionamento de sistemas de controle; • Curtos-circuitos decorrentes de descargas atmosféricas e danos na rede causados por tempestades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falhas de equipamentos eletrônicos e de iluminação; • Desligamento de equipamentos; • Interrupções do processo produtivo, etc..

Tabela 2.1(b) – Características dos Itens de Qualidade – Continuação

Tipo de Distúrbio	Definições	Causas	Efeitos
Oscilações de Tensão	As oscilações de tensão correspondem a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu.	<ul style="list-style-type: none"> • Fornos a arco; • Máquinas de Solda; • Laminadores; • Elevadores de Minas; • Partida direta de grandes motores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oscilações de potência e no conjugado das máquinas elétricas; • Queda de rendimento dos equipamentos elétricos; • Interferência nos sistemas de proteção; • “Flicker” ou cintilação luminosa.
Harmônicos	Harmônicos são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental na qual opera o sistema elétrico. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente.	<p>Cargas não lineares, como:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lâmpadas de descarga; • Inversores de frequência; • Computadores e equip. de escritório, etc.. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; • Danos em capacitores, etc. • Erros em medidores de energia.
Desequilíbrios	Desequilíbrios podem ser caracterizados por diferenças nas amplitudes de tensões ou correntes dos sistemas trifásicos, assimetria nos ângulos de fase, ou ainda, assimetria conjunta de amplitudes e ângulos de fase.	<ul style="list-style-type: none"> • Cargas monofásicas e bifásicas; • Fornos a arco; • Assimetria entre as impedâncias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; • Geração, de 3º harmônico e seus múltiplos, pelos retificadores.
Nível CC	A presença de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é denominado “DC offset”.	<ul style="list-style-type: none"> • Operação ideal de retificadores de meia onda, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Saturação de transformadores; • Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramentos e de outros conectores.
Interharmônicos	São componentes de frequência, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema supridor (50 ou 60 Hz).	<ul style="list-style-type: none"> • Conversores estáticos de potência; • Cicloconversores; • Motores de indução; • Equipamentos a arco, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interferência na transmissão de sinais “carrier”; • Indução de “flicker” visual no “display” de equipamentos.
“Notching”	É um distúrbio de tensão causado pela operação normal de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para a outra.	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de eletrônica de potência. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução da vida útil de equipamentos eletrônicos.
Ruídos	Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 KHz, as quais são superpostas às tensões e ou correntes de fase.	<ul style="list-style-type: none"> • Chaveamento de equip. eletrônicos de potência; • Radiações eletromagnéticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distúrbios em equip. eletrônicos (computadores e controladores programáveis).
Variações na Frequência do Sistema	São definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental do sistema (50 ou 60Hz).	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.

Embora seja apenas um resumo, estas tabelas são suficientemente claras ao ponto de fornecer uma idéia geral sobre os itens de qualidade e suas implicações nos sistemas elétricos. Em [1], [13] e [14], estes assuntos são discutidos com maior riqueza de detalhes.

2.3. ESTADO DA ARTE SOBRE OS ESTUDOS DE DESEMPENHO DE ALGUNS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

No capítulo I desta dissertação, quando se apresentou uma síntese das principais publicações encontradas dentro da sub-área de conhecimento enfocada, ficou estabelecido que as constatações lá sintetizadas, voltariam a ser discutidas em maiores detalhes. Dentro desta proposta, apresentam-se, na sequência, os resultados mais significativos para, como já dito, cargas de pequeno porte e, na maioria, eletrônicas:

a) Estudos realizados pelo *Electric Power Research Institute* – EPRI [1]

Esta investigação teve por objetivo analisar os níveis de sensibilidade para variações na tensão de suprimento dos seguintes equipamentos:

- **Controladores de Resfriamento**

Estes apresentam uma sensibilidade muito grande às subtensões. Afundamentos de tensão da ordem de 20%, independentemente do tempo de duração, afetam o seu funcionamento adequado.

- **Testadores de *Chips* Eletrônicos**

Testadores de chips eletrônicos são muito sensíveis às variações de tensão, e devido à complexidade envolvida, freqüentemente requerem 30 minutos ou mais para reiniciarem a linha de testes. Estes testadores compostos de cargas eletrônicas, tais como: impressoras, computadores, monitores, etc., normalmente são retirados de operação se a tensão excursionar abaixo de 85% da nominal.

- **Acionadores CC**

São utilizados em grande escala em processos industriais. Desta forma, é importante que se mantenha uma qualidade no suprimento de energia a estas cargas. A partir de resultados preliminares de monitorações, estes mostraram-se sensíveis quando a tensão é reduzida para próximo de 88% da nominal, ou seja, apresentam um alto nível de sensibilidade.

- **CLP's**

Controladores Lógicos Programáveis robustos, pertencendo portanto a uma geração mais antiga, admitem zero de tensão por até 15 ciclos. Porém, os mais modernos, dotados de uma eletrônica mais sofisticada, começam a apresentar problemas na faixa de 50 a 60% da tensão nominal.

- **Robôs**

Robôs geralmente requerem uma tensão estritamente constante, para garantir uma operação apropriada e segura. Portanto, estes tipos de máquinas são freqüentemente ajustadas para saírem de operação, ou desconectados do sistema de distribuição, quando a tensão atinge níveis em torno de 90% da nominal, através da atuação da proteção por subtensão.

b) Estudos realizados por W. Edward Reid [2]

Este estudo também forneceu a sensibilidade relativa a variações de tensão dos seguintes equipamentos:

- **Lâmpada de Descarga de Alta Intensidade**

Esta lâmpada é considerada como um dos equipamentos mais sensíveis a baixas tensões. Esta irá apagar para tensões na faixa de 85% a 90% da nominal por curtos períodos de tempo, tal como 1 ciclo, e irá levar vários minutos para religar.

- **CLP's**

CLP's que podem ser usados para controlar dispositivos tais como acionadores CC e CA podem ter sua operação comprometida para tensões da ordem de 80% a 85% da nominal.

- **Controladores de velocidade**

Estes dispositivos são projetados para operar continuamente com tensões na faixa de +10% a -15%. Fora desta faixa eles podem não ser capazes de manter a velocidade ou outros parâmetros que podem ser críticos para o processo.

- **Bobinas de contadores para acionamento de motores**

Os contadores se mostram sensíveis para patamares de tensão entre de 50% a 75%, com durações de 1 a 5 ciclos, ocorrendo desatracamento dos contatos.

c) **Estudos realizados pelo PQTN *Brief 39* [3]**

No trabalho desenvolvido por essa referência, CLP's foram submetidos a testes de tolerância para variações na tensão de suprimento, cujos resultados estão sintetizados nas curvas de desempenho ilustradas na figura 2.1.

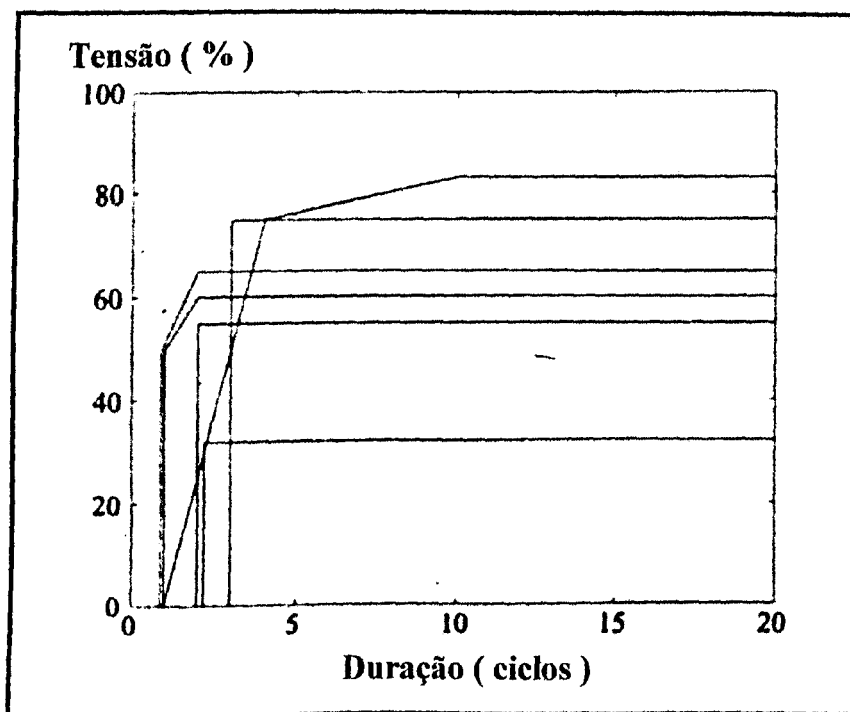


Figura 2.1 – Curvas de Sensibilidade Para CLP's – Referência [3]

A análise gráfica mostra claramente que alguns CLP's são extremamente sensíveis a afundamentos de tensão de curta duração e outros bastante robustos, sendo que cada equipamento analisado revelou suportabilidade distinta. Neste sentido, suas tolerâncias variaram entre 85% e 35% da tensão nominal.

d) Estudos realizados por Smith, Lamoree, Vinett, Duffy e Klein [4]

Este estudo se dedicou a investigar o desempenho de diversos tipos de controladores de processos ante a variações na tensão de suprimento dos mesmos. Os seus resultados estão reunidos na figura 2.2.

Os números indicados em cada curva referem-se aos seguintes dispositivos:

1. Controlador de processos bastante comum, usado para processos de aquecimento;

2. Controlador de processo com malha de controle;
3. Controlador lógico de processos;
4. Controlador lógico de processos, versão mais nova e mais avançada;
5. Relés usados por importantes equipamentos de potência;
6. Relés outros; mesmo fabricante do 5;
7. Relés usados em conjunto com motores de potência.

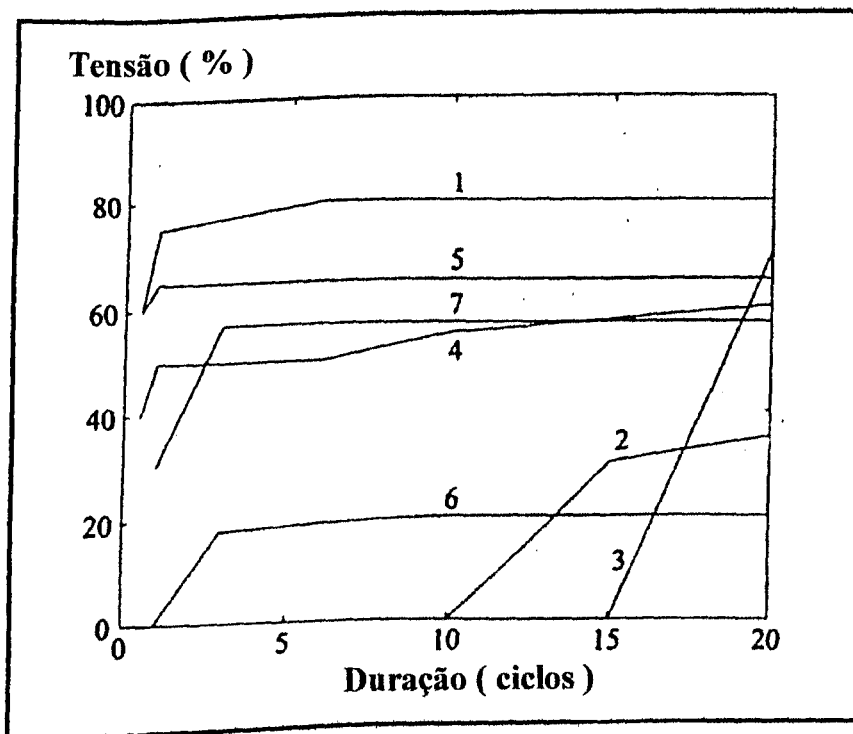


Figura 2.2 – Curvas de Sensibilidade Para Controladores de Processos – Referência [4]

Com base na figura 2.2, fica evidente que alguns controladores de processos são extremamente sensíveis a distúrbios na tensão de suprimento. Contudo, devido ao comportamento verificado para cada tipo de dispositivo analisado, é possível afirmar que o desempenho dos mesmos não pode ser generalizado, caracterizando ser possível fabricar equipamentos capazes de tolerar afundamentos de tensão de maior intensidade.

e) Estudos realizados pela *Computer and Business Eletronics Manufacturers Association* – CBEMA [5]

O conceito de curva de tolerância para sensibilidade de equipamentos eletrônicos foi introduzido em 1978 por Thomas Key. Quando estudou a confiabilidade do suprimento de energia elétrica para instalações militares, ele concluiu que afundamentos de tensão de curta duração poderiam prejudicar a operação normal dos grandes computadores destas instalações. Como resultado deste estudo foi criada a curva CBEMA, vários anos mais tarde, que fornece limites de tolerância para computadores no que tange a distúrbios de tensão no sistema elétrico, conforme ilustra a figura 2.3.

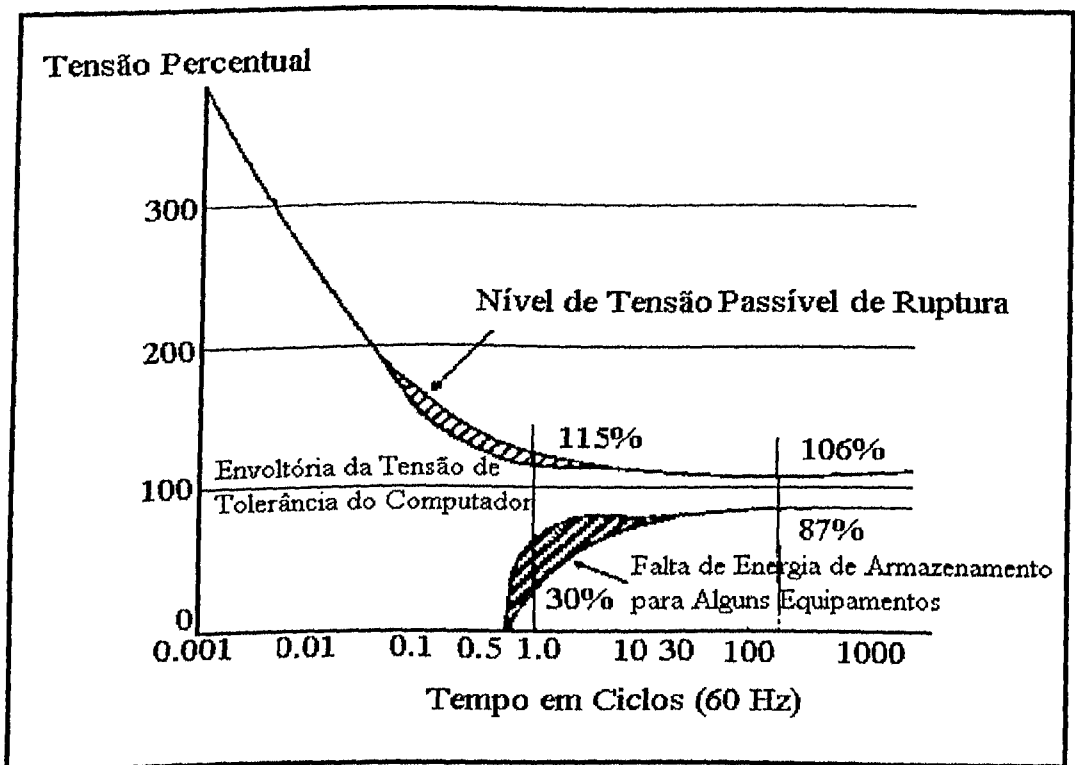


Figura 2.3 – Curva CBEMA

Na figura, a área relacionada a tensões abaixo do valor nominal (100%), representa os limites, dentro dos quais, um computador típico pode resistir a distúrbios sem apresentar mal funcionamento. Nota-se que a suportabilidade

de um computador é fortemente dependente do período de duração do distúrbio.

A figura 2.3 também fornece a tolerância de computadores para elevações de tensão de curta duração, onde se percebe que a suportabilidade não depende apenas da magnitude da sobretensão, mas ao mesmo tempo do seu período de duração.

Apesar da curva CBEMA ter sido originalmente proposta para caracterizar a sensibilidade de computadores, ela tem sido também utilizada para outros equipamentos eletro-eletrônicos [15].

f) Estudos feitos pelo ITIC (*Information Technology Industry Council*) [6]

A curva CBEMA foi revisada e modificada para caracterizar melhor a sensibilidade de computadores e demais equipamentos eletrônicos, surgindo, então a curva ITIC (*Information Technology Industry Council*), mostrada na figura 2.4.

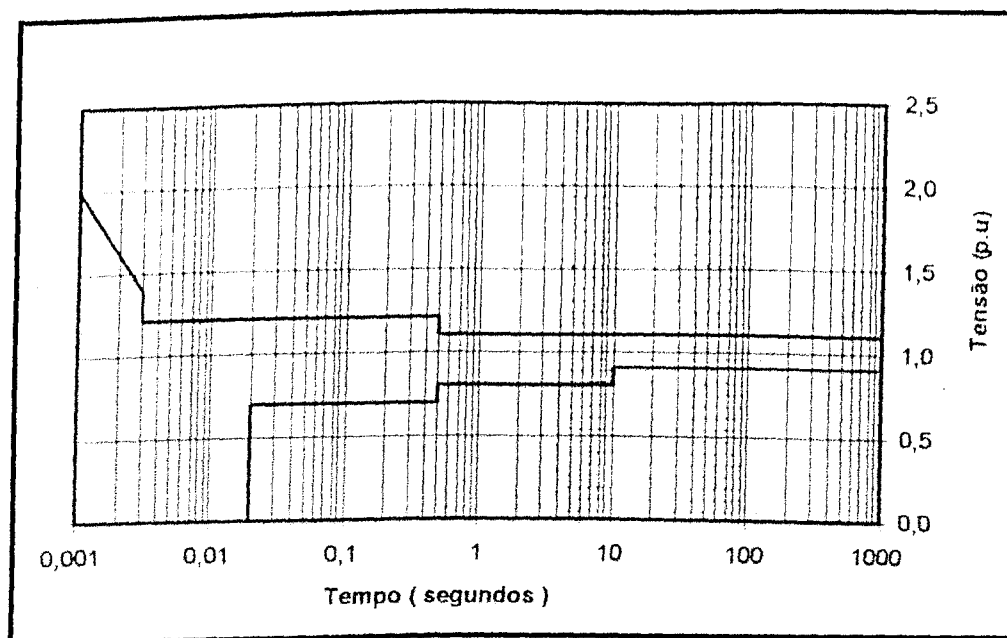


Figura 2.4 – Curva ITIC

Esta curva fornece tolerâncias um pouco mais rígidas a afundamentos de tensão que a curva CBEMA, uma vez que monitoramentos da qualidade da energia tem mostrado que a maioria das ocorrências de afundamentos de tensão está abaixo da tolerância verificada na curva CBEMA [16].

g) Estudos feitos por uma concessionária de energia [1]

Uma empresa concessionária realizou testes de sensibilidade em diversos equipamentos, e as conclusões foram que elevações de tensão de curta duração de 20%, com duração de até 120 ciclos não foram suficientes para a causa de má operação ou danificação de cargas tipicamente sensíveis. No entanto, analisando a figura 2.4, verifica-se que a tolerância de equipamentos eletrônicos para elevações de tensão situa-se em torno de 20%, por um período de apenas 30 ciclos, o que evidencia uma inconsistência de resultados. Todavia, os testes realizados não foram de forma repetitiva, com vistas a provocar um efeito cumulativo sobre o equipamento, o que torna difícil uma análise geral dos efeitos nesta condição operacional.

h) Outros estudos feitos pelo *Electric Power Research Institute* – EPRI [7]

A figura 2.5 mostra as curvas de tolerância obtidas de um estudo feito nos Estados Unidos, onde computadores foram submetidos a vários testes de sensibilidade para afundamentos de tensão de curta duração e interrupções. Para cada computador, as tolerâncias para zero de tensão e subtensões foram determinadas.

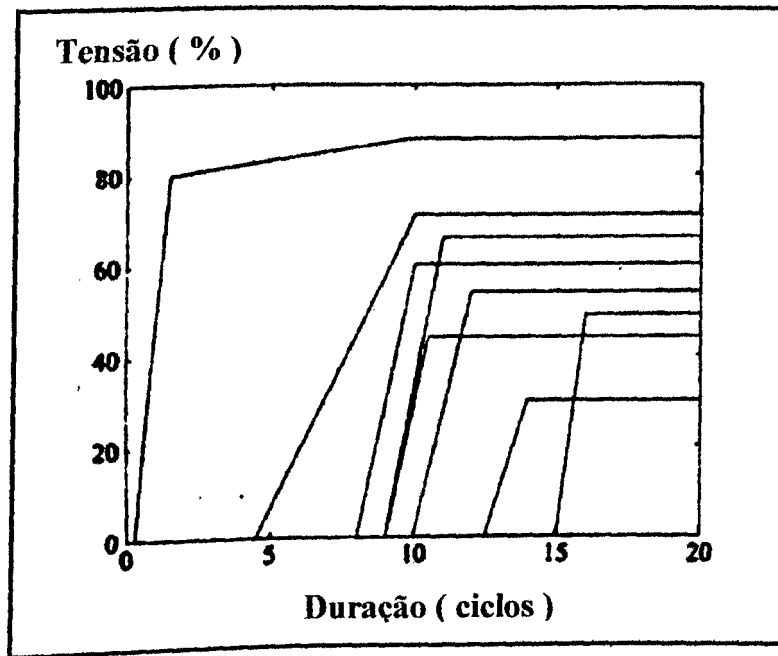


Figura 2.5 – Curvas de Tolerância de Tensão para Computadores Pessoais – Estudo do EPRI

Através da figura pode ser verificada uma grande faixa de tolerância de tensão para diferentes computadores, sendo que o mais sensível teve seu funcionamento prejudicado a partir de aproximadamente 20% de afundamento de tensão, e interrupção por um período inferior a 1 ciclo. Em se tratando de interrupção no fornecimento de energia, o computador menos sensível conseguiu suportar até 15 ciclos com zero de tensão. No tocante a afundamentos de tensão, um dos computadores tolerou um afundamento de aproximadamente 70%.

i) Estudos realizados por Sekine, Yamamoto, Mori, Saito e Kurokawa [8]

As curvas de tolerância de diversos computadores submetidos à variações de tensão, mostradas na figura 2.6, tem o mesmo formato e escala das curvas desenvolvidas através do estudo Americano e mostradas na figura 2.5.

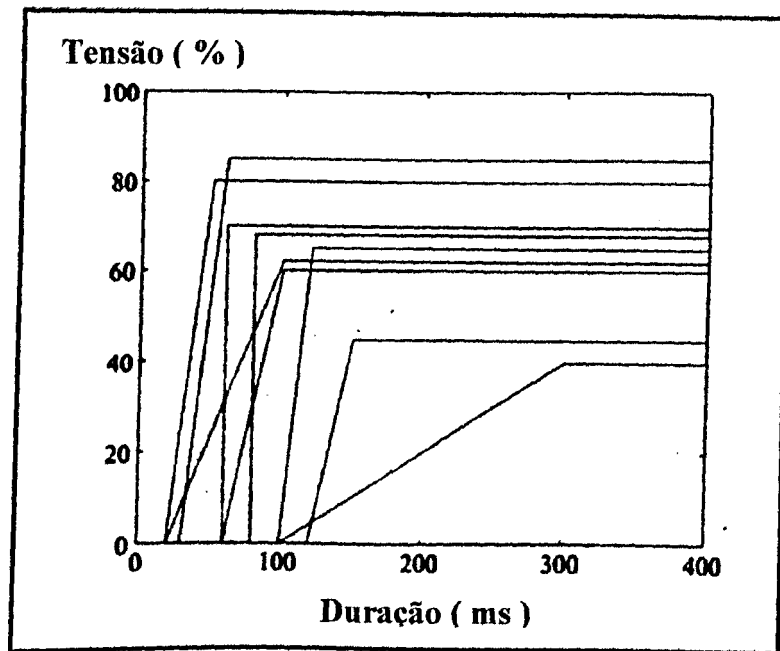


Figura 2.6 – Curvas de Tolerância de Tensão para Computadores Pessoais – Referência [8]

Comparando-se estas curvas com aquelas da referência [7], verifica-se que alguns computadores deste estudo se mostraram mais sensíveis a interrupções do que os computadores do estudo do EPRI, uma vez que a maioria dos computadores testados, suportaram menos de 6 ciclos com zero de tensão. Em se tratando de afundamentos de tensão de curta duração, as tolerâncias destes também se mostraram distintas.

j) Estudos feitos por Anderson and Bowes [9]

Nesta pesquisa, os autores submeteram videocassetes, fornos microondas e relógios digitais a afundamentos e elevações de tensão de curta duração, interrupções e sobretensões transitórias.

As sobretensões transitórias impostas nesses estudos atingiram amplitudes de pico de 1000 V. O tempo de subida das formas de onda de tensão aplicadas foi na faixa de 0,005 a 1,2 μ s com durações entre 1 e 300 μ s. Neste

particular, foi concluído que os distúrbios aplicados não tiveram qualquer influência sobre os equipamentos testados.

Nos testes realizados com elevações de tensão de curta duração, os equipamentos foram submetidos a sobretensões de 1,12 pu a 1,22 pu, com tempos de duração que variaram de 0,5 a 1000 ciclos. Mais uma vez, nenhum dos equipamentos testados teve seu funcionamento prejudicado.

Para os testes relacionados com afundamentos de tensão de curta duração, foram impostas subtensões com intensidades que variaram do valor nominal até que o equipamento sob testes apresentasse algum tipo de mal funcionamento, cujos tempos de duração foram de 0,5 a 1000 ciclos.

Em outra avaliação experimental, os equipamentos foram submetidos a interrupções no fornecimento de energia elétrica, sendo que estas perduraram até o desligamento dos equipamentos.

Destes dois últimos estudos mencionados, foi elaborada a curva mostrada na figura 2.7, que retrata a suportabilidade dos eletrodomésticos investigados.

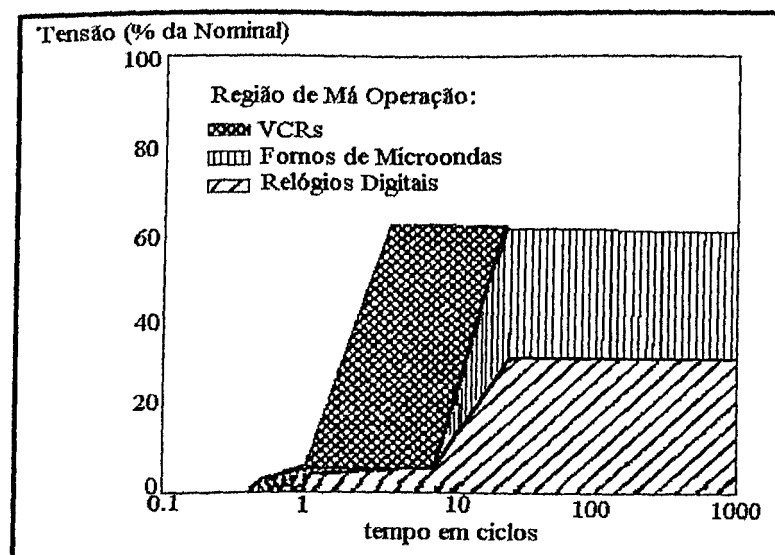


Figura 2.7 - Limiares de Tensão para Operação Segura de Vídeos, Microondas e Relógios Digitais.

A interpretação da figura permite constatar que as cargas estudadas mostraram-se, de certa forma, serem pouco sensíveis às variações de tensão. Dos equipamentos analisados, os relógios digitais foram os menos afetados por afundamentos de tensão e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

k) Estudos feitos por Smith e Standler [10]

Este estudo apresenta uma verificação da suportabilidade de relógios digitais, aparelhos de TV, fornos microondas, fontes lineares e fontes chaveadas diante de transitórios de 0,5 a 6 kV. Essa investigação foi realizada sob solicitação de uma companhia de fornecimento de energia elétrica dos Estados Unidos, que durante o ano de 1988, recebeu inúmeras reclamações de danos em eletrodomésticos, os quais foram associados a problemas oriundos da rede de suprimento. Como resultado dos estudos constatou-se que:

- As fontes chaveadas e os aparelhos de TV foram danificados quando submetidos a sobretensões transitórias entre 4 e 6 kV;
 - Nenhuma das fontes lineares submetidas as sobretensões transitórias foi danificada;
 - Os fornos microondas testados não sofreram qualquer tipo de dano;
 - Três dos cinco modelos de relógios digitais testados tiveram seu funcionamento prejudicado por algum tempo com sobretensões entre 1,5 e 6 kV.
-

l) Estudos realizados por Arseneau e Ouellette [11]

Este trabalho descreve o desempenho de 10 lâmpadas fluorescentes compactas operando com formas de onda senoidais e distorcidas. As lâmpadas estudadas possuíam, respectivamente, reator eletrônico, magnético ou ainda magnético com correção do fator de potência. Os resultados obtidos com os testes indicaram que o desempenho das lâmpadas para ambas as situações, tensão senoidal e distorcida, está relacionado com o tipo de reator utilizado (magnético ou eletrônico), e ainda se o reator possui ou não circuito para correção do fator de potência.

As lâmpadas com reator magnético sem circuito para correção do fator de potência produziram menos corrente harmônica e foram menos afetadas pelas distorções harmônicas. Uma das lâmpadas com reator magnético com circuito para correção do fator de potência teve seu funcionamento prejudicado na presença de harmônicos.

m) Estudos feitos por Fuchs, Roesler e Kovacs [12]

A sensibilidade de aparelhos de televisão para harmônicos e harmônicos fracionais foi verificada em [12]. Foram submetidos aos testes aparelhos de TV branco e preto e também coloridos, cujos resultados são:

- Aparelhos de televisão são muito sensíveis na presença de harmônicos fracionais, e até 0,5% de distorção de tensão pode produzir um periódico alargamento e redução na imagem destes;
 - Os componentes (transformadores, indutores, capacitores, etc.) da fonte chaveada do aparelho de TV podem se tornar sobreaquecidos se a
-

amplitude dos harmônicos ou harmônicos fracionais estiverem acima de certo nível.

2.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES BRASILEIRAS SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

De um modo geral, as grandezas básicas que definem a qualidade da energia elétrica são a tensão e a frequência. As normas e recomendações, geralmente, destinam-se ao controle destas duas grandezas, mantendo os níveis dentro de limites aceitáveis por consumidores e concessionárias.

Os padrões de desempenho definidos nesta seção resultam da compilação da experiência de planejamento e operação do sistema elétrico brasileiro, consolidada no âmbito do GCPS, do GCOI e do CCON, bem como dos resultados preliminares das discussões técnicas promovidas no âmbito do Grupo Trabalho Especial – Qualidade de Energia Elétrica, coordenado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) e constituído por representação dos diversos Agentes, Universidades, Consumidores, etc. [17].

É válido salientar que os padrões de desempenho estabelecidos aplicam-se a todas as novas instalações da Rede Básica e os requisitos mínimos não se aplicam diretamente às instalações preexistentes.

2.4.1. INTERRUPÇÕES SUSTENTADAS

A continuidade do serviço da Rede Básica é representada por indicadores monitorados em pontos de controle, caracterizados pelas instalações da Rede

Básica que fazem fronteira com os ativos de conexão dos Agentes de Geração, de Distribuição, Consumidores Livres e demais instalações de transmissão.

Para a avaliação da continuidade do serviço são utilizados os seguintes indicadores globais:

- **DIPC** - Duração da Interrupção do Fornecimento de Energia no Ponto de Controle;
- **FIPC** – Frequência da Interrupção do Fornecimento de Energia no Ponto de Controle;
- **DMIPC** – Duração Máxima da Interrupção do Fornecimento de Energia no Ponto de Controle.

O indicador DIPC é definido como o somatório das durações das interrupções no ponto de controle com duração maior ou igual a 1 minuto, e é dado em minutos por período de apuração.

O indicador FIPC é definido como o número de vezes em que ocorreu interrupção no ponto de controle com duração maior ou igual a 1 minuto, e é dado em ocorrências por período de apuração.

O indicador DMIPC é definido como a maior duração de interrupção dentre aquelas utilizadas no cálculo do indicador DIPC e é dado em minutos por período de apuração.

Entende-se como interrupção de serviço no Ponto de Controle a condição em que o mesmo permanece fora de serviço por um período maior ou igual a 1 minuto, devido a problemas internos ou externos à Rede Básica, considerando

quaisquer eventos, locais ou remotos, inclusive os programados, podendo caracterizar-se por:

- Ausência de tensão;
- Perda total de continuidade da Rede Básica com o Ponto de Controle, local ou remotamente, mesmo que este permaneça com tensão e não haja desligamento de ativos de conexão (pode haver alimentação por Agente de Geração, pela rede de distribuição ou por outras fontes).

A interrupção do serviço da Rede Básica em um Ponto de Controle não implica necessariamente em interrupção de fornecimento a consumidores e os indicadores serão apurados por causa e origem devendo ser coletadas, em cada ponto de controle, as seguintes informações:

- Dia do desligamento;
 - Hora do início do desligamento;
 - Hora do fim do desligamento;
 - Origem do desligamento (interna ou externa à Rede Básica);
 - Identificação do equipamento da Rede Básica associado à origem do evento;
 - Tipo do evento (segundo a tabela 2.2).
-

Tabela 2.2 - Tipo do Evento

Tipo	Descrição
Desligamentos Programados	
P1	Manutenção
P2	Novas conexões, modificações e melhorias
Outras Interrupções	
01	Emergências
02	Urgências
03	Fenômenos naturais e ambientais
04	Acidentais
05	Equipamentos de potência
06	Equipamentos de proteção e controle
07	Outros

Todos os indicadores terão apuração mensal, trimestral e anual com base no histórico de operação. Para cálculo dos indicadores serão consideradas apenas as interrupções com origem interna à Rede Básica.

2.4.2. TENSÕES EM REGIME PERMANENTE

Em condições de operação em regime permanente, as tensões nos barramentos da Rede Básica deverão situar-se dentro dos limites apresentados na tabela 2.3.

Em qualquer condição de carga, os níveis de tensão nos barramentos que não atendam diretamente a consumidores, e que não sejam pontos de interligação, não poderão ser inferiores ou superiores aos valores da tabela, respeitadas as limitações dos equipamentos.

Tabela 2.3 – Níveis de Tensão (Fase-Fase) em Corrente Alternada

TENSÃO NOMINAL		TENSÃO MÍNIMA		TENSÃO MÁXIMA	
kV	p.u.	kV	p.u.	kV	p.u.
13,8	1,0	13,1	0,95	14,5	1,05
23,0	1,0	21,9	0,95	24,2	1,05
34,5	1,0	32,8	0,95	36,2	1,05
69,0	1,0	65,6	0,95	72,5	1,05
88,0	1,0	83,6	0,95	92,4	1,05
138,0	1,0	131,0	0,95	145,0	1,05
230,0	1,0	218,0	0,95	242,0	1,05
345,0	1,0	328,0	0,95	362,0	1,05
440,0	1,0	418,0	0,95	460,0	1,05
500,0	1,0	475,0	0,95	550,0	1,10
750,0	1,0	720,0	0,95	800,0	1,07

As variações de tensão provocadas por chaveamentos de reatores ou capacitores não deverão exceder, em regime permanente, a 5% do valor de operação antes do chaveamento dos elementos ora mencionados, nos pontos de conexão à Rede Básica que atendam diretamente a consumidores, obedecidos os níveis estabelecidos na tabela 2.3.

2.4.3. DESBALANÇOS OU DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

A intensidade do desequilíbrio de tensão, dada em termos do fator de desequilíbrio (K), pode ser definida como sendo a relação entre a componente de seqüência negativa (V_2) pela componente de seqüência positiva (V_1) da tensão, expresso em percentuais da componente de seqüência positiva. A equação 2.1 mostra esta relação.

$$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Para tentar minimizar os problemas causados pelos desequilíbrios de tensão, concessionárias e grupos de estudos estabeleceram o limite global para o fator de desequilíbrio para $K \leq 2\%$.

Caso as tensões de seqüência negativa variem de forma intermitente e repetitiva, será permitido que os limites especificados sejam ultrapassados em até o dobro, desde que a duração cumulativa das tensões de seqüência negativa, acima dos limites contínuos estabelecidos, não ultrapasse 5% do período de monitoração.

Os Agentes Distribuidores e os Consumidores Livres devem manter as cargas balanceadas de forma que o desequilíbrio individual da tensão, nos pontos de conexão, não exceda o limite de $K \leq 1,5\%$ [23].

2.4.4. DISTORÇÕES HARMÔNICAS

O indicador para avaliar o desempenho global quanto a harmônicos nos barramentos da Rede Básica corresponde à distorção de tensão harmônica.

Entende-se por Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT) a raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. Esse conceito procura quantificar o conteúdo harmônico total existente em um determinado barramento da Rede Básica:

$$DTHT = \sqrt{\sum V_h^2} \text{ (em \%)} \quad (2.2)$$

onde:

$V_h = 100 \frac{V_h}{V_1}$ é a tensão harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental;

V_h é a tensão harmônica de ordem h em volts;

V_1 é a tensão fundamental nominal em volts.

Os padrões globais de tensões harmônicas de ordens 2 a 50 são apresentados na tabela 2.4, bem como o padrão para a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT). Entende-se por limites globais os máximos valores que podem ser atingidos no sistema com todas as fontes de perturbações em operação, segundo um critério de apuração.

Tabela 2.4 - Limites Globais de Tensão Expressos em Porcentagem da Tensão Fundamental.

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2	3, 5, 7	2	2, 4, 6	1
9, 11, 13	3	≥ 8	1	9, 11, 13	1,5	≥ 8	0,5
15 a 25	2	-	-	15 a 25	1	-	-
≥ 27	1	-	-	≥ 27	0,5	-	-
DTHT = 6 %				DTHT = 3%			

Os padrões individuais de tensões harmônicas são apresentados na tabela 2.5, bem como o padrão para a Distorção de Tensão Harmônica Total (DTHT). Entende-se por limites individuais os máximos valores que podem ser atingidos

no ponto de conexão em virtude da contribuição de um acessante, segundo um critério de apuração [23].

Tabela 2.5 – Limites individuais expressos em porcentagem da tensão fundamental

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5	Todas	0,6	3 a 25	0,6	todas	0,3
≥ 27	0,7	-	-	≥ 27	0,4	-	-
DTHT = 3 %				DTHT = 1,5%			

No caso em que determinadas ordens de tensão harmônica e/ou a distorção harmônica total variem de forma intermitente e repetitiva, os limites especificados poderão ser ultrapassados momentaneamente, sendo permitido atingir até o dobro, desde que a duração cumulativa acima dos limites contínuos estabelecidos não ultrapasse 5% do período de monitoração.

2.4.5. OSCILAÇÕES OU FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

As flutuações de tensão nos barramentos da Rede Básica, provocadas pela operação das cargas não lineares instaladas nos Consumidores Livres ou alimentadas pelos Agentes de Distribuição, podem provocar uma série de distúrbios ao se propagarem através da rede.

Entretanto, sem prejuízo de futuras considerações dos demais efeitos associados a estas flutuações, este item tratará exclusivamente daqueles relacionados à cintilação luminosa (“flicker”).

A Severidade de Cintilação é uma representação quantitativa do incômodo visual percebido pelas pessoas expostas ao fenômeno de cintilação. Os níveis de severidade de cintilação, associados à flutuação de tensão, são quantificados pelos indicadores Pst e Plt, conforme descrição e recomendação da Comissão Internacional de Eletrotécnica na Publicação IEC 61000-4-15 “*Flickermeter – Functional and design specifications*” [22].

O indicador Pst, “*Probability short term*”, representa a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 minutos e é calculado a partir dos níveis instantâneos de sensação de cintilação, medidos conforme a expressão 2.3:

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (2.3)$$

onde:

P_i - corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante i % do tempo de observação, resultante do histograma de classificação por níveis, calculado conforme estabelecido na publicação IEC-61000-4-15.

O indicador Plt, “*Probability long term*”, representa a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 horas e é calculado a partir dos registros de Pst conforme a expressão 2.4:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{sti})^3} \quad (2.4)$$

Os indicadores de severidade de cintilação, aqui adotados como representativos da flutuação de tensão num dado barramento da Rede Básica, são:

- PstD95%: valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas);
- PltS95%: valor do indicador Plt que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de uma semana, 7 dias completos e consecutivos.

A determinação da qualidade da tensão de um barramento da Rede Básica quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação no consumidor final que tenha seus pontos de iluminação alimentados pela tensão secundária de distribuição.

Devido ao caráter subjetivo de tal incômodo, adotou-se dois limites para cada indicador de severidade de cintilação: Limite Global Inferior e Limite Global Superior. Caso a tensão secundária de distribuição de 127 V seja preponderante dentre os Agentes conectados ao barramento da Rede Básica, o processo de medição deverá ser realizado com o medidor ajustado para este nível de tensão. Caso a tensão secundária de distribuição de 220 V seja preponderante dentre os Agentes conectados a tal barramento da Rede Básica o processo de medição deverá ser realizado com o medidor ajustado para este nível de tensão. Quando não for possível caracterizar a preponderância de uma destas tensões o processo de medição deverá ser realizado com o medidor ajustado para a tensão de 220 V por corresponder a resultados conservativos.

Quando os valores de PstD95% e PltS95% forem menores ou iguais aos respectivos Limites Globais Inferiores a qualidade da tensão da Rede Básica

quanto à flutuação de tensão será considerada adequada, não havendo necessidade de adoção de medidas corretivas ou mitigadoras.

Quando ao menos um dos valores de PstD95% e PltS95% for maior que os respectivos Limites Globais Inferiores e menor ou igual aos Limites Globais Superiores, a qualidade da tensão da Rede Básica quanto à flutuação de tensão será considerada em estado de observação.

Quando os valores de PstD95% e PltS95% forem maiores que os respectivos Limites Globais Superiores, a qualidade da tensão da Rede Básica quanto à flutuação de tensão será considerada, em princípio, inadequada e as ações corretivas ou mitigadoras deverão ser definidas após a realização de investigações para identificação das causas e responsabilidades.

Os valores dos Limites Globais Inferiores e Superiores, que serão considerados para controlar a qualidade da tensão na Rede Básica quanto a flutuação de tensão, são apresentados na tabela 2.6 onde são expressos em função dos Limites Globais considerados para tensão secundária de distribuição 220 V e considerando a atenuação esperada quando a flutuação de tensão se propaga dos barramentos da Rede Básica para os barramentos da rede secundária de distribuição:

Tabela 2.6 – Limites Globais

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	$\frac{1pu}{FT}$	$\frac{0,8pu}{FT}$
Limite Global Superior	$\frac{2pu}{FT}$	$\frac{1,6pu}{FT}$

FT - é o Fator de Transferência aplicável entre o barramento da Rede Básica sob avaliação e o barramento da tensão secundária de distribuição eletricamente mais próximo, sendo calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento da Rede Básica sob avaliação e valor do PltS95% do barramento da rede de distribuição. No caso dos FT entre os barramentos envolvidos não serem ainda conhecidos através de medição, em princípio os seguintes valores poderão ser aplicados para a avaliação da Flutuação de Tensão nos barramentos da Rede Básica (tabela 2.7):

Tabela 2.7 – Fatores de Transferencia

Barramento de Tensão Nominal ≥ 230 kV	FT = 0,65
69 kV \leq Barramento de Tensão Nominal < 230 kV	FT = 0,8
Barramento de Tensão Nominal < 69 kV	FT = 1,0

Nos barramentos da Rede Básica onde exista somente um Agente conectado, serão permitidos níveis de PstD95% e PltS95% superiores aos valores dos Limites Globais Superiores, desde que este Agente seja o único responsável pela perturbação e que o seu efeito sobre os outros barramentos da Rede Básica não ultrapasse os Limites Globais Superiores ou cause reclamações de Usuários ou outros Agentes.

Os Limites Globais apresentados na tabela 2.6 foram estabelecidos tendo como premissa que o Limite Global Inferior para as tensões secundárias nos sistemas de distribuição (220 V) é 1 pu. Caso este limite seja alterado, por determinação do Agente Regulador, os valores estabelecidos para a Rede Básica deverão ser revisados.

Os valores dos Fatores de Transferência de Cintilação (FT) apresentados na tabela 2.7 estão sujeitos a revisões futuras em função de pesquisas, investigações e medições de campo em andamento no Sistema Elétrico Brasileiro.

Adicionalmente, estão sendo estudadas formas de diferenciar a avaliação dos impactos nos níveis globais de Pst e Plt provocados por condições já existentes daqueles provocados por novas cargas. Assim sendo, para o caso de violações dos padrões de desempenho em instalações da Rede Básica relacionadas com situações pré-existentes, tanto do ponto de vista das características da carga como do sistema elétrico que a alimenta, deverão ser avaliadas pelo ONS, em conjunto com os Agentes envolvidos e submetidas à ANEEL, as alternativas de mitigação dos efeitos provocados pela perturbação, considerando os seguintes aspectos:

- Viabilidade técnico-econômica;
- Gradualidade na implantação da solução ao longo do tempo.

2.4.6. ESTABILIDADE ELETROMECHANICA

A operação confiável de um sistema elétrico de potência no que tange à estabilidade eletromecânica implica na manutenção de condições operativas estáveis tanto em regime permanente quanto em resposta a impactos de médio porte em qualquer ponto do sistema.

Entende-se por desempenho em regime permanente a resposta do sistema a pequenos distúrbios derivados da variação do carregamento do sistema e de chaveamentos de elementos de compensação reativa (bancos de

capacitores/reactores). Entende-se por impactos de médio porte aqueles causados por curto-circuito e desligamentos de linhas, geradores e blocos de carga.

O Coeficiente de Amortecimento das oscilações eletromecânicas é o indicador utilizado na avaliação da condição de estabilidade eletromecânica do sistema. O Coeficiente de Amortecimento reflete a taxa de decaimento entre um pico de oscilação e o pico imediatamente anterior.

O Coeficiente de Amortecimento dos diversos modos de oscilação do sistema pode ser calculado através de simulações e também pode ser obtido a partir dos registros das oscilações de potência verificadas no sistema real.

Para efeito de cálculo através de simulações no domínio da frequência, o Coeficiente de Amortecimento, denotado por ξ , é definido por:

$$\xi = \frac{R}{M} \quad (2.5)$$

onde:

R é a parte real do autovalor correspondente ao modo de oscilação e M é o seu módulo.

Uma forma mais prática de se medir e avaliar o amortecimento é através do SPR (*Successive Peak Ratio*), fator que traduz a relação entre um determinado pico de oscilação e o pico imediatamente anterior. O SPR é determinado a partir do coeficiente de amortecimento através da seguinte equação:

$$SPR = \frac{1}{e^{\xi \times 2\pi}} \quad (2.6)$$

Assim, para um fator de amortecimento de 10%, o SPR é igual a 0,533. O SPR pode ser calculado a partir de simulações de estabilidade transitória e dinâmica no domínio do tempo e pode também ser obtido diretamente de registros das oscilações de potência verificadas no sistema real.

O Coeficiente de Amortecimento é considerado adequado se, em qualquer condição de carga e geração, o mesmo for superior a:

- 5% para modos de oscilação inferiores a 0,4 Hz;
- 10% para modos de oscilação iguais ou superiores a 0,4 Hz.

2.4.7. VARIACÕES NA FREQUÊNCIA DO SISTEMA ELÉTRICO

No Brasil, as concessionárias de energia devem manter a frequência de operação dentro da faixa de 59,9 a 60,1 Hz.

Na ocorrência de distúrbios no sistema, havendo disponibilidade de geração para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, a frequência deverá retornar para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz dentro de 30 segundos após o instante em que a frequência sair desta faixa.

Na ocorrência de distúrbios no sistema, havendo necessidade de corte de geração ou corte de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração, a frequência:

- Não poderá exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
- Poderá permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;

- Poderá permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

2.4.8. VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Para estas variáveis não há definições prévias quanto aos níveis desejados. Porém já existem curvas de sensibilidade para equipamentos, as quais descrevem a sensibilidade destes considerando-se a magnitude e a duração do distúrbio na tensão, tais como a curva CBEMA (*Computer Business Equipment Manufacturers Association*) [5], e a ITIC (*Information Technology Industry Council*) [6], mostradas anteriormente nas figuras 2.3 e 2.4 respectivamente.

2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, inicialmente, dedicou-se a uma caracterização dos problemas de qualidade de energia elétrica, tendo-se apresentado um sumário dos principais itens de qualidade, suas causas e efeitos.

Na seqüência, foram realizadas discussões a cerca de trabalhos publicados, que expressam o estado da arte sobre a operação de diferentes dispositivos elétricos sob condições não ideais de alimentação. Neste particular, se faz importante destacar que a comparação entre as literaturas pesquisadas permite identificar uma série de divergências de resultados, a exemplo da sensibilidade de computadores e CLP's, o que motiva ainda mais esta dissertação de mestrado.

Finalmente, com vistas a oferecer diretrizes sobre os níveis de perda de qualidade considerados normais dentro do cenário brasileiro, foram apresentados os padrões de desempenho da Rede Básica definidos pelo

Operador Nacional do Sistema – ONS e que estão em vigor desde outubro de 2000.

CAPÍTULO III

DESEMPENHO DE FONTES LINEARES NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – UMA APLICAÇÃO TÍPICA: APARELHO DE SOM

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo tem por meta investigar o comportamento de uma das mais difundidas fontes de suprimento presente nos modernos dispositivos eletrônicos, qual seja, a “*Fonte Linear*”. O funcionamento de tal dispositivo, sob condições ideais de suprimento é classicamente conhecido e dispensa maiores comentários. Todavia, quando o mesmo encontra-se conectado em uma rede elétrica com problemas de qualidade, o seu desempenho pode variar desde uma total insensibilidade operacional até sua completa interrupção funcional.

Do exposto, segue que o enfoque desta unidade da dissertação está voltado para a obtenção de informações relativas à sensibilidade operacional de uma fonte linear no contexto da qualidade da energia elétrica. Para se atingir as metas almejadas, os trabalhos serão conduzidos dentro da seguinte estratégia:

- Obtenção do circuito elétrico equivalente representativo de uma fonte linear típica;
- Modelagem e implementação computacional;
- Validação experimental do modelo;

- Análise de desempenho da fonte linear sob condições de perda de qualidade do suprimento através de estudos experimentais e computacionais;
- Obtenção de curvas de sensibilidade.

Desta forma, espera-se atingir ao fim dos estudos, além de modelos computacionais que permitam a avaliação da interdependência entre o funcionamento de tais dispositivos e a qualidade da energia elétrica que os supre, também concluir sobre os graus de imunidade e sensibilidade dessas fontes quando da operação sob condições reais de suprimento.

3.2. CARACTERÍSTICAS E CIRCUITO EQUIVALENTE DO EQUIPAMENTO ANALISADO

O equipamento submetido às diversas condições de anormalidades de suprimento, experimental e simulado computacionalmente, consiste num aparelho de som modelo *E650*, da marca *Gradiente*, ilustrado na figura 3.1.



Figura 3.1 – Foto do Aparelho de Som Submetido aos Testes

O aparelho de som mostrado na figura possui as seguintes características básicas:

- Tensão de alimentação – 110/220 V
- Potência RMS – 100 W
- Potência PMPO – 1400 W

Este dispositivo constitui-se num exemplo clássico do uso das fontes lineares, sendo que a mesma está ilustrada na figura 3.2.

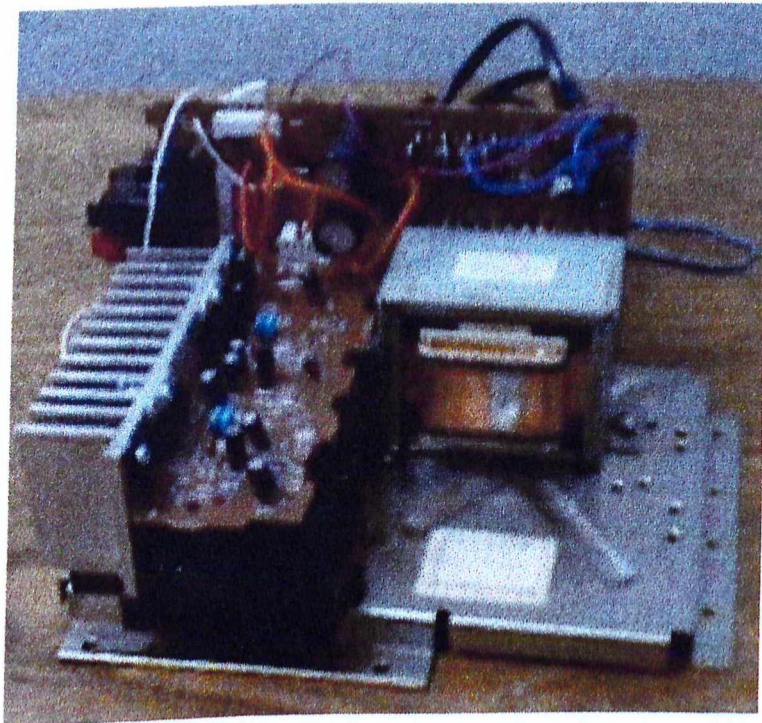


Figura 3.2 – Foto da Fonte Linear do Aparelho de Som Submetido aos Testes

Dentro dos propósitos traçados, inicialmente realizou-se o levantamento do circuito equivalente da fonte linear em questão. O diagrama ilustrado na figura 3.3 sintetiza o resultado final desta investigação.

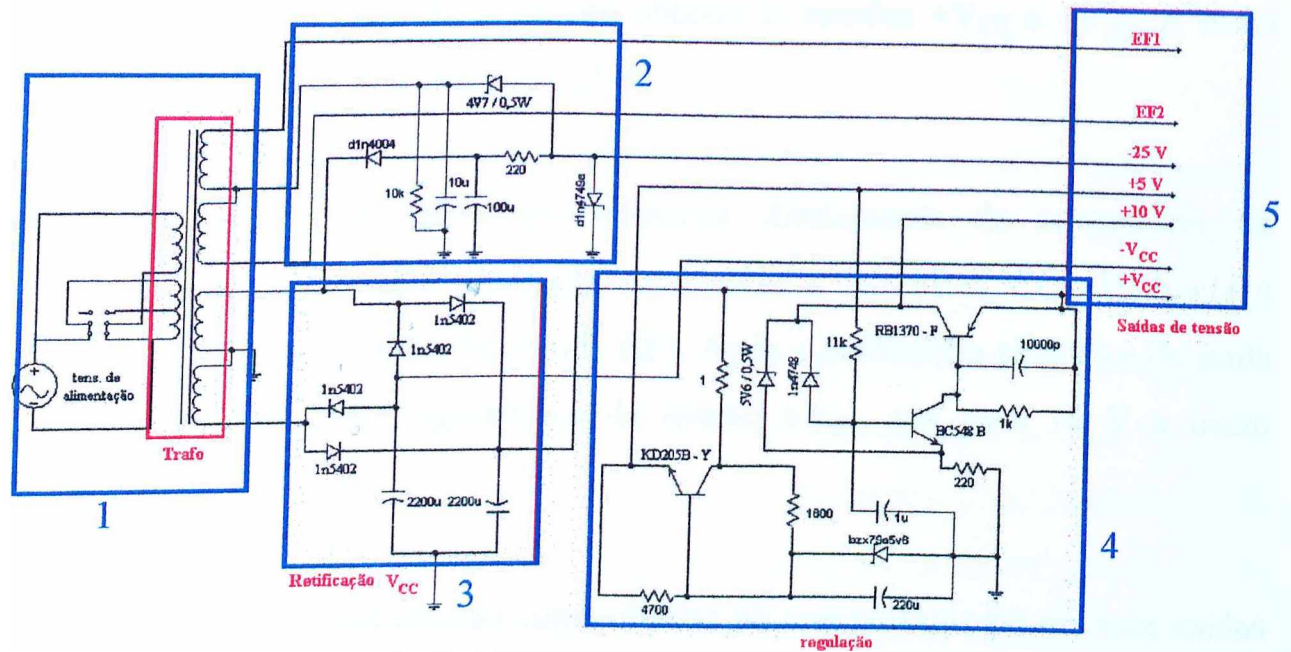


Figura 3.3 – Esquema Elétrico Simplificado da Fonte Linear

Na figura, o bloco 1 representa a rede de alimentação associada a um transformador de 60 Hz para adaptar a tensão da rede CA à fonte linear. Em 2 está destacado o circuito do controle de varredura do *display* do equipamento. O bloco 3 tem por incumbência realizar a retificação e filtragem da tensão de alimentação, com vistas a suprir o regulador de tensão contínua, que por sua vez, está ilustrado no bloco 4. No bloco 5, encontram-se as saídas de tensão da fonte linear.

É importante ressaltar que algumas simplificações foram utilizadas, a exemplo da omissão do circuito da saída de áudio e circuito de *mute* (responsável por inibir os auto falantes), uma vez que outras saídas de tensão se mostraram mais facilmente acessíveis, facilitando a coleta de dados.

O transformador do esquema elétrico da figura 3.3 possui dois enrolamentos secundários e, conseqüentemente, dois retificadores, sendo que um deles é

simétrico de onda completa, onde são obtidas as tensões $+V_{CC}$ e $-V_{CC}$. A outra retificação fornece uma tensão de -25 V.

Além das tensões mencionadas, obtém-se diretamente do secundário do transformador uma tensão alternada sobreposta a um nível CC, destinada a alimentar o *display* do aparelho (saída EF). Após a retificação simétrica de onda completa, existem dois reguladores da tensão $+V_{CC}$, um para 10 V e outro para 5 V [18].

As atenções dos estudos estarão concentradas no comportamento de duas saídas de tensão, uma regulada (saída de +10 V) e outra não regulada (saída EF). Além dessas tensões de saída serão também consideradas: a tensão/corrente CA de alimentação e a tensão no elo de corrente contínua ($+V_{CC}$).

3.3. ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

De uma maneira geral, os estudos conduzidos foram divididos em duas partes, sendo uma experimental e outra computacional. Tanto para a investigação laboratorial quanto para a análise de simulação computacional, a fonte linear foi submetida a diferentes distúrbios da qualidade da energia elétrica, obedecendo aos itens de definição mostrados no capítulo II.

Na seqüência são apresentados e discutidos alguns dos resultados obtidos, os quais representam uma síntese de um expressivo conjunto de investigações realizadas. Como se verá, a estrutura empregada consiste em ilustrar resultados simulados e de bancada, efetuando-se, na seqüência, uma análise comparativa entre os resultados.

3.3.1. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os testes foram conduzidos com o aparelho de som funcionando primeiramente como rádio e em seguida como reproduzidor de CDs, uma vez que o consumo de potência nestas duas situações sofre substanciais variações. Contudo, em alguns casos investigados, apenas o modo rádio foi contemplado. Além disso, optou-se por analisar o funcionamento do equipamento sob alimentação de 220 V, muito embora se reconheça que os estudos pudessem ser feitos com suprimento de tensão em 110 V. Outro detalhe interessante diz respeito ao nível do volume de som adotado, que foi mantido constante em um determinado valor, considerando que variações dos ajustes implicariam em mudanças na corrente absorvida.

Os itens de qualidade aos quais o dispositivo analisado foi submetido foram providos por uma fonte de alimentação especial, de fabricação HP, modelo HP6834A, trifásica, com potência de 4,5 kVA, que combina três instrumentos em uma única unidade, como mostra a figura 3.4 [19].

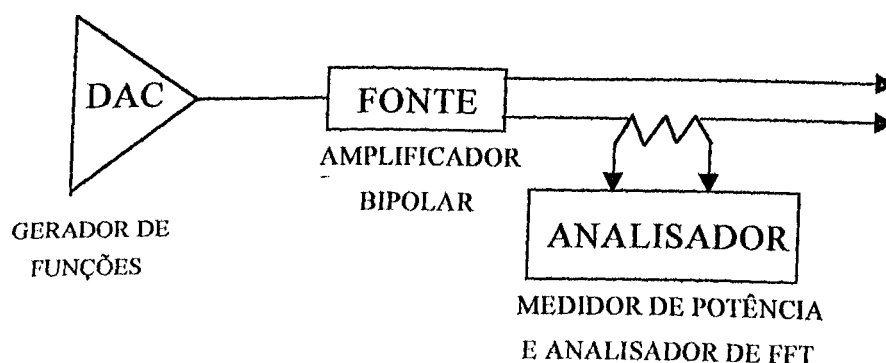


Figura 3.4 – Elementos da Fonte HP6834A

A programação dos eventos realizados pela fonte (variação de tensão e frequência) pode ser local ou remota, feita através de um PC via HP-IB e/ou via porta serial RS-232, sendo que a aplicação neste trabalho se deu no modo remoto, com a utilização de programas desenvolvidos na própria

UFU (Universidade Federal de Uberlândia), a exemplo dos softwares para a programação de harmônicos, flutuações de tensão, afundamentos e elevações de tensão;

Outro equipamento empregado foi um Osciloscópio/Multímetro Digital Portátil, da marca **TEKTRONIX**, modelo **THS720P**.

A figura 3.5 mostra, de forma esquemática, o arranjo experimental empregado, onde se constata os equipamentos utilizados e suas conexões ao dispositivo eletrônico utilizado para os estudos.

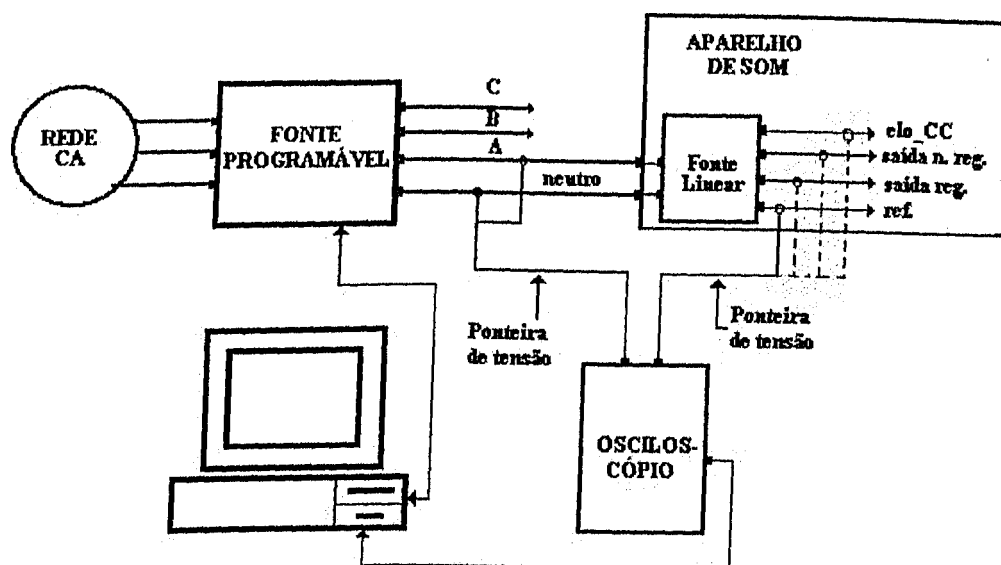


Figura 3.5 – Esquema de Conexão Para Realização dos Experimentos

As unidades que compõem a montagem experimental são:

- A fonte programável que alimenta o aparelho de som através de um sinal de tensão controlável;
- O osciloscópio para a aquisição dos dados. Através da porta RS-232 é possível o armazenamento dos mesmos no computador;

- O micro-computador para controle da fonte programável, além de armazenar e processar os sinais derivados do osciloscópio.

3.3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Como citado anteriormente, foram também realizadas simulações computacionais e seus resultados então empregados para uma análise comparativa com aqueles obtidos experimentalmente. É natural que este procedimento objetivo, principalmente, validar o modelo computacional implementado.

Para tanto, utilizou-se o simulador *SABER*, o qual, além de uma variada biblioteca, propicia, através de uma linguagem própria (*Mast*), a modelagem de qualquer componente eletro-eletrônico, mecânico, etc., no domínio do tempo. Outras propriedades, como: grande versatilidade gráfica, capacidade de interconexão com rotinas elaboradas em outras linguagens de programação (C e *Fortran*), manipulação dos resultados de saída, etc., oferecem ainda grandes atrativos para a escolha de tal ferramenta computacional.

O esquema do circuito da fonte linear montado para se proceder as simulações é mostrado na figura 3.6, sendo possível observar que a diferença deste para aquele mostrado na figura 3.3, está na adição de alguns resistores nas saídas da fonte, em substituição ao restante do circuito, ou seja, do aparelho de som propriamente dito. Os valores dos resistores foram calculados em função da corrente consumida pelo equipamento.

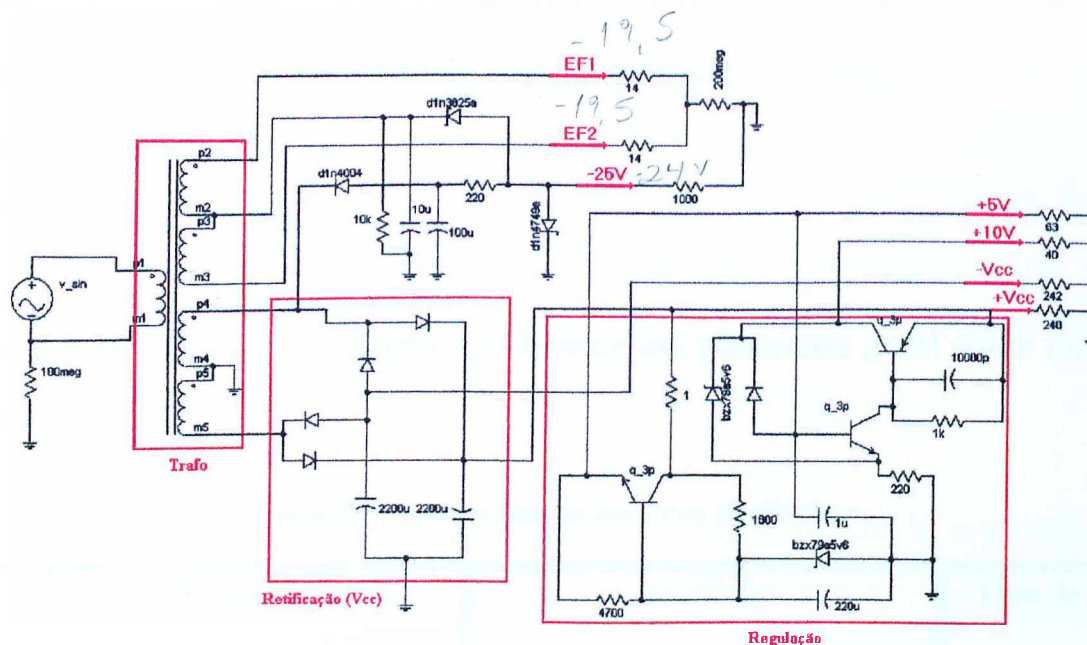


Figura 3.6 – Esquema Elétrico da Fonte Linear Utilizado nas Simulações Computacionais

Assim como para as verificações experimentais, os estudos computacionais enfocaram o comportamento das tensões medidas nas saídas da fonte linear, bem como das grandezas de entrada. Estas, como já caracterizado, são consideradas diante de problemas de qualidade simulados junto a rede de suprimento do equipamento.

Na seqüência são feitos os comentários gerais a respeito dos casos estudados e subseqüentemente expostos os resultados laboratoriais e computacionais obtidos.

3.4. CASOS ESTUDADOS

As análises experimentais e computacionais selecionadas consistiram em submeter o aparelho de som aos seguintes itens de perda de qualidade:

- Afundamentos de tensão de curta duração (*voltage sag*);
- Elevações de tensão de curta duração (*voltage swell*);

- Interrupções no fornecimento de energia elétrica;
- Harmônicos;
- Flutuações de tensão.

Considerando o exposto, a tabela 3.1 fornece um panorama geral sobre os casos estudados.

Tabela 3.1 – Quadro Resumo dos Casos Analisados

Identificação	Descrição	Tipo de estudo
Caso 1 – Condição ideal de suprimento	Operação no modo rádio	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 2 – Elevação de tensão de curta duração (<i>Voltage swell</i>)	Operação no modo rádio	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
	Operação no modo reprodutor de CDs	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 3 – Afundamento de tensão de curta duração (<i>Voltage sag</i>)	Operação no modo rádio	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
	Operação no modo reprodutor de CDs	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 4 – Interrupção do fornecimento de energia	Operação no modo rádio	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
	Operação no modo reprodutor de CDs	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 5 – Suprimento contendo distorção harmônica	Operação no modo rádio	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 6 – Flutuação de tensão	Operação no modo rádio	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional

Na seqüência, são apresentados os resultados obtidos e as análises sobre a interdependência entre o funcionamento do dispositivo testado e a qualidade do seu suprimento elétrico. Ainda, no anexo A estão contidas tabelas orientativas a respeito da disposição geral das formas de onda extraídas em cada caso investigado.

3.4.1. CASO 1 - CONDIÇÃO IDEAL DE SUPRIMENTO

Esta primeira condição de operação foi estudada com o propósito de fornecer dados a respeito do funcionamento normal do equipamento, os quais, posteriormente, servirão como referência para as discussões comparativas com os resultados oriundos de situações não ideais de operação.

O aparelho de som foi então submetido a uma tensão de 220 V senoidal e sem qualquer tipo de distúrbio. Nestas condições, foram individualmente monitoradas as grandezas já explicitadas. O esquema básico de conexão executado para as investigações está ilustrado na figura 3.5, sendo que para a medição da corrente consumida pelo equipamento, substituiu-se uma das ponteiros de tensão conectadas ao osciloscópio por uma de corrente, possibilitando assim a sua medição.

Com respeito às investigações computacionais, as mesmas condições de operação às quais o aparelho de som foi submetido experimentalmente foram reproduzidas digitalmente.

Os resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente são fornecidos na seqüência.

a) Tensão CA de alimentação

A figura 3.7 ilustra a forma de onda da tensão aplicada ao aparelho de som, cujo valor RMS medido foi de 219,0 V, ou seja, bem próximo de seu valor nominal, que é 220 V.

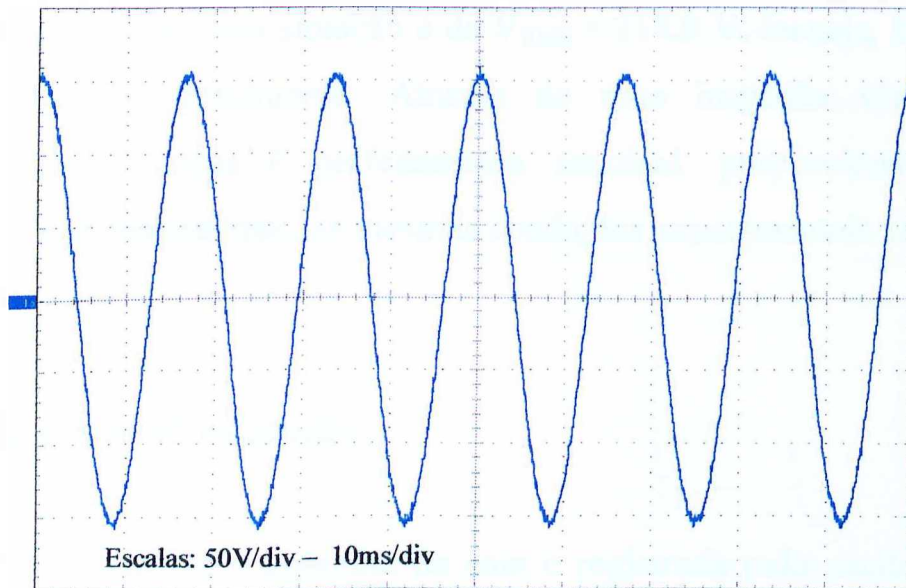


Figura 3.7 – Tensão de Alimentação – Experimental

Embora tenha sido programada na fonte de suprimento uma tensão perfeitamente senoidal, o espectro da forma de onda apresentou um DHT de 0,5%, que pode ser atribuído ao equipamento de medição e/ou a fonte de suprimento.

A forma de onda da tensão utilizada para a alimentação do aparelho de som para a simulação é mostrada na figura 3.8.

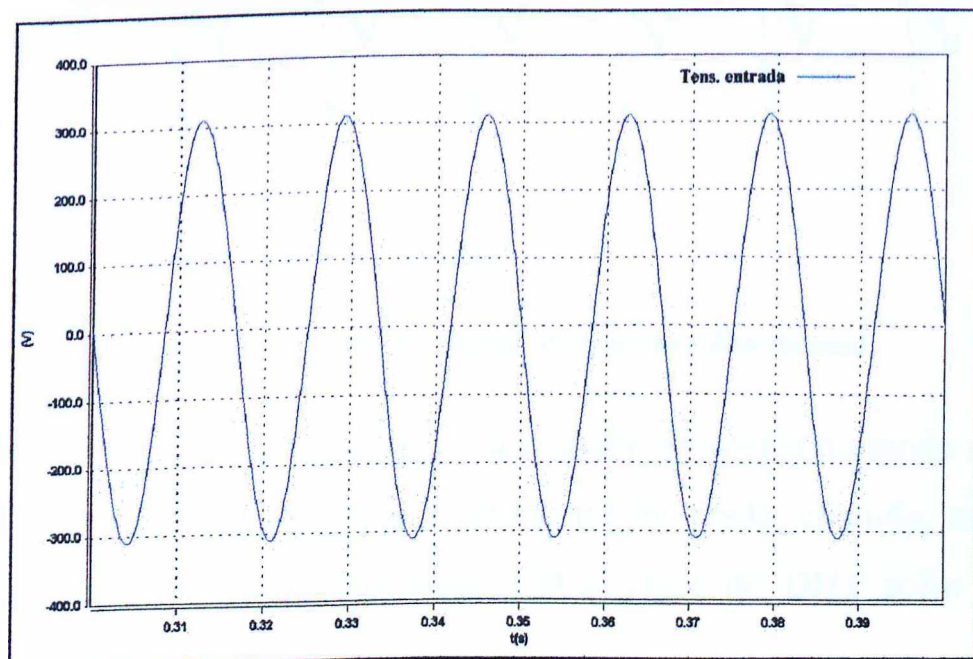


Figura 3.8 – Tensão de Alimentação – Computacional

O valor da tensão para esta situação é de $V_{RMS} = 219,9 \text{ V}$, ou seja, bem próximo do medido experimentalmente. Através de uma inspeção visual pode-se constatar que a mesma é perfeitamente senoidal, proporcionando, assim, reproduzir aproximadamente, as mesmas condições experimentais anteriormente utilizadas.

b) Corrente CA de alimentação

A corrente absorvida pelo aparelho de som e registrada pelo osciloscópio está apresentada na figura 3.9. Esta mostra um valor RMS da ordem de 152 mA, quando o equipamento está operando no modo rádio. Como pode ser observado, esta corrente apresenta-se fortemente distorcida, com sua composição harmônica contendo um DHT (Distorção Harmônica Total) da ordem de 72%.

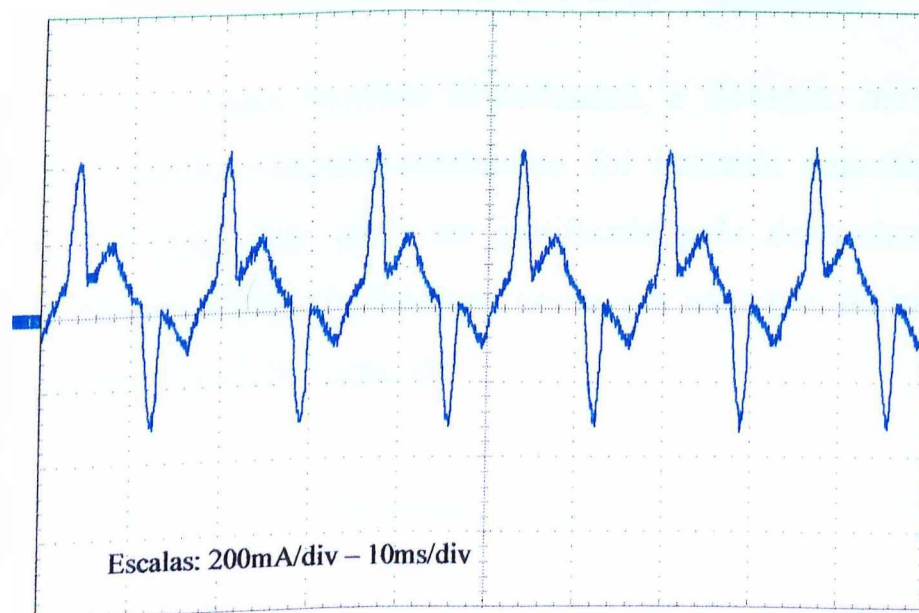


Figura 3.9 – Corrente na Entrada do Aparelho – Experimental

Embora não seja mostrada nesta seção, a corrente absorvida no modo reproduzidor de CDs é cerca de 27% maior que a anteriormente citada, contudo, mantendo o mesmo espectro harmônico. No modo CD o valor do DHT sofre alteração, passando de 72% para 76%.

O comportamento da corrente de entrada obtida digitalmente apresentou-se muito semelhante àquele encontrado na análise experimental, conforme pode ser visto na figura 3.10.

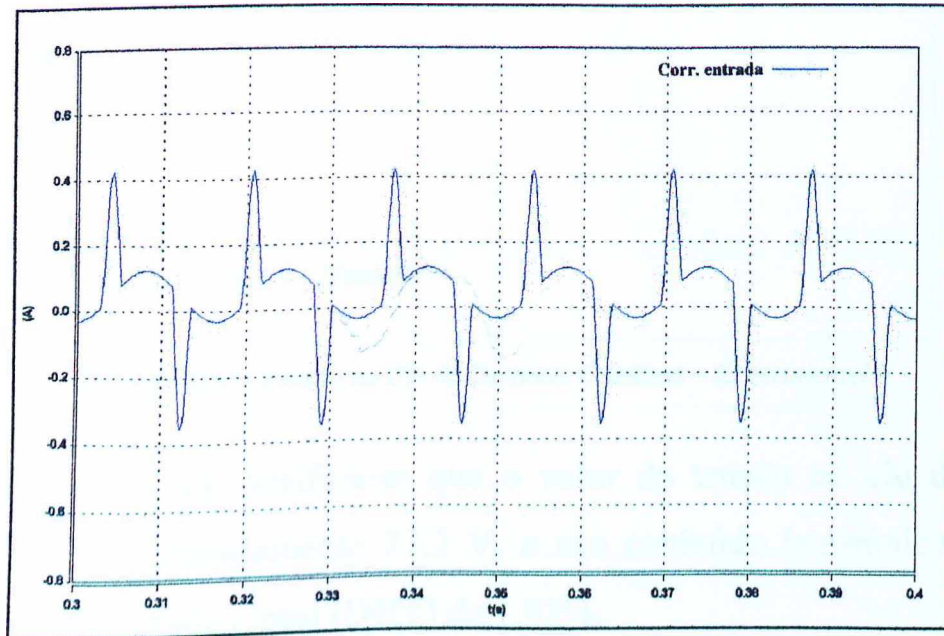


Figura 3.10 – Corrente na Entrada do Aparelho – Computacional

Embora os formatos sejam bastante semelhantes, a distorção harmônica total para a corrente obtida computacionalmente foi bastante superior, sendo da ordem de 99,69%. Este fato pode ser justificado pelo desconhecimento dos valores exatos de importantes parâmetros, como, por exemplo, do transformador de entrada da fonte linear, da carga, etc.

c) Tensão no elo de corrente contínua

Outra grandeza monitorada foi a tensão no elo de corrente contínua. Tal grandeza apresenta importância operacional para o dispositivo sob teste visto que, a partir desta é que inicia o processo da regulação para a tensão de 10 V. O seu comportamento, para o caso experimental, é ilustrado na figura 3.11.

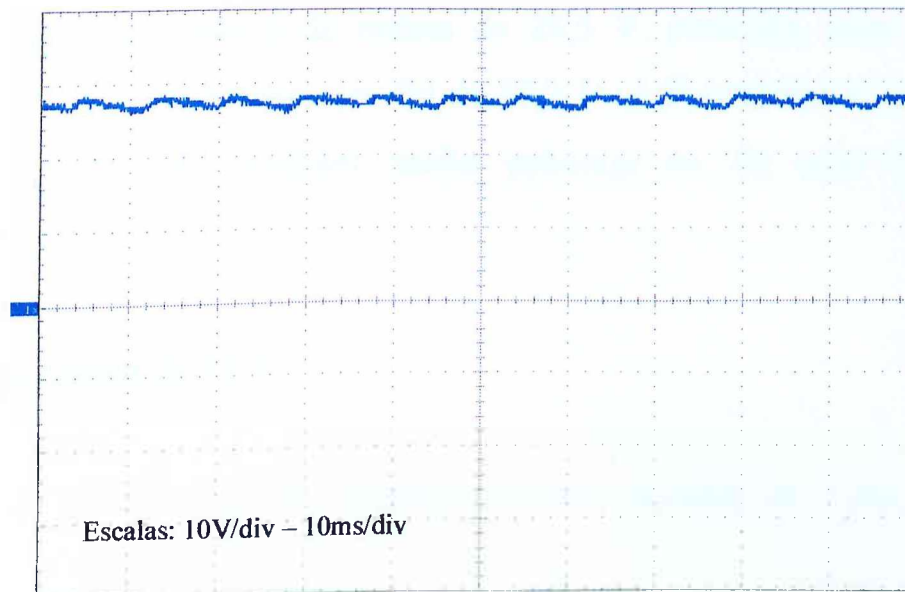


Figura 3.11 – Tensão no Elo de Corrente Contínua – Experimental

Através da figura 3.11, verifica-se que o valor da tensão no elo de corrente contínua é de aproximadamente 27,2 V, e seu conteúdo harmônico apresenta uma distorção harmônica total (DHT) de 1,92%.

Na seqüência, a figura 3.12 mostra a correspondente tensão obtida computacionalmente.

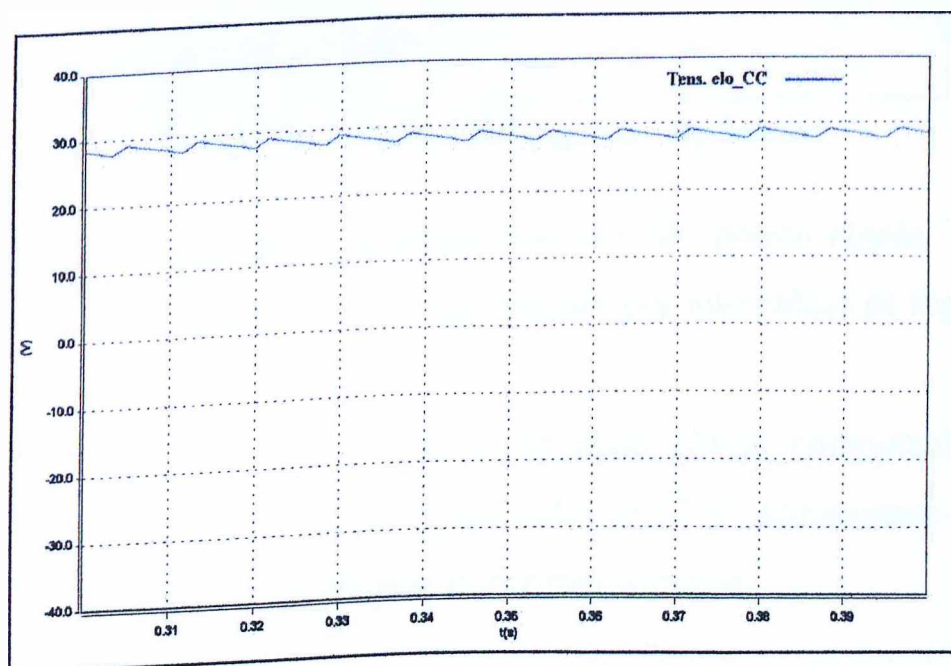


Figura 3.12 – Tensão no Elo de Corrente Contínua – Computacional

O valor médio da tensão é da ordem de 28,5 V, portanto, bem próximo do verificado experimentalmente, que foi de 27,2 V. Adicionalmente, seu DHT foi de 1,98%, valor este também muito próximo ao do caso experimental (de 1,92%).

d) Tensão na saída de 10 V

A figura 3.13 mostra a tensão medida na saída regulada da fonte linear, cujo valor é de 9,97 V.

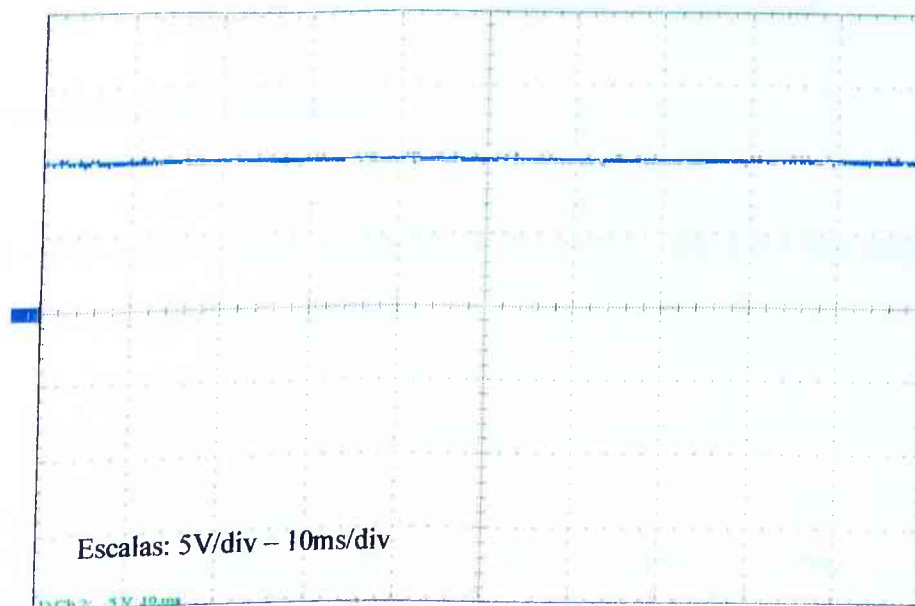


Figura 3.13 – Tensão na Saída Regulada – Experimental

Como pode ser observado, o sinal apresentado não possui *ripple*. Este fato é uma característica das tensões contínuas obtidas por intermédio de reguladores.

A figura 3.14 ilustra a mesma forma de onda obtida computacionalmente. Novamente, tanto a forma quando o seu valor (9,57 V) apresentam-se bastante semelhantes às condições verificadas experimentalmente.

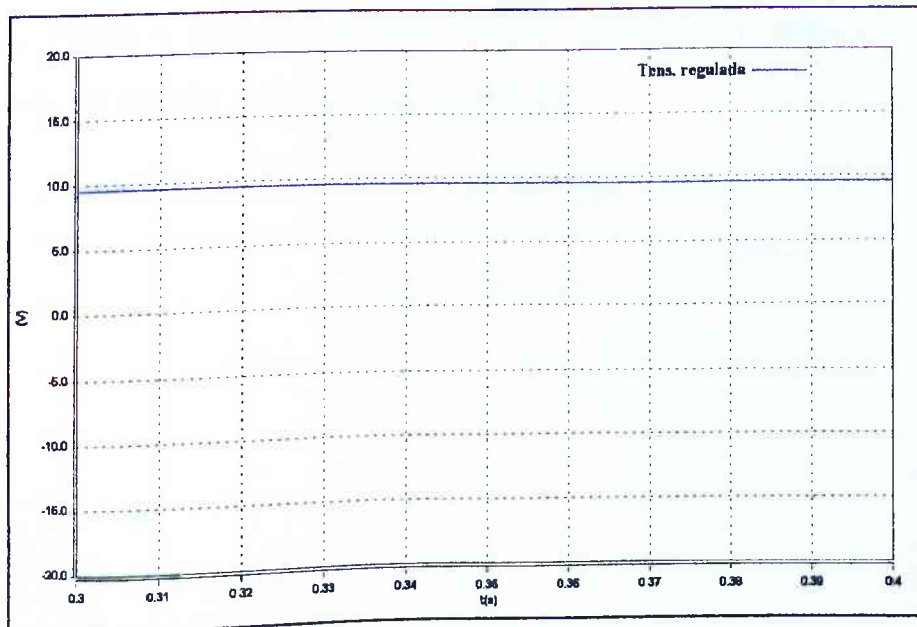


Figura 3.14 – Tensão na Saída Regulada – Computacional

e) Tensão na saída não regulada

A forma de onda apresentada na figura 3.15 mostra, para o caso experimental, a tensão medida na saída não regulada.

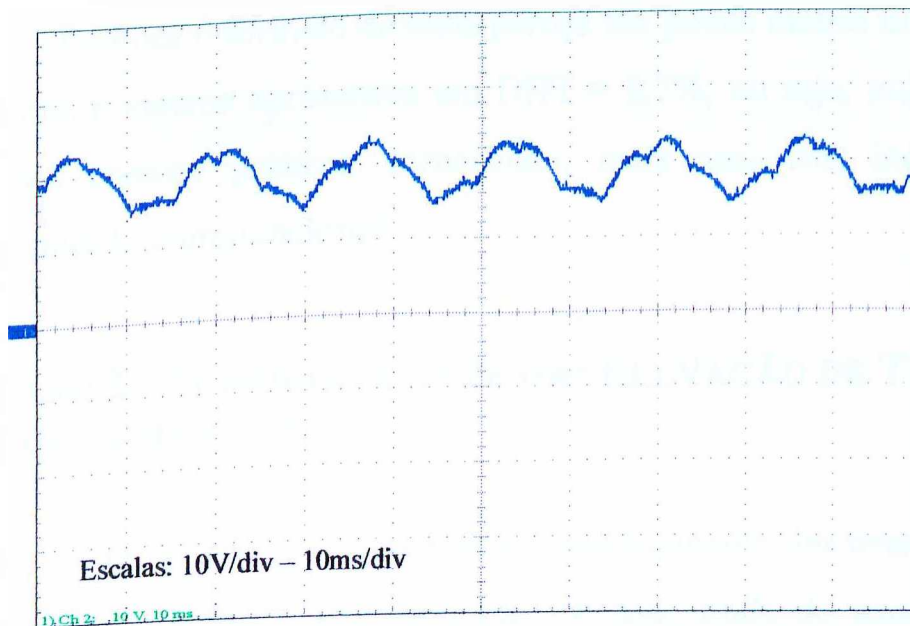


Figura 3.15 – Tensão na Saída Não Regulada – Experimental

O valor RMS da tensão para esta situação é de 18,8 V e sua distorção harmônica total é de 8%.

Ainda, com vistas a aferir o modelo digital utilizado, a figura 3.16 ilustra a forma de onda da tensão na saída não regulada.

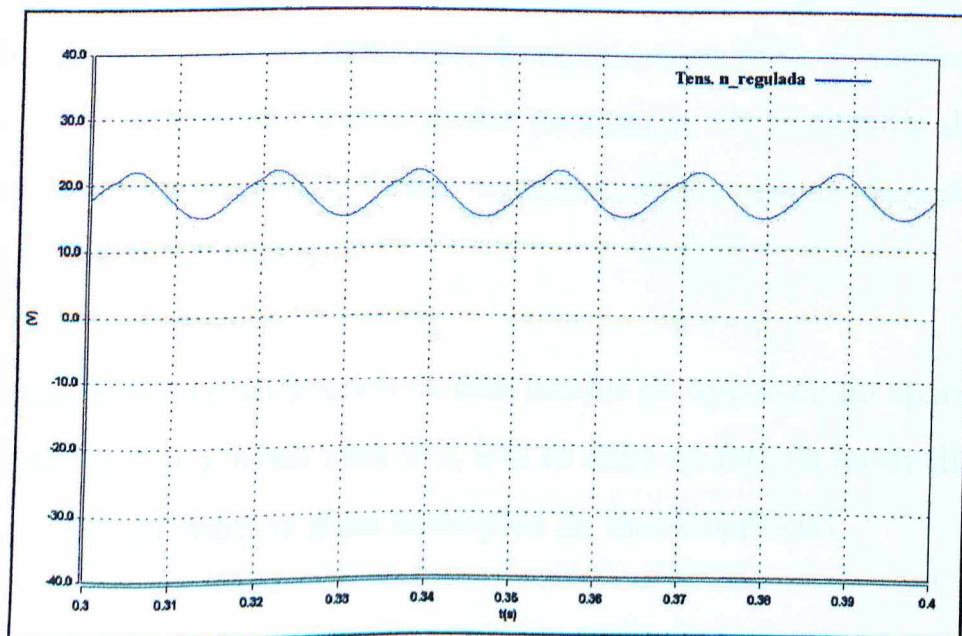


Figura 3.16 – Tensão na Saída Não Regulada – Computacional

O valor da tensão medida na saída não regulada para o caso simulado foi de 18,3 V, praticamente coincidente com aquele observado experimentalmente, que foi de 18,8 V. Embora o formato da onda pareça um pouco menos distorcido que o experimental, a mesma apresentou um DHT = 8,7%, ou seja, muito próximo ao obtido nos ensaios práticos, fornecendo, mais uma vez, indicativos da validade do modelo computacional.

3.4.2. CASO 2 - SUPRIDOR CONTENDO ELEVAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Este estudo foi direcionado para verificar o comportamento das tensões de saída da fonte linear mencionadas anteriormente, ou seja, saída de tensão regulada para 10 V e saída de tensão não regulada, identificada na figura 3.3 como EF, diante da presença de uma elevação de tensão de curta duração por parte do supridor.

A metodologia empregada para realizar esta etapa da pesquisa consistiu em se aumentar gradualmente a tensão aplicada aos terminais do aparelho de som. O máximo de acréscimo aplicado foi de 20%, para que o equipamento não fosse danificado. É importante destacar que, de acordo com [20], elevações de tensão encontram-se, tipicamente, abaixo destes patamares. Os tempos de duração das elevações de tensão também foram variados, sendo que a duração máxima considerada foi de 100 ciclos.

Para os testes, foram considerados os dois modos de operação do aparelho (rádio ou reprodutor de *CDs*). Mais uma vez, isto se deve ao fato de haver diferença no consumo de energia entre as duas condições de funcionamento.

Neste caso, também foram realizados estudos experimentais e computacionais, cujos resultados estão apresentados na seqüência, onde apenas a condição mais crítica testada, ou seja, 20% de elevação de tensão com duração de 100 ciclos é mostrada.

3.4.2.1. FUNCIONAMENTO DO APARELHO DE SOM NO MODO RÁDIO

Na seqüência são apresentados os estudos para os testes experimentais e computacionais para o equipamento funcionando como rádio.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

A figura 3.17 mostra em (a) o comportamento da tensão de alimentação do aparelho de som e, em (b) o comportamento da tensão na saída regulada da fonte linear.

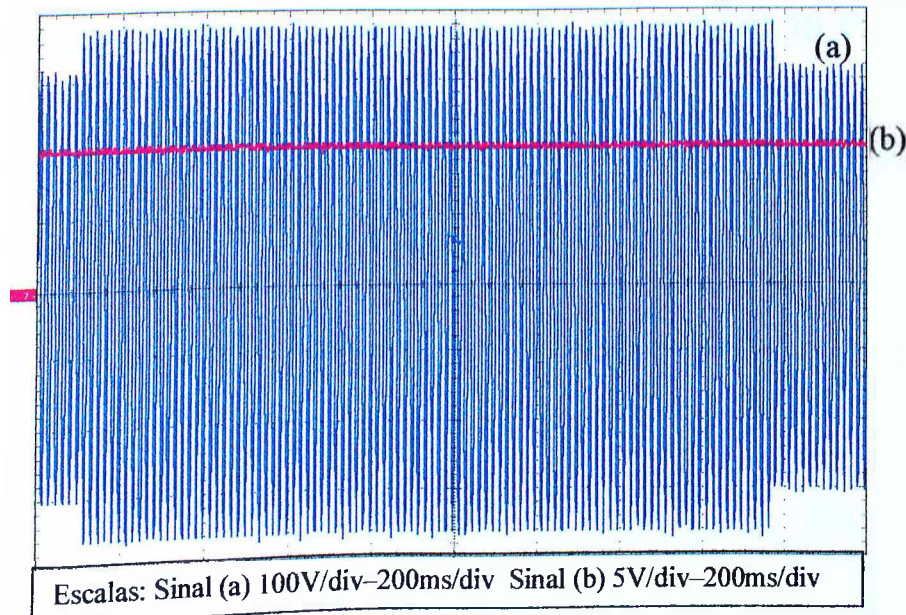


Figura 3.17 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

Através da figura pode-se observar que apesar do aumento ocorrido na tensão de alimentação, não foi verificada nenhuma alteração no comportamento da tensão na saída regulada da fonte linear, fato este que não ocasionou qualquer alteração funcional significativa do aparelho.

Comparando-se o resultado experimental com o obtido digitalmente e mostrado na figura 3.18, pode-se observar total semelhança entre os as tensões avaliadas.

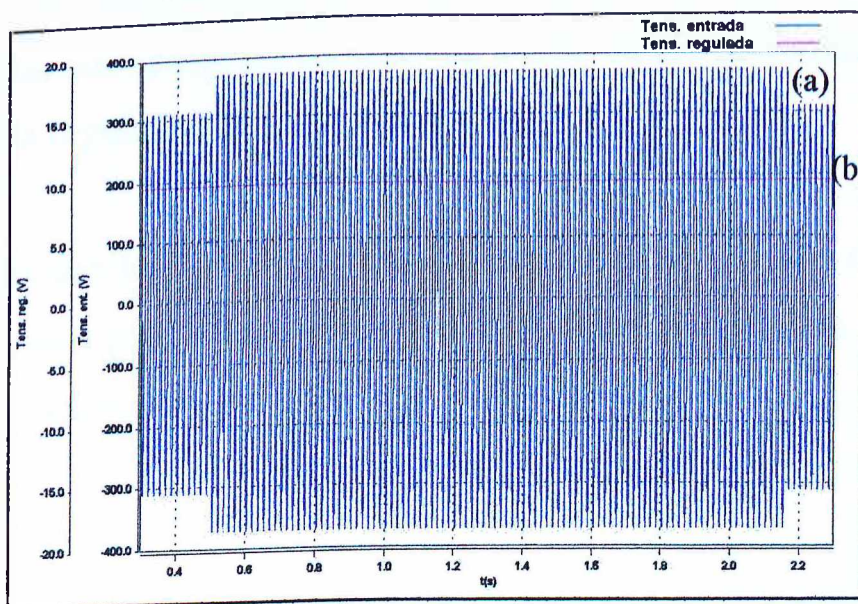


Figura 3.18 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 10 V

A figura 3.19 mostra o comportamento das tensões no elo de corrente contínua (a) e na saída regulada (b) da fonte linear, para o caso experimental.

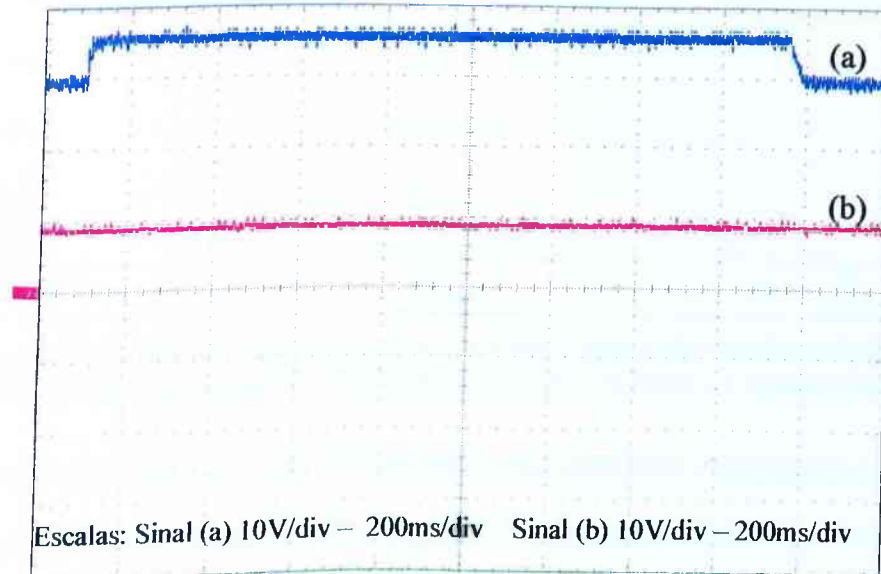


Figura 3.19 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

Através da figura é possível verificar que a tensão no elo de corrente contínua aumentou cerca de 21% durante a ocorrência da elevação de tensão, portanto, praticamente na mesma proporção que a tensão de alimentação. Pode-se constatar ainda, que apesar do aumento na tensão do elo de corrente contínua, a tensão na saída regulada não sofreu alteração.

O desempenho das tensões no elo de corrente contínua (a) e na saída regulada (b) da fonte linear para o caso computacional, foi semelhante ao experimental, como pode ser visto na figura 3.20.

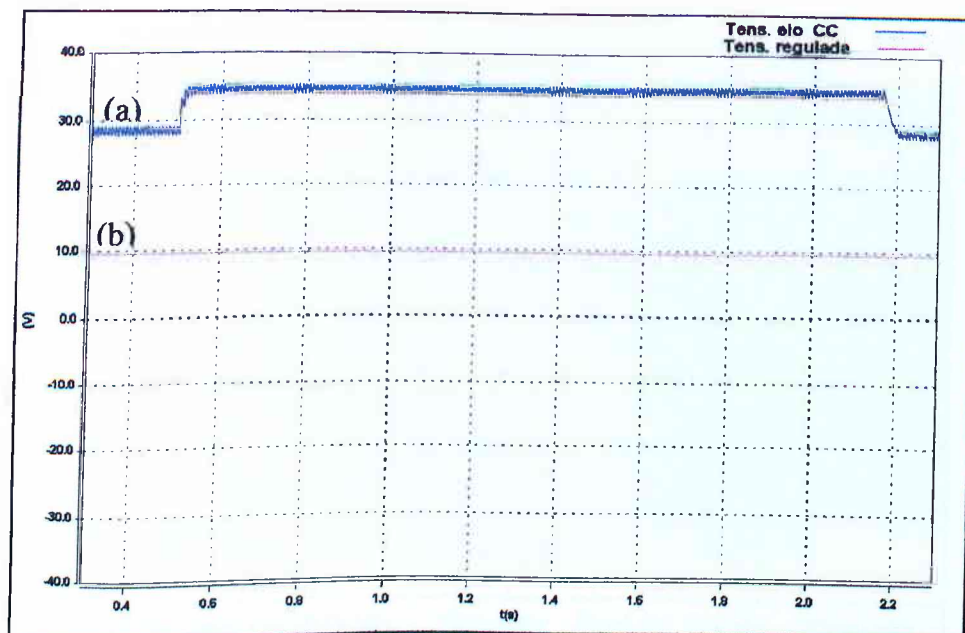


Figura 3.20 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

A tensão no elo CC para o caso computacional também acompanhou a elevação de tensão, aumentando aproximadamente 21% durante a ocorrência do distúrbio, e assim como no caso experimental, a tensão na saída de 10 V não se modificou.

A semelhança verificada entre as figuras 3.19 e 3.20 contribui, mais uma vez, para validar o modelo computacional implementado.

c) Tensão CA de alimentação e tensão na saída não regulada.

A tensão na saída não regulada da fonte linear também foi monitorada. A figura 3.21 ilustra em (b) o seu comportamento. Mesmo tendo sido observada alteração no comportamento da tensão na saída não regulada, o aumento em seu valor foi da ordem de 6%, bem inferior aos 20% impostos na tensão de alimentação. Para esta situação não foi percebida nenhuma alteração no funcionamento do aparelho de som.

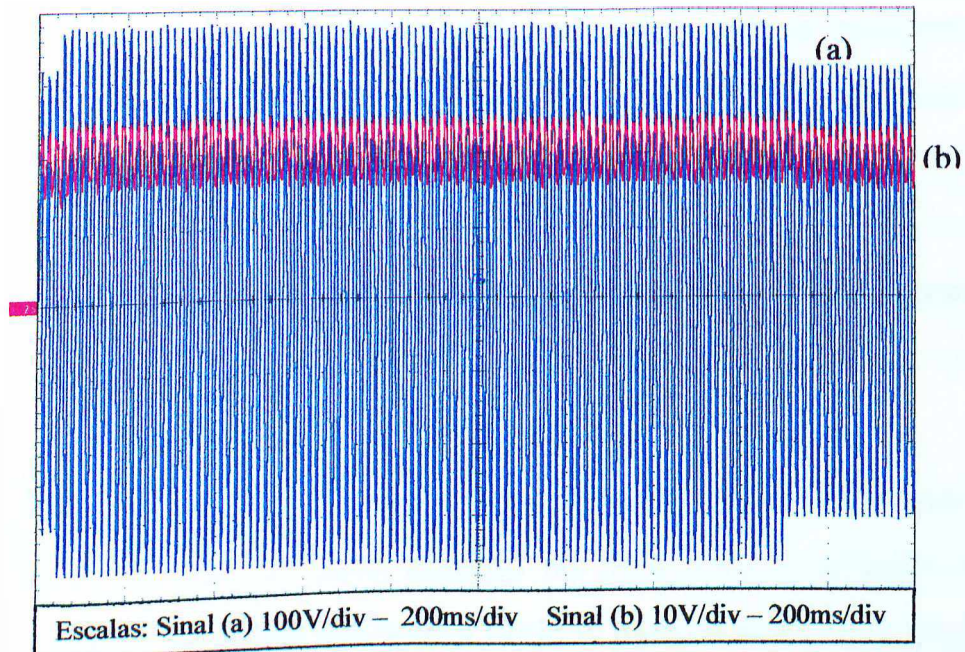


Figura 3.21 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Não Regulada da Fonte Linear Para Uma Elevação de Tensão de 20% com Duração de 100 Ciclos – Experimental

O comportamento da tensão na saída não regulada, para o caso computacional, é mostrado em (b) da figura 3.22, onde pode-se verificar total semelhança em relação ao caso prático. De fato, a tensão na saída não regulada também aumentou cerca de 6% durante a elevação de tensão.

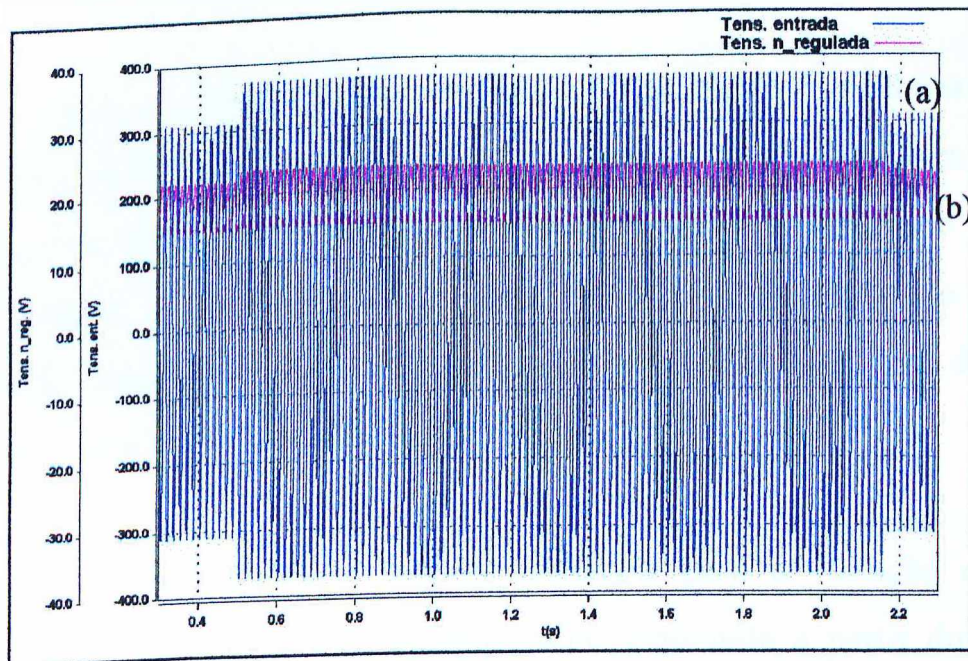


Figura 3.22 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Não Regulada da Fonte Linear Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

Os testes experimental e computacional realizados com o equipamento na presença de elevação temporária de tensão se mostraram muito semelhantes, denotando novamente a validade do modelo computacional utilizado.

3.4.2.2. **FUNCIONAMENTO DO APARELHO DE SOM NO MODO REPRODUTOR DE CDS**

O equipamento funcionando no modo reprodutor de *CDs* foi submetido aos mesmos testes realizados no caso descrito no item 3.4.2.1, quando o mesmo funcionava no modo rádio. Os resultados obtidos para os dois casos foram muito semelhantes, e o funcionamento do aparelho de som não foi alterado. Sendo assim, optou-se pela não apresentação dos resultados obtidos para esta situação em particular.

3.4.3. **CASO 3 - SUPRIDOR CONTENDO AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO**

Para este estudo, o equipamento analisado foi submetido a vários níveis de afundamento de tensão, cujos tempos de duração também foram variados. Inicialmente a tensão de suprimento foi diminuída em 10% e o tempo de duração variado gradualmente, iniciando em 0,5 e chegando ao limite de 100 ciclos. É importante salientar que a maior parte das ocorrências de “*voltage sags*” possuem duração entre 4 e 10 ciclos [16].

Posteriormente, foi mantida a mesma estratégia para a variação do tempo, porém, a tensão de alimentação gradualmente diminuída a partir do seu valor nominal, em passos de 10%, até atingir 90% de afundamento. A partir deste nível de afundamento, conforme visto anteriormente, fica caracterizada a

interrupção do fornecimento, que é outro item de qualidade a ser explorado neste trabalho.

Os procedimentos supra-mencionados foram realizados para os dois modos de operação do aparelho (rádio e reproduzidor de *CDs*). Devido à elevada quantidade de ensaios e simulações, os resultados apresentados na seqüência contemplam apenas as situações mais significativas.

3.4.3.1. FUNCIONAMENTO DO APARELHO DE SOM NO MODO RÁDIO

Como exposto, dos diversos níveis de afundamentos de tensão aplicados ao aparelho de som, apenas três níveis distintos têm seus resultados apresentados, conforme segue.

3.4.3.1.1. Afundamento de tensão de 60% com duração de 100 ciclos

Naturalmente, esta situação pode ser encarada como uma alteração bastante crítica para a operação de qualquer dispositivo elétrico. De fato, a escolha desta condição está atrelada ao ponto de antecedência ao início de manifestação de algum tipo de influência no funcionamento do aparelho de som.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

A figura 3.23 mostra o comportamento experimental da tensão de alimentação e na saída regulada quando da ocorrência do afundamento selecionado.

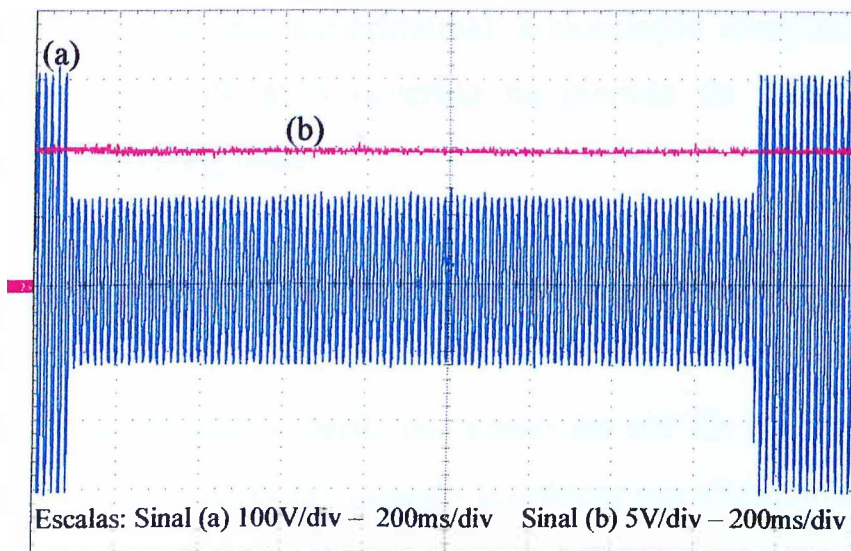


Figura 3.23 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 60% Com Duração de 100 ciclos – Experimental

A curva (a) ilustra a forma de onda da tensão que supre o equipamento e a curva (b) representa a tensão na saída regulada, através da qual pode-se verificar que na ocorrência do afundamento de tensão de 60% não houve nenhuma alteração em seu comportamento.

Na seqüência, a figura 3.24 ilustra na curva (a) a tensão de suprimento e na curva (b) a tensão medida na saída regulada, obtidas computacionalmente.

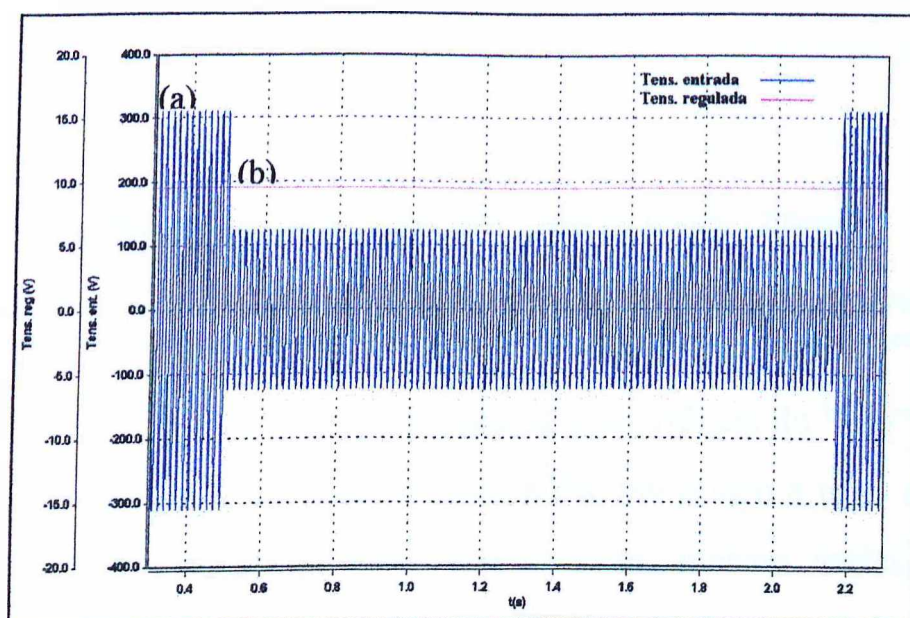


Figura 3.24 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão 60% Com Duração de 100 ciclos – Computacional

Da mesma forma que no caso experimental, a simulação computacional de um afundamento de tensão de 60% ocorrido na entrada da fonte linear não é transferido para a saída regulada.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 10 V

Foi visto anteriormente que a partir da tensão no elo de corrente contínua é obtida a tensão regulada, portanto, quando acontecer um afundamento de tensão que faça a tensão no elo de corrente contínua cair para um valor próximo da tensão na saída regulada, esta começa a sentir os efeitos do distúrbio. Para que este fato possa ser observado, a figura 3.25 mostra a tensão no elo de corrente contínua (a) e a tensão na saída regulada (b).

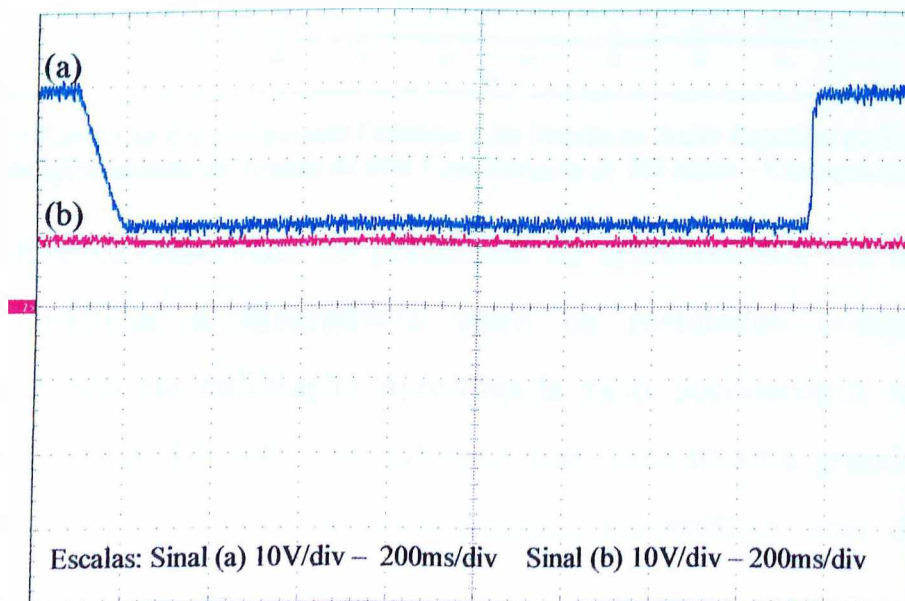


Figura 3.25 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 60% Com Duração de 100 ciclos – Experimental

Através da figura 3.25 verifica-se que durante a ocorrência do “sag” a tensão no elo de corrente contínua diminuiu cerca de 63%, um pouco a mais que a tensão de alimentação que diminuiu 60%, mantendo-se, mesmo assim, um pouco superior à tensão medida na saída regulada. Nestas condições, como já comentado, não houve influência na tensão de saída.

Como pode ser visto na figura 3.26, para o caso simulado, o nível da tensão no elo de corrente contínua diminuiu aproximadamente 64%, e praticamente atinge o valor da tensão na saída regulada, ou seja, afundou um pouco mais que no caso experimental.

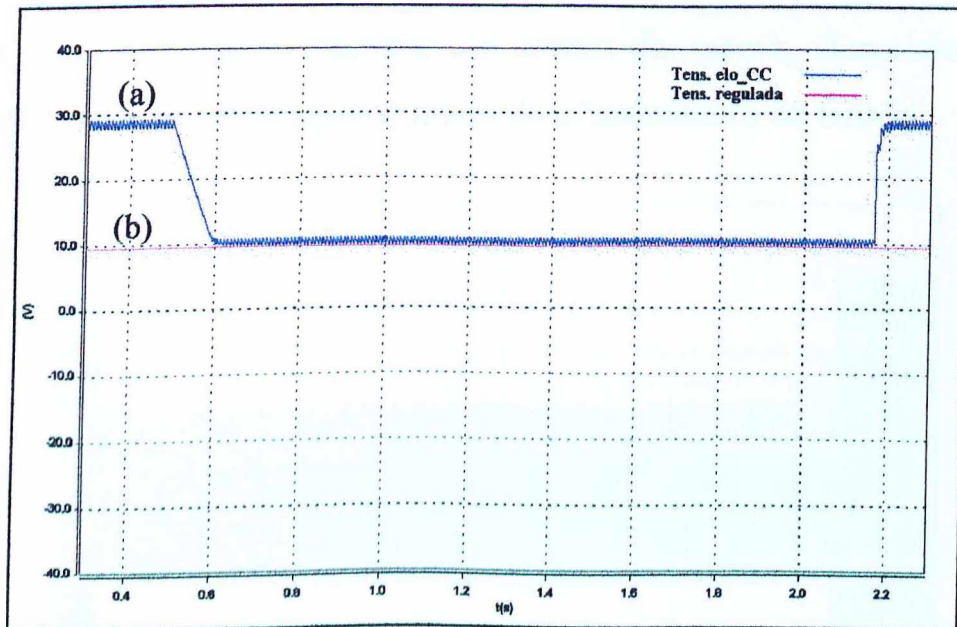


Figura 3.26 –(a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 60% Com Duração de 100 ciclos – Computacional

Além da diferença observada no percentual de afundamento, um outro motivo que pode justificar a divergência entre os resultados computacional e experimental, está na calibração apresentada pelo osciloscópio utilizado nas análises de bancada. De fato, constatou-se que, uma mesma grandeza, quando medida pelos dois canais deste equipamento, apresentava uma diferença de aproximadamente 7% .

A tensão fornecida pela saída regulada, dentre outras funções, é responsável pelo funcionamento sonoro do aparelho de som. Como esta tensão não sofreu qualquer alteração, também não se percebeu nenhuma perturbação audível no funcionamento do mesmo.

c) Tensão CA de alimentação e tensão na saída não regulada

Além do anteriormente exposto, observou-se também o comportamento da tensão na saída não regulada, que é representado pela curva (b) da figura 3.27. Nesta, pode-se constatar que no início do afundamento de tensão, seu valor que era de 18,8 V, começa a diminuir em forma de rampa, chegando a 5,9 V, aproximadamente 14 ciclos após o início do afundamento de tensão.

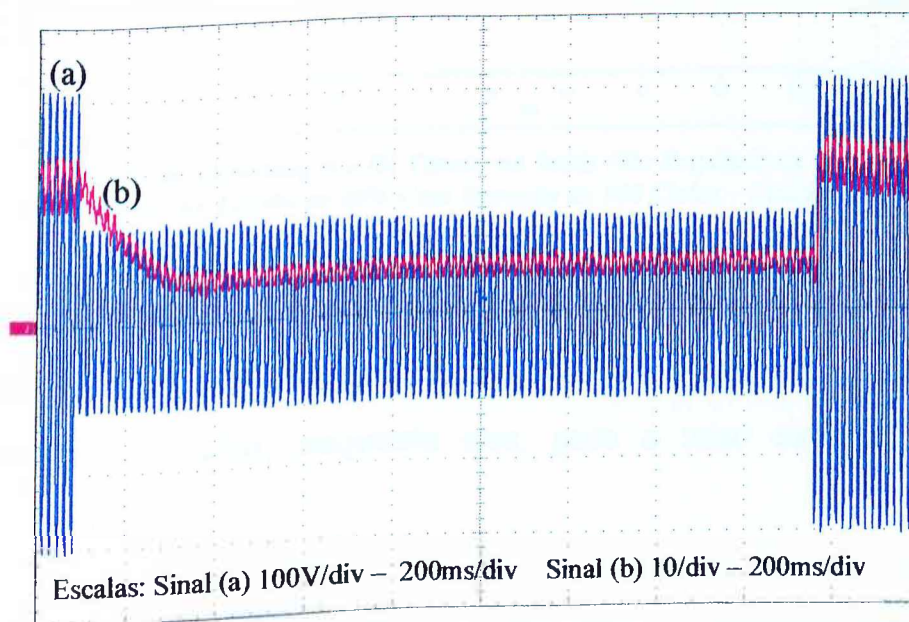


Figura 3.27 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Não Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 60% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

Como foi mencionado, a tensão não regulada alimenta o *display* do aparelho de som, que se mostrou sensível praticamente para qualquer afundamento de tensão. Neste caso particular, ou seja, na ocorrência de um afundamento de 60%, foi constatado que o *display* praticamente deixou de brilhar, voltando à normalidade em conformidade com o restabelecimento do suprimento de tensão.

A figura 3.28 retrata o comportamento na saída não regulada para o caso computacional e apresenta diferenças visíveis em relação ao caso experimental. A divergência se faz presente no tempo de afundamento da tensão de saída.

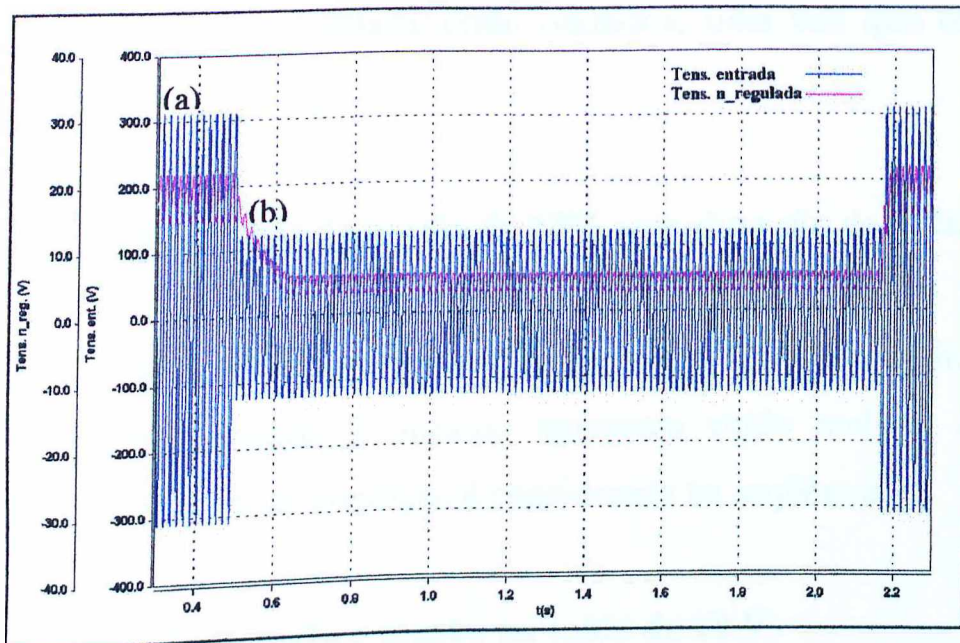


Figura 3.28 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Não Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 60% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

O tempo que a tensão não regulada levou para se estabilizar após o início do afundamento de tensão, caindo de 18,3 V para 4,38 V, no caso simulado, foi de aproximadamente 5 ciclos, enquanto que, para o caso experimental foi de 14 ciclos.

Esta divergência pode ser justificada pelo fato de que o circuito simulado tenha como característica de consumo de corrente apenas elementos resistivos, ao contrário do circuito real, que possui também elementos capacitivos e indutivos. Somado a isto, há de se considerar também o não conhecimento dos parâmetros reais do transformador de entrada da fonte linear.

Para os outros casos relacionados com afundamentos de tensão e estudados neste trabalho, ou seja, para outros índices percentuais de afundamento, o comportamento da tensão na saída não regulada mostrou-se semelhante ao mostrado anteriormente, ou seja, a tensão de saída acompanha as variações verificadas na entrada, como seria esperado. Deste modo, os demais resultados

obtidos para a saída não regulada serão omitidos, uma vez que os mesmos seriam redundantes.

3.4.3.1.2. Afundamento de tensão de 63% com duração de 7 ciclos

Uma situação identificada como sendo o limite inicial da operação indevida do aparelho de som é quando o mesmo apresenta ruído audível durante o afundamento de tensão. Esta condição é considerada na seqüência.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

A figura 3.29 mostra em (b) que, para 63% de afundamento de tensão, foi verificada uma alteração na tensão regulada aproximadamente 6,0 ciclos após o início do “sag”, caracterizando, desta maneira, um limite inicial de má operação da saída regulada da fonte linear.

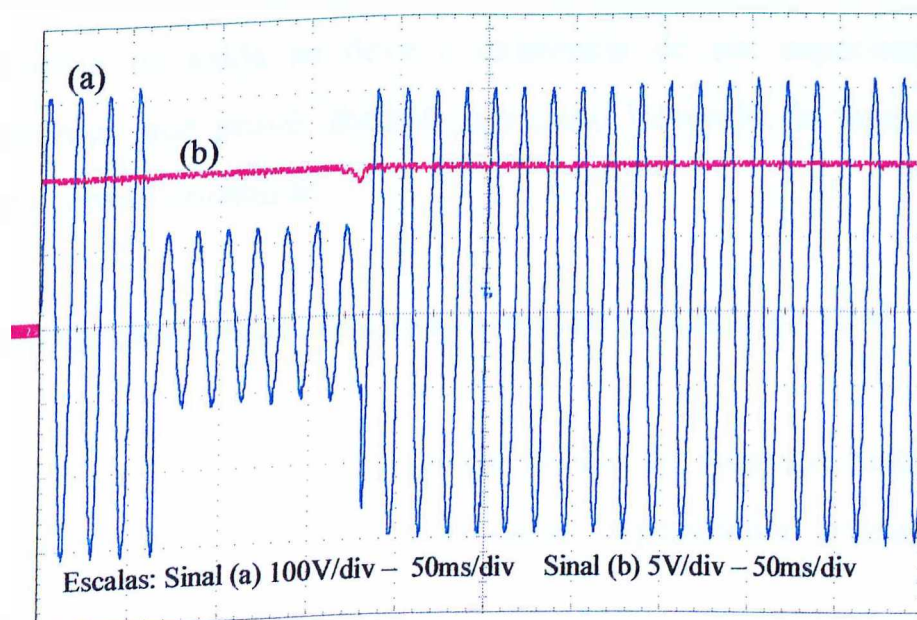


Figura 3.29– (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

Através da figura 3.30 é possível verificar que, para o caso computacional, o comportamento da tensão na saída regulada, observado na curva (b), é

semelhante ao obtido experimentalmente, ou seja, o equipamento começou a sentir a influência do fenômeno sob enfoque 6 ciclos após o início da manifestação do distúrbio na tensão de entrada.

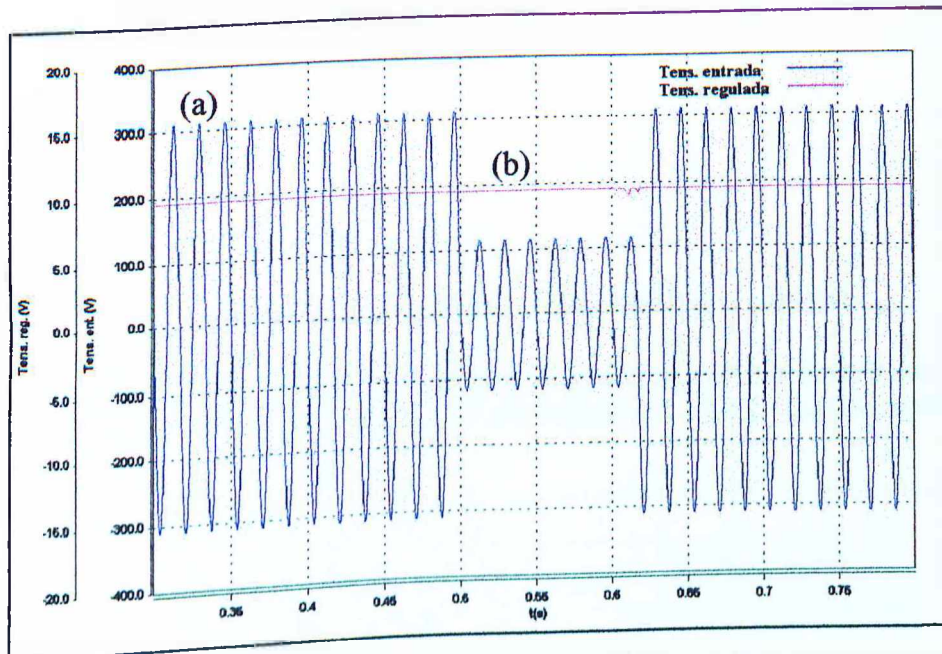


Figura 3.30 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

O fato do distúrbio ocorrido na entrada do equipamento não ter sido percebido instantaneamente na saída se deve a existência de um capacitor no elo de corrente contínua, que provê, durante um curto intervalo de tempo, a energia para manter a tensão constante.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 10 V

As figuras 3.31 e 3.32 mostram a tensão no elo de corrente contínua (a) e a tensão na saída regulada (b), para os casos experimental e computacional, respectivamente.

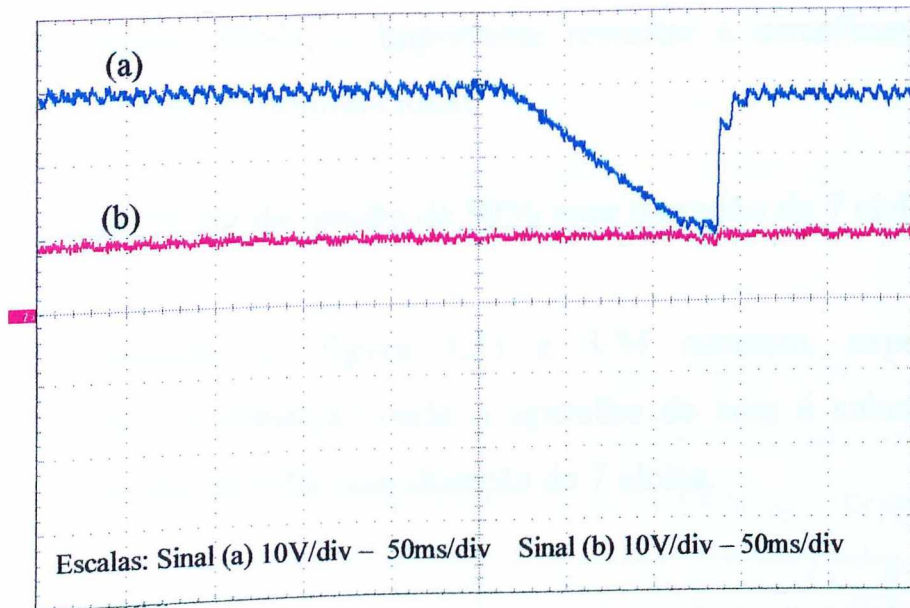


Figura 3.31 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

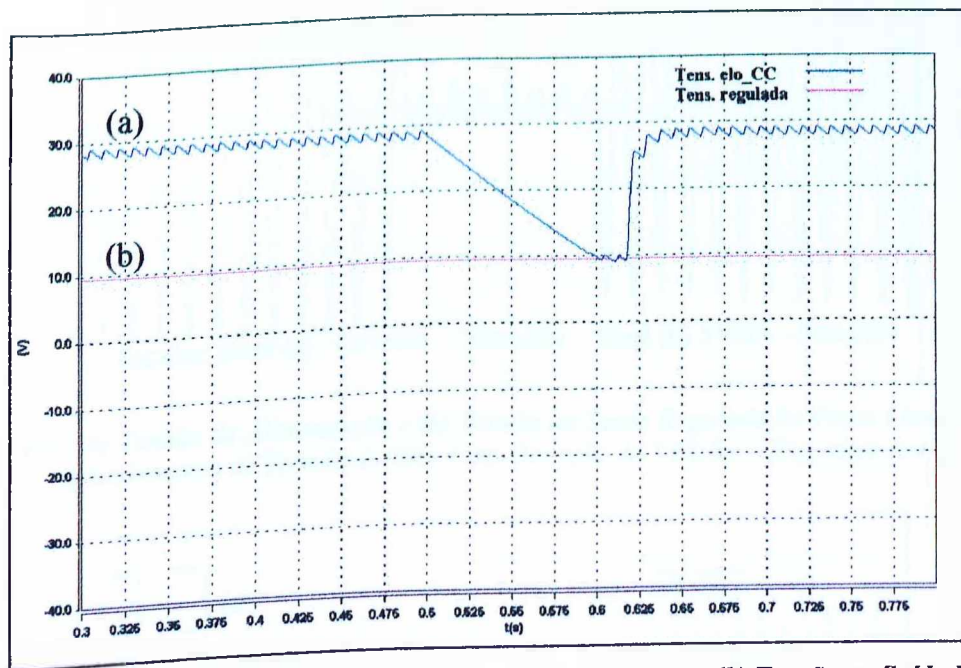


Figura 3.32 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

Através das figuras, pode-se averiguar que o tempo equivalente a aproximadamente 6,0 ciclos é o de descarga do capacitor, ou seja, o tempo que o mesmo leva para atingir o nível de tensão da saída regulada. Disto desprende que o distúrbio imposto na entrada do equipamento é refletido na saída somente 100 ms após seu início, guardado o valor de 63% de intensidade em termos de

magnitude de tensão. Ainda, é importante ressaltar a semelhança entre os resultados experimental e computacional.

3.4.3.1.3. Afundamento de tensão de 90% com duração de 7 ciclos

A título de ilustração, as figura 3.33 e 3.34 retratam, experimental e computacionalmente, a condição onde o aparelho de som é submetido a um afundamento de tensão de 90% com duração de 7 ciclos.

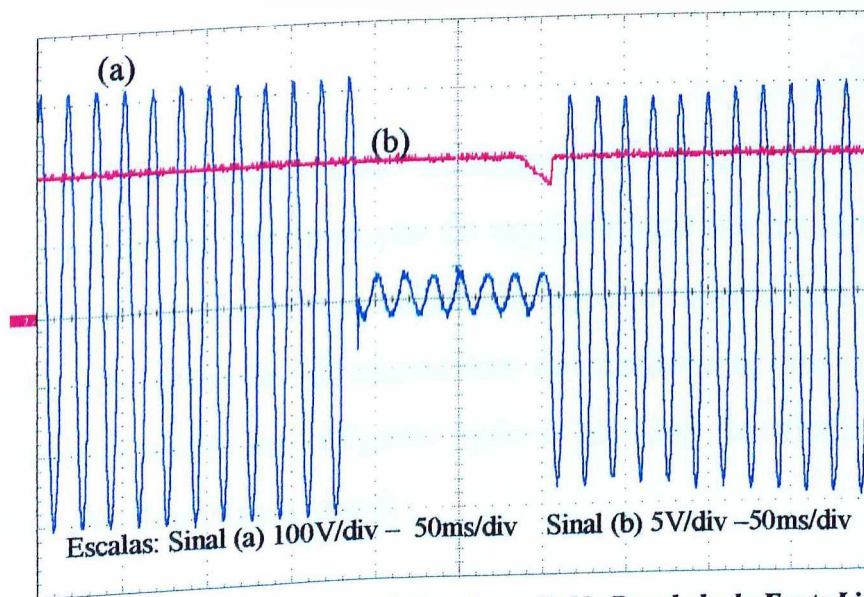


Figura 3.33 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 90% Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

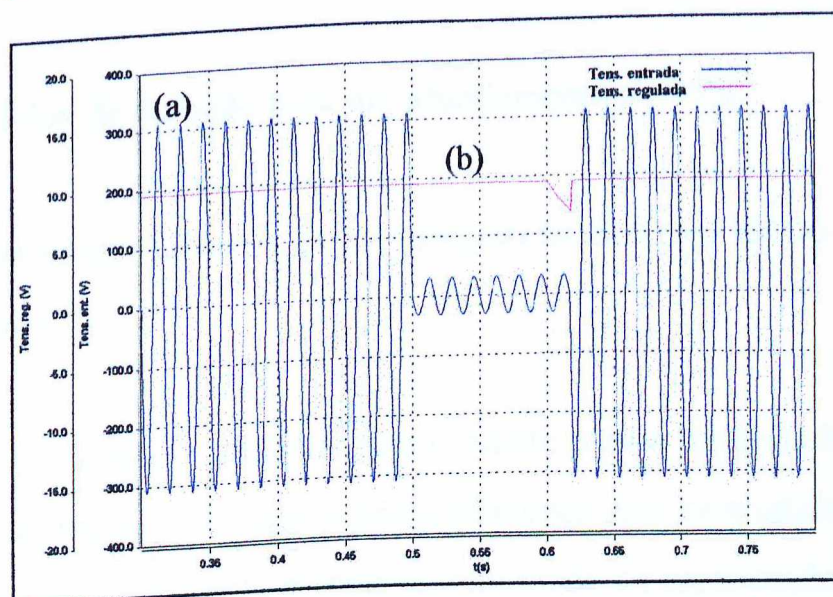


Figura 3.34 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 90% Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

Pode-se constatar, através das figuras 3.33 e 3.34, que mesmo para um afundamento de 90%, a tensão na saída de 10 V, também tem seu funcionamento comprometido aproximadamente 6 ciclos após o início do distúrbio na entrada.

Comparando os resultados computacionais em relação aos obtidos em laboratório, é possível afirmar que, a partir de 6 ciclos e 63% de afundamento de tensão, o equipamento, operando no modo rádio, mostra-se operacionalmente sensível.

Para os casos estudados envolvendo afundamentos de tensão, foi apresentado apenas o limite inicial de má operação do equipamento em estudo, sendo que o aparelho voltava a funcionar normalmente após a eliminação do distúrbio. Porém, existem situações de afundamentos de tensão em que o equipamento pára de funcionar e deve ser religado após o término do distúrbio. Algumas destas situações são descritas a seguir:

- Quando ocorre um afundamento de tensão de 80% e após 25 ciclos de duração;
- Após 12 ciclos de duração para um afundamento de 90%.

3.4.3.2. **FUNCIONAMENTO DO APARELHO DE SOM NO MODO REPRODUTOR DE CDS**

Neste caso, assim como realizado anteriormente para o modo rádio, foi mantida a mesma metodologia, sendo que a única diferença está na mudança de operação do aparelho de som, que agora é analisado no modo de reprodução de *CDS*.

Tendo em vista que este caso tem como objetivo mostrar a diferença de comportamento do equipamento em função do aumento de potência solicitada da rede de suprimento, uma vez que o modo de reprodução de *CDs* consome mais energia, na seqüência serão apresentados apenas os resultados para um afundamento de tensão de 63%. Este, como já esclarecido, constitui-se na situação limite da operação do modo rádio.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

A figura 3.35 mostra o comportamento da tensão na saída regulada durante a manifestação de um afundamento de tensão de 63% com duração de 7 ciclos. A curva destacada por (a) representa a tensão de suprimento e (b) refere-se à tensão na saída regulada. De acordo com a segunda curva, o distúrbio na saída de tensão teve seu início, aproximadamente, 3,5 ciclos após a ocorrência do afundamento de tensão na entrada do equipamento.

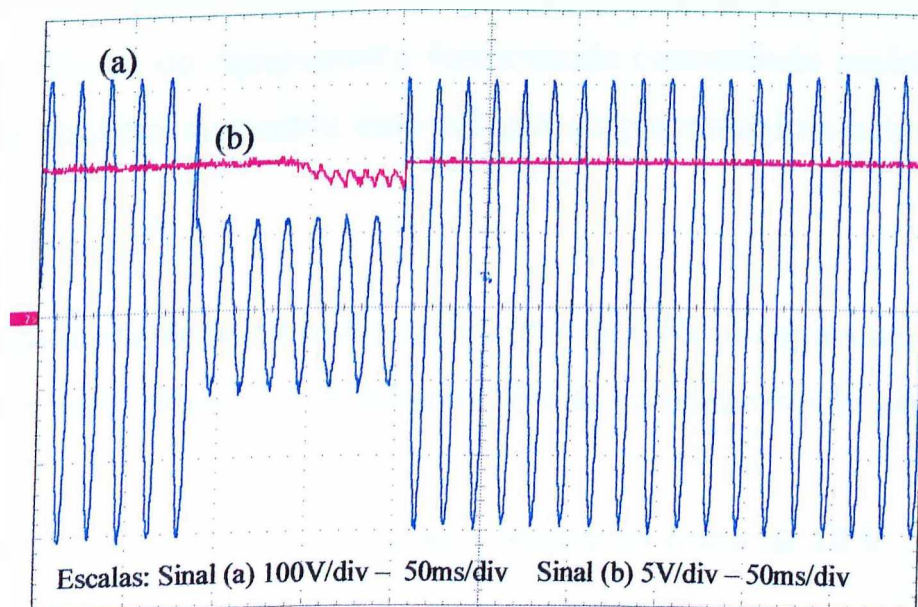


Figura 3.35 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Modo Reprodutor de CDs – Experimental

A figura 3.36 retrata em (a) o comportamento computacional da tensão de alimentação e em (b) a tensão na saída regulada para o mesmo caso simulado. O

ponto de sensibilidade, com relação ao tempo de suportabilidade, ficou em torno de 3,5 ciclos do início do distúrbio, assim como no caso experimental.

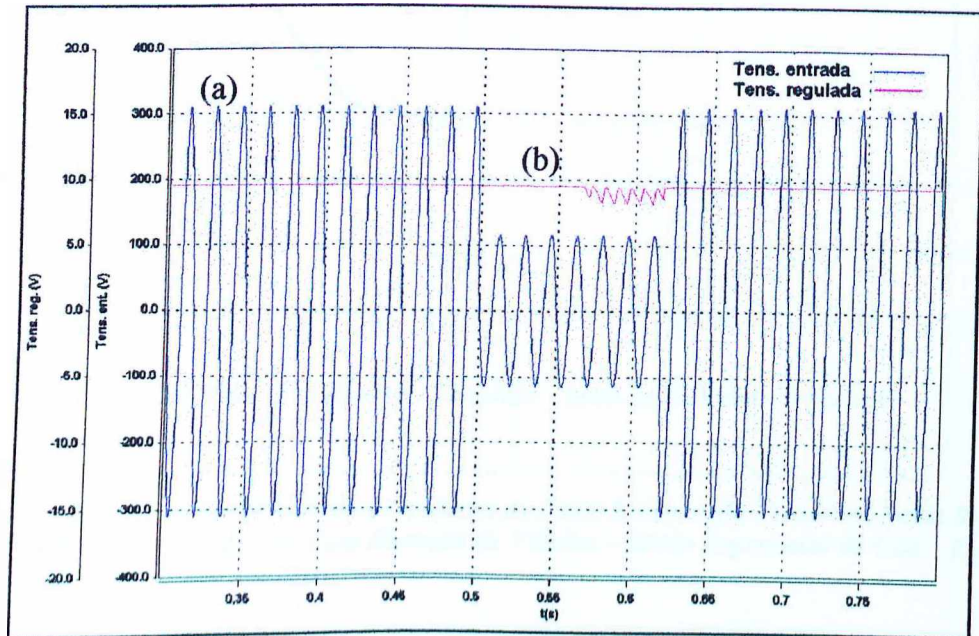


Figura 3.36 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Modo Reprodutor de CDs – Computacional

Como seria esperado, as figuras 3.35 e 3.36 também mostraram que a tensão na saída regulada diminuiu um pouco mais do que no modo rádio. Disto desprende que a sensibilidade do equipamento funcionando consumindo maior quantidade de potência também aumentou com relação ao percentual de afundamento de tensão.

Considerando a operação no modo reprodutor de CDs, o equipamento passou a ser sensível a partir de aproximadamente 57% de afundamento de tensão.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 10 V

Nas figuras 3.37 e 3.38, são mostradas, respectivamente, as tensões no elo de corrente contínua e na saída de 10 V, derivadas das montagens experimental e computacional, respectivamente.

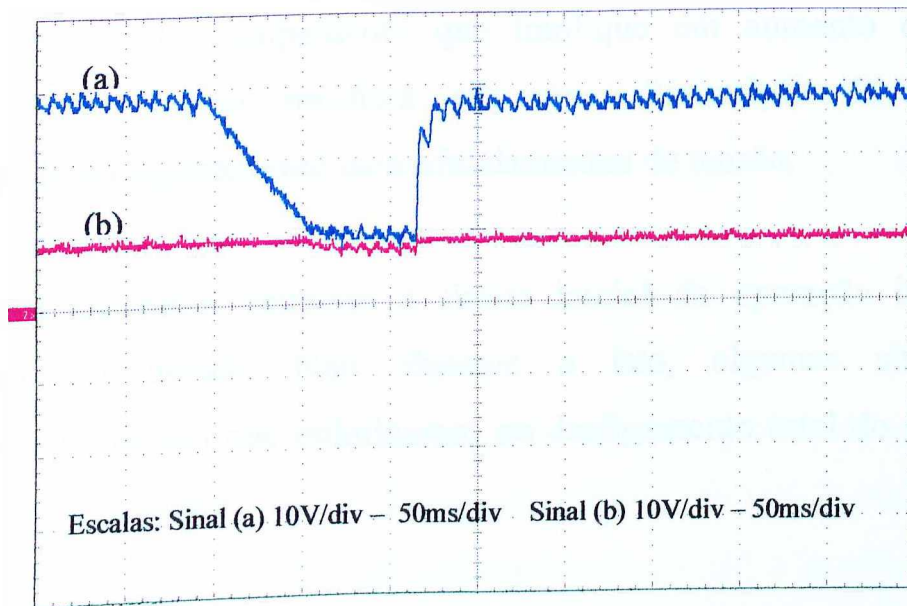


Figura 3.37 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Modo Reprodutor de CDs – Experimental

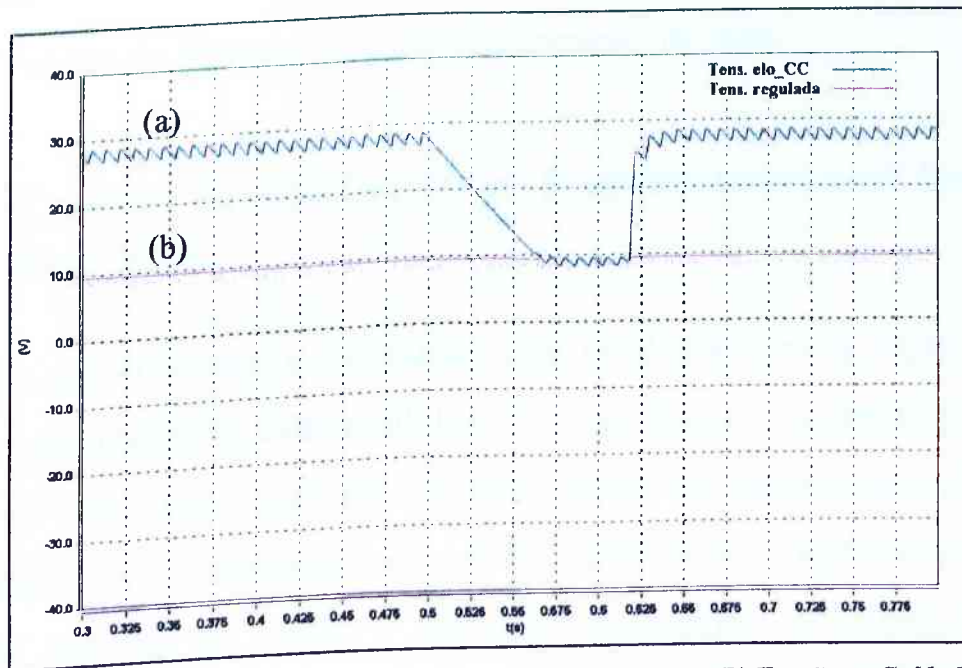


Figura 3.38 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Um Afundamento de Tensão de 63% Com Duração de 7 Ciclos – Modo Reprodutor de CDs – Computacional

Através das figuras, pode-se verificar que o tempo de descarga do capacitor do elo de corrente contínua diminui de 6 ciclos (no modo rádio), para aproximadamente 3,5 ciclos (modo reprodutor de CDs), fato este associado ao maior consumo de potência requerido por este modo de operação.

Com base no exposto, fica, mais uma vez, evidenciado que qualquer alteração no funcionamento do equipamento que implique em aumento da corrente consumida pelo mesmo resultará em uma diminuição do tempo de suportabilidade do equipamento para afundamentos de tensão.

Os resultados ilustrados retratam o limite inicial da operação indevida do equipamento em estudo. Não obstante a isto, algumas situações de afundamentos de tensão que culminaram no desligamento total do aparelho de som são descritas a seguir:

- Quando ocorre um afundamento de tensão de 80% e após 8 ciclos de duração;
- Após 7 ciclos de duração para um afundamento de 90%.

3.4.4. CASO 4 - INTERRUPÇÃO DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os estudos experimentais e computacionais conduzidos nesta seção buscaram estabelecer os limites de vulnerabilidade da fonte linear, e conseqüentemente do aparelho de som, sob condições de interrupção no fornecimento de energia elétrica. Para tanto, a estratégia adotada foi alimentar o equipamento em estudo com valor nominal de tensão e provocar interrupções no suprimento, com durações que variaram de 0,5 ciclo até o instante em que o equipamento deixou de operar. Além disso, mais uma vez foram feitas averiguações para os dois modos de operação do equipamento analisado. Por questões associadas a volume de material, apenas os resultados mais próximos dos limites serão apresentados, uma vez que este é o interesse maior da investigação.

3.4.4.1. FUNCIONAMENTO DO APARELHO DE SOM NO MODO RÁDIO

O comportamento da operação do aparelho de som, no modo rádio, está sintetizado nos resultados experimentais e computacionais mostrados a seguir.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

A figura 3.39 mostra a tensão medida na saída regulada quando da ocorrência de uma interrupção no fornecimento de energia elétrica durante 7 ciclos. A curva destacada por (a) representa a tensão de suprimento e (b) a tensão de saída da fonte regulada.

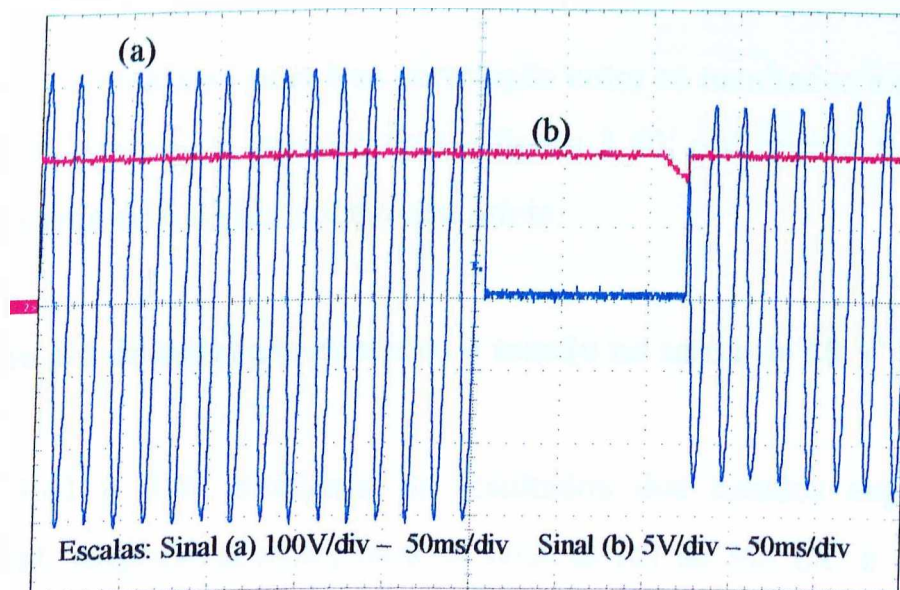


Figura 3.39 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

Assim como observado nos casos em que ocorreram afundamentos de tensão, a saída regulada foi afetada cerca de 6 ciclos após o início do distúrbio na entrada do equipamento.

A figura 3.40 retrata as mesmas tensões obtidas através da simulação computacional.

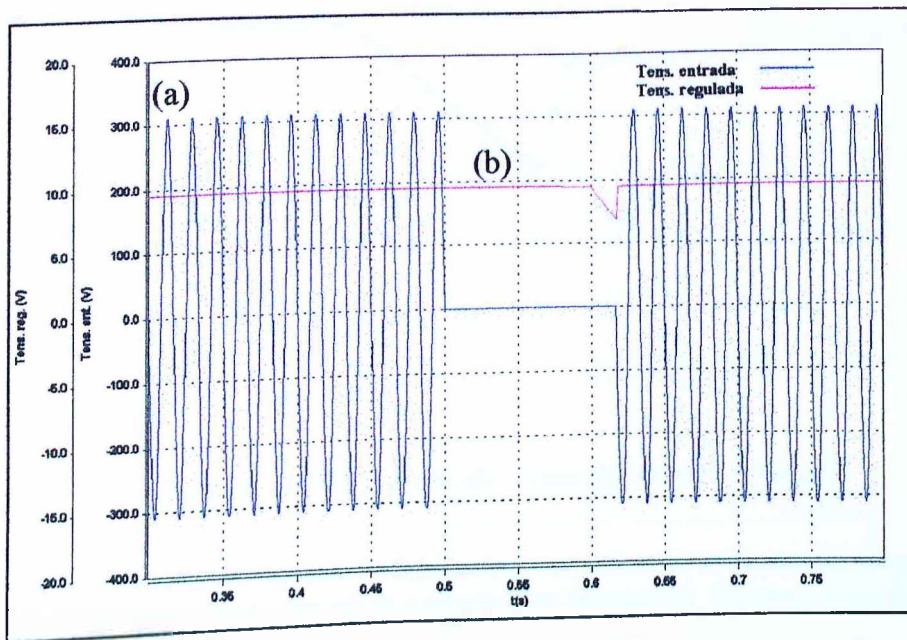


Figura 3.40 –(a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

Mais uma vez constata-se uma boa correlação entre os resultados experimental e computacional, visto que, como revela a figura 3.40, o distúrbio foi transferido para a saída cerca de 6 ciclos após o seu início.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 10 V

As figuras 3.41 e 3.42 elucidam os resultados dos estudos experimental e computacional, respectivamente, para as tensões (a) no elo CC e (b) na saída regulada da fonte linear.

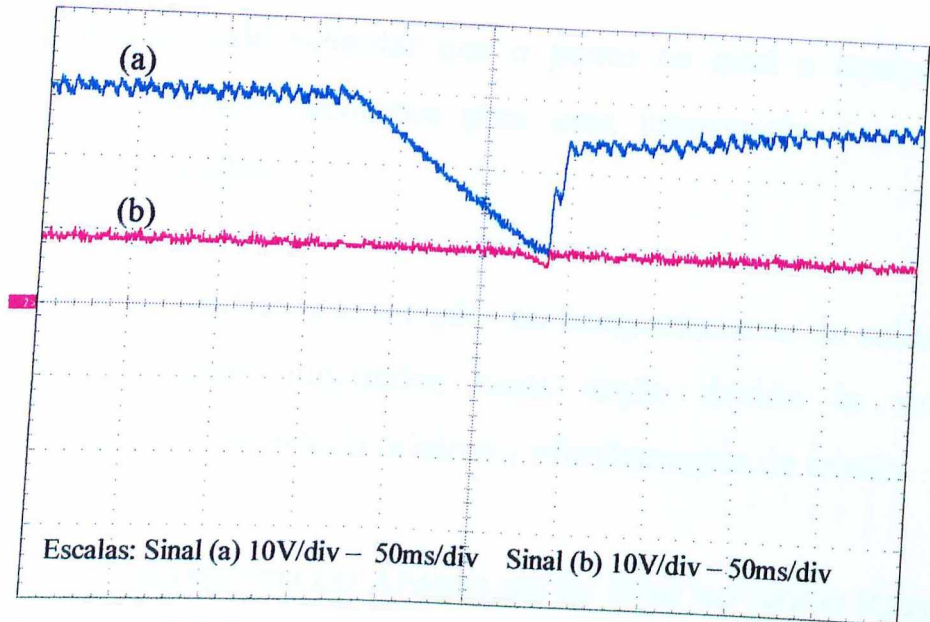


Figura 3.41 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

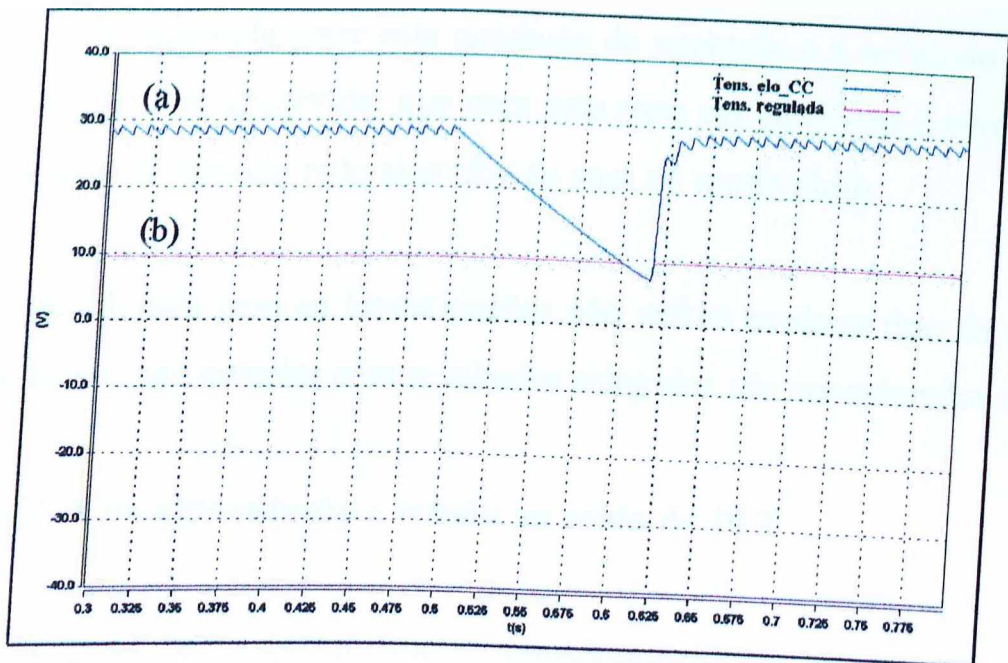


Figura 3.42 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

Ambos os desempenhos permitem constatar que, mesmo diante de uma interrupção no fornecimento de energia, o tempo de suportabilidade da saída regulada da fonte linear contínua em torno de 6 ciclos, que é praticamente o mesmo para afundamento de tensão, fato este justificado pelo tempo de descarga do capacitor do elo CC.

Complementarmente, vale salientar que o ponto no qual o equipamento não suporta e sai de operação acontece para uma interrupção com duração de aproximadamente 12 ciclos.

Vale destacar que os resultados associados ao comportamento da saída de tensão não regulada não foram mostrados nesta seção devido às semelhanças observadas com respeito ao estudo relativo a afundamentos de tensão.

3.4.4.2. FUNCIONAMENTO DO APARELHO DE SOM NO MODO REPRODUTOR DE CDS

A diferença apresentada entre esta condição de operação e a no modo rádio está no valor da corrente absorvida, que para este caso em particular é cerca de 27% maior que aquela drenada pelo aparelho de som no modo rádio.

A estratégia adotada para as investigações não sofreu nenhum tipo de alteração com relação ao caso anterior e os resultados atingidos são considerados a seguir.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

As figuras 3.43 e 3.44 ilustram, consecutivamente, o comportamento experimental e computacional da tensão de alimentação e tensão na saída regulada da fonte linear.

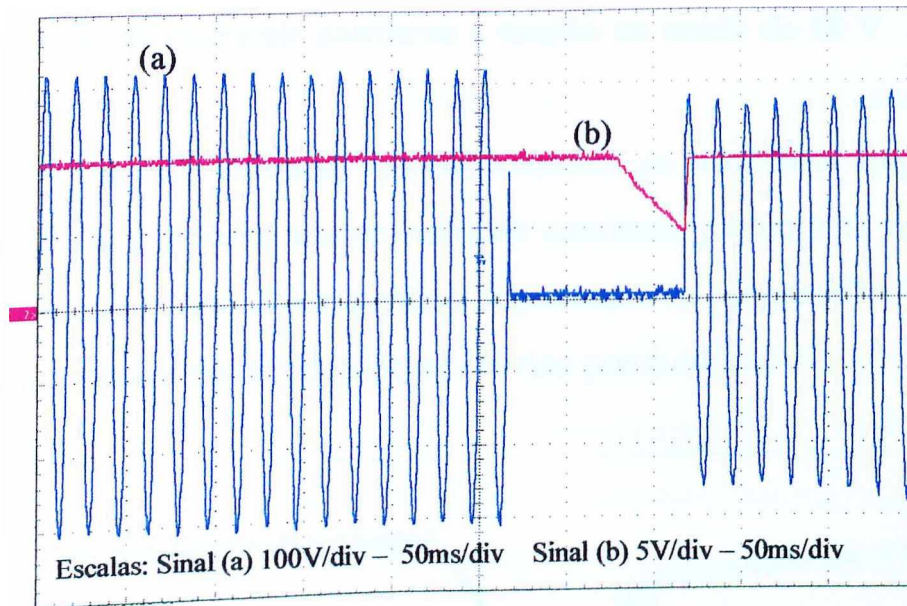


Figura 3.43 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 6 ciclos – Experimental

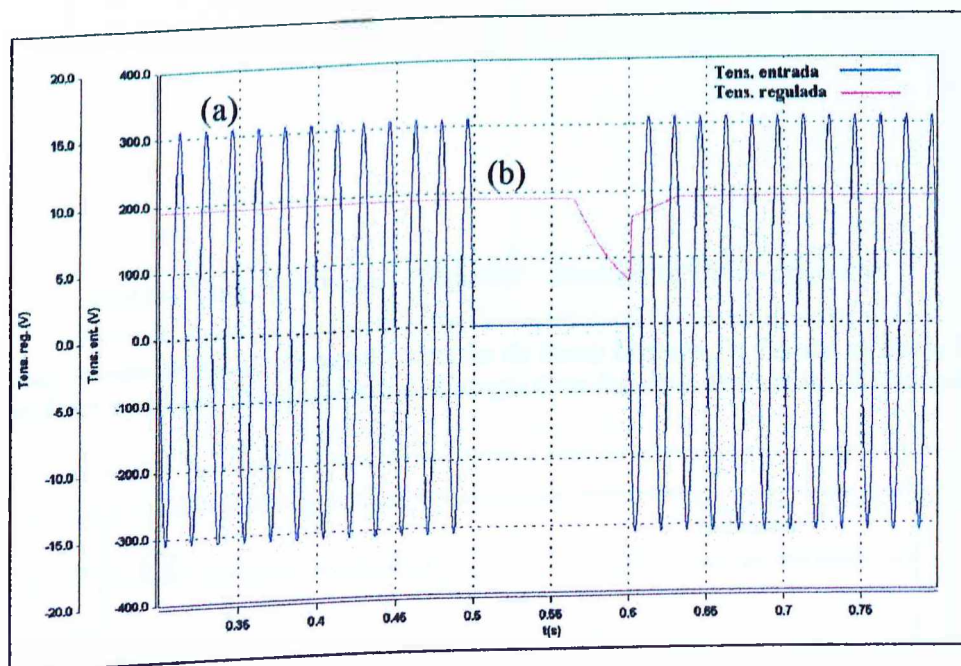


Figura 3.44 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída Regulada da Fonte Linear Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 6 ciclos – Computacional

Das figuras pode-se observar que a grandeza de interesse, no caso a tensão na saída de 10 V, é influenciada à partir de aproximadamente 3,5 ciclos da ocorrência da interrupção. Desempenho semelhante já tinha sido observado para o caso de afundamento de tensão associado ao modo reproduzidor de CDs.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 10 V

As figuras 3.45 e 3.46 indicam, respectivamente, os resultados experimental e computacional da tensão no elo de corrente contínua, juntamente com a tensão na saída regulada. Tais desempenhos expressam as consequências de uma interrupção no fornecimento de energia elétrica por 6 ciclos.

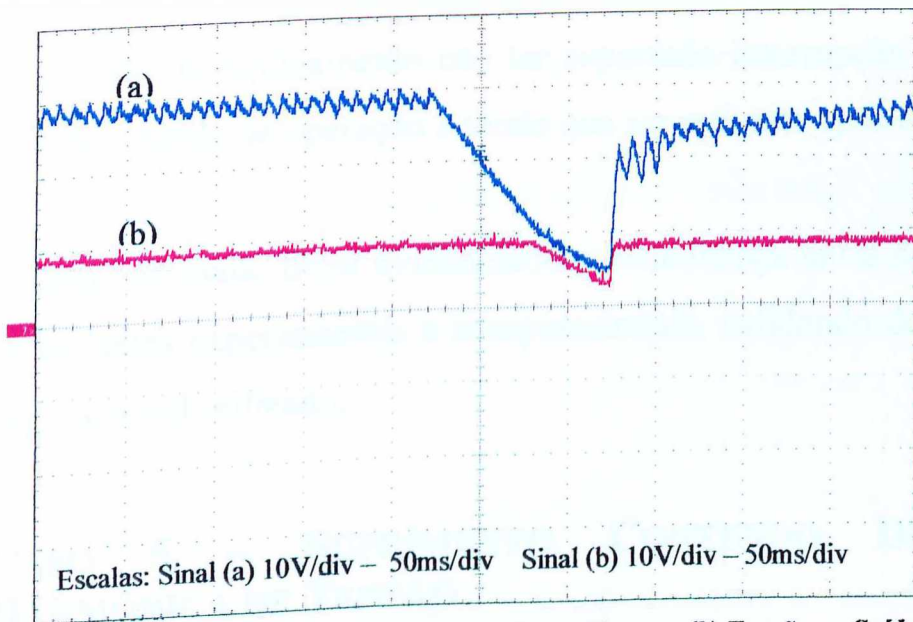


Figura 3.45 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 6 ciclos – Experimental

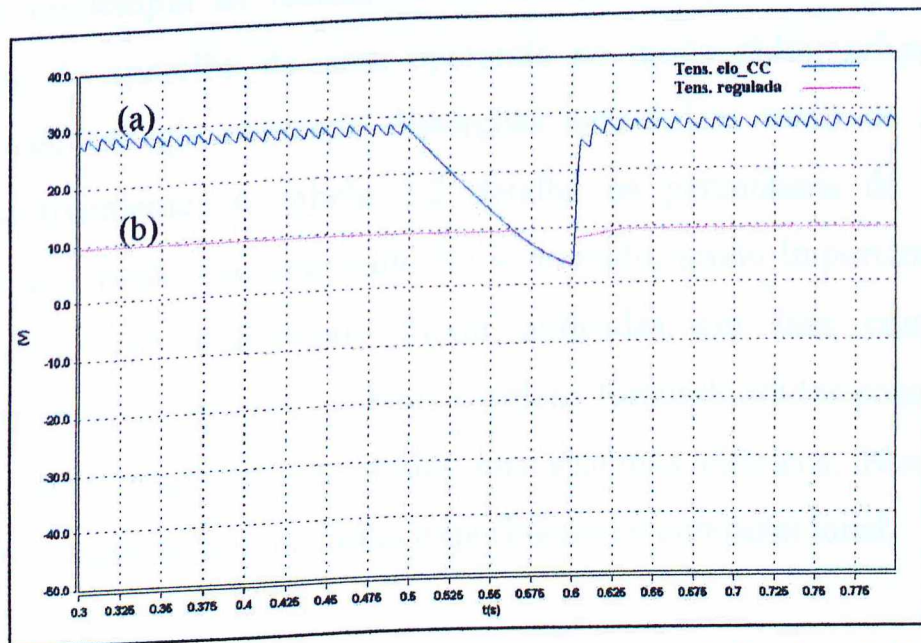


Figura 3.46 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear e (b) Tensão na Saída Regulada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 6 ciclos – Computacional

Os resultados obtidos evidenciam que o tempo de descarga do capacitor para este caso também caiu para aproximadamente 3,5 ciclos. Isto, mais uma vez, demonstra que a sensibilidade do equipamento depende do capacitor do elo de corrente contínua ou da carga por ele suprida.

Deve-se salientar que para estes estudos, a duração do distúrbio aplicado ao equipamento de som foi de apenas 6 ciclos, diferentemente dos casos anteriores. Isto se deve ao fato do equipamento não ter suportado interrupção superior ao valor supracitado, saindo de operação e tendo que ser religado após o distúrbio.

Finalmente, uma vez mais, ficou evidenciado a semelhança entre os resultados obtidos com os testes experimentais e computacionais, validando deste modo o modelo computacional utilizado.

3.4.5. CASO 5 – SUPRIMENTO CONTENDO DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

Esta seção contempla os resultados de estudos direcionados para analisar o desempenho do aparelho de som, operando no modo rádio, submetido a um suprimento de energia contendo distorções harmônicas totais de 5%, 10% e 20%, respectivamente. A tabela 3.2 detalha os percentuais de harmônicos individuais aos quais o equipamento foi submetido, sendo importante comentar que as harmônicas individuais foram aplicadas em fase com a tensão fundamental. Além disso, seus valores e ordens foram definidos considerando-se características tipicamente observadas nos sistemas elétricos. Novamente, os trabalhos realizados foram de cunho experimental e computacional.

Tabela 3.2. Distorções Harmônicas Individuais Aplicadas nos Ensaio

DHT	DHI (Distorção Harmônica Individual)			
	5 ^a ordem	7 ^a ordem	11 ^a ordem	13 ^a ordem
5%	4%	2,8%	1%	0,5%
10%	8%	5,6%	2%	1%
20%	16%	11,2%	4%	2%

Tendo em vista o pouco reflexo desta situação de anormalidade do suprimento elétrico na operação do equipamento sob teste, os resultados enfocados na seqüência do texto ilustram apenas as situações vinculadas com 20% de distorção harmônica. Naturalmente, esta se constitui na situação mais crítica. As demais análises estão sintetizadas através de uma tabela comparativa.

a) Tensão CA de alimentação

A figura 3.47 representa a forma de onda da tensão aplicada ao aparelho de som. O espectro da tensão da figura a seguir possui 20% de distorção harmônica total, conforme requerido para os propósitos do estudo a ser realizado.

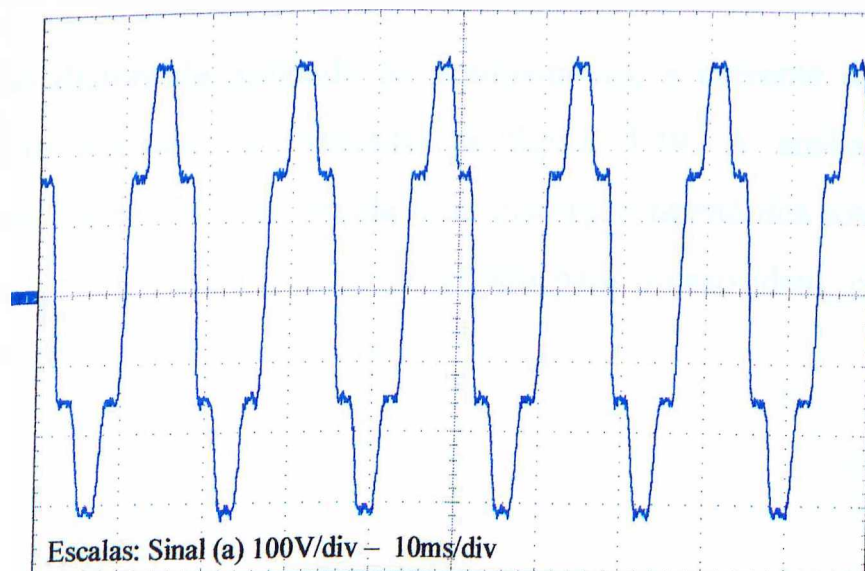


Figura 3.47 – Tensão de Alimentação Com DHT=20% – Experimental

A figura 3.48 representa a forma de onda da tensão aplicada ao aparelho de som, fornecida pela fonte implementada no simulador *SABER*.

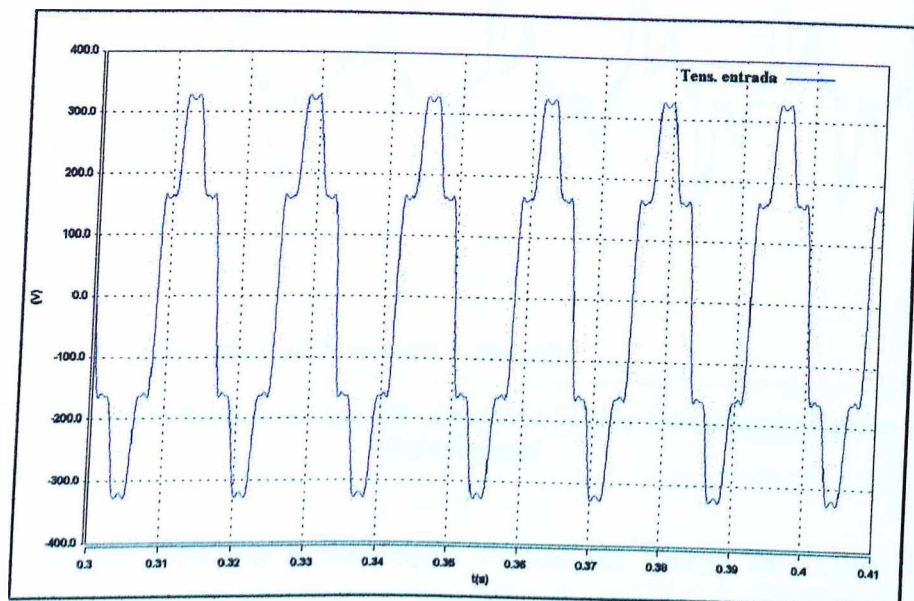


Figura 3.48 – Tensão de Alimentação Com DHT = 20% - Computacional

A forma de onda da tensão, vista na figura 3.48, possui 20% de distorção harmônica total, semelhante ao espectro da tensão fornecida pela fonte de distúrbios.

b) Corrente CA de alimentação

Para a tensão distorcida aplicada ao equipamento, a corrente de alimentação correspondente encontra-se ilustrada na figura 3.49. A análise de Fourier aplicada a esta forma de onda revela uma distorção harmônica total de corrente de 70,5%, valor este bem próximo do obtido para o caso ideal, com tensão de suprimento senoidal, que foi de 72%.

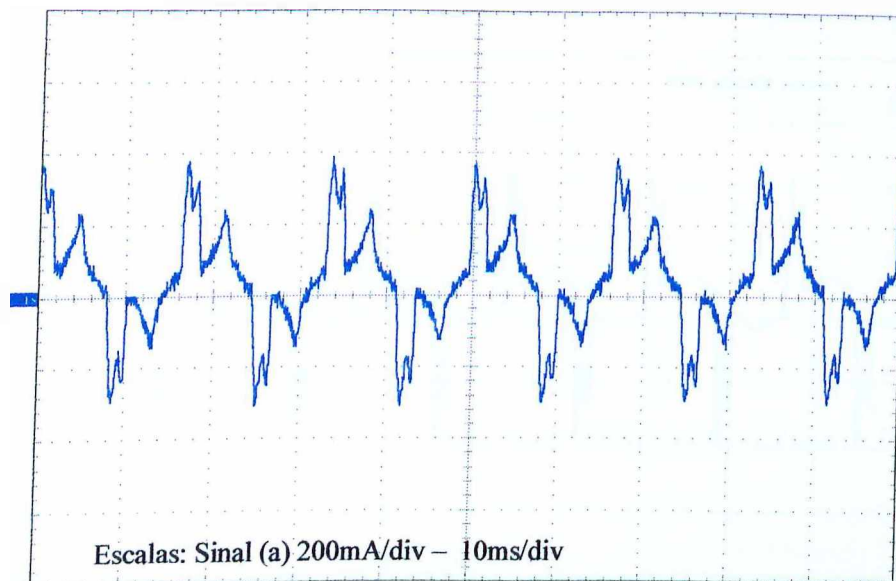


Figura 3.49 – Corrente na Entrada do Aparelho Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% – Experimental

Deste modo, muito embora a alteração visual da forma de onda da corrente, conclui-se que houve pouca influência da distorção harmônica total na tensão de suprimento. Disto surge a afirmativa que a presença de harmônicos na rede de alimentação, desde que estas se apresentem dentro dos valores tipicamente encontrados, não sugere maiores problemas operacionais para o equipamento pesquisado.

O correspondente resultado da simulação encontra-se ilustrado na figura 3.50.

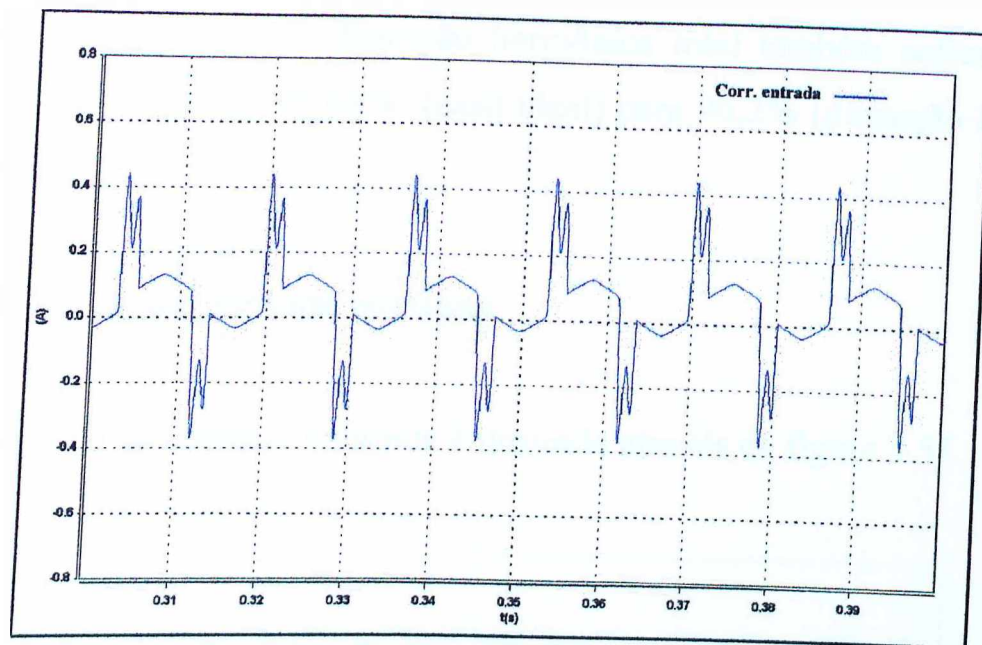


Figura 3.50 – Corrente na Entrada do Aparelho Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT = 20% - Computacional

Apesar de haver semelhança entre esta forma de onda e a experimental, pode-se verificar a ocorrência de discrepâncias entre os valores medidos. Para o caso prático, o valor da DHT foi de 70,5%, enquanto que o estudo computacional encontrou-se um DHT de 96,2%. Este fato pode ser atribuído, conforme anteriormente comentado, ao desconhecimento de maiores informações sobre os elementos componentes do circuito equivalente do equipamento simulado.

Sintetizando, embora as diferenças supracitadas, comparando-se os resultados experimentais e computacionais obtidos para o caso ideal e com distorção harmônica de 20%, foi possível verificar que:

- Experimentalmente, a corrente no caso ideal apresentou distorção harmônica total de 72%, enquanto que no caso com de 20% de DHT, a corrente atingiu valores da ordem de 70,5%, denotando desta maneira, que as distorções de tensão pouco influíram na distorção harmônica total da corrente.

- Computacionalmente, a distorção harmônica total também sofreu pequena influência, caindo de 99,69% (caso ideal) para 96,2% (distorção harmônica de 20%).

c) Tensão no elo de corrente contínua

A tensão no elo de corrente contínua é ilustrada através da figura 3.51.

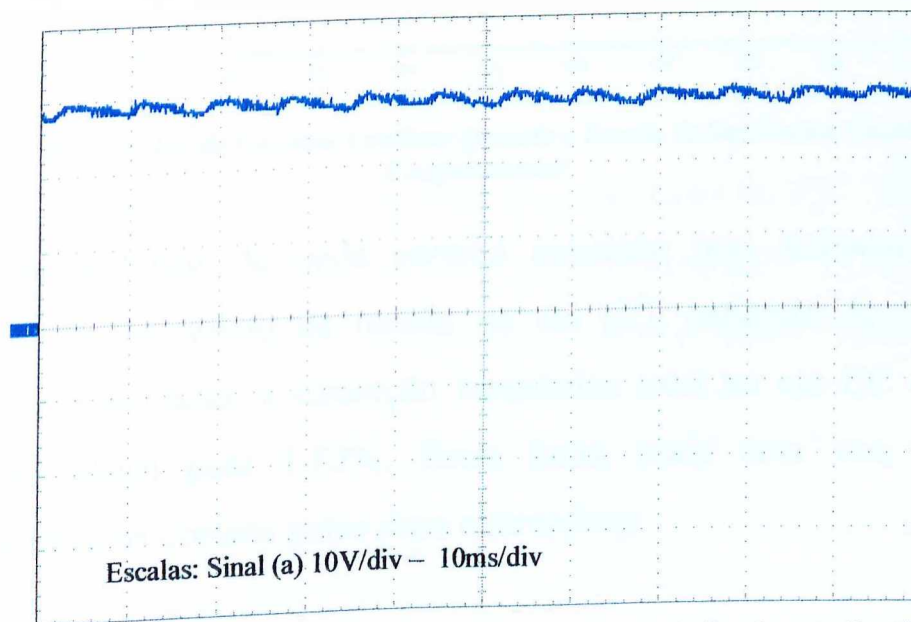


Figura 3.51 – Tensão no Elo de Corrente Contínua Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% - Experimental

A análise desta forma de onda permite constatar que houve um pequeno acréscimo no valor médio da tensão no elo CC, variando de 27,2 V para 28,7 V. Este fato está associado ao valor eficaz da tensão aplicada ao equipamento, que também foi majorado em função das harmônicas injetadas estarem em fase com a fundamental. Por outro lado, a distorção harmônica total no elo CC diminuiu de 1,92% (caso ideal) para 1,73%.

A tensão no elo de corrente contínua para o caso computacional é ilustrada através da figura 3.52.

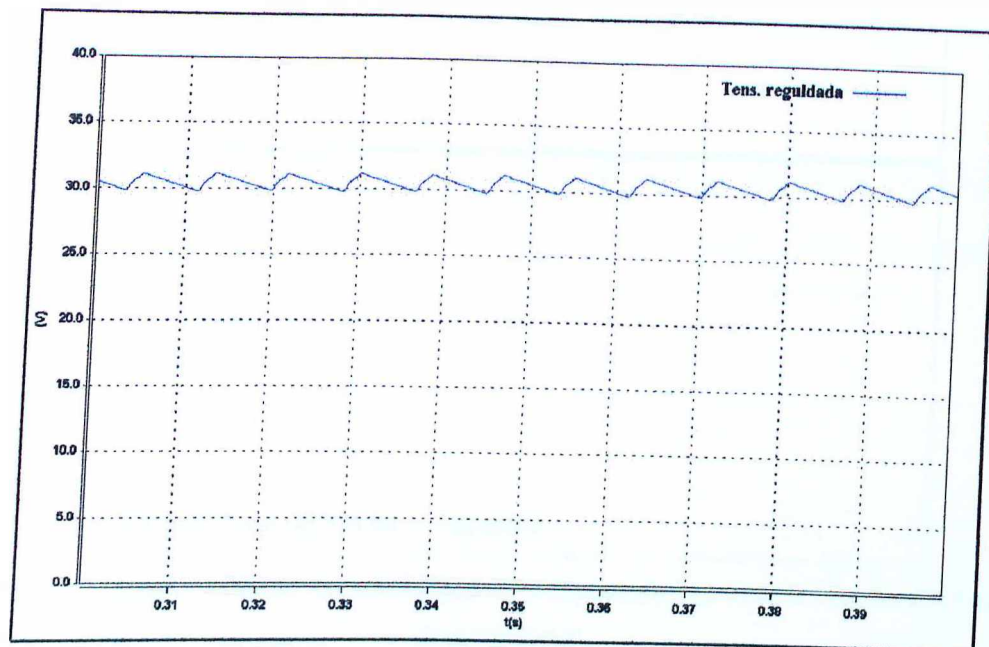


Figura 3.52 – Tensão no Elo de Corrente Contínua Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% - Computacional

A análise desta forma de onda permite constatar que, também, houve um acréscimo no valor médio da tensão no elo CC, variando de 28,5 V para 30,48 V. Por outro lado, a distorção harmônica total no elo CC diminuiu de 1,98% (caso ideal) para 1,82%. Estes fatos, mais uma vez, reforçam a semelhança entre os obtidos pelas duas alternativas.

d) Tensão na saída de 10 V

Sob as condições postuladas, a tensão na saída regulada pode ser visualizada através da figura 3.53. Novamente, não se constata maiores diferenças de funcionamento entre a situação ideal de suprimento e a operação com a tensão do sistema supridor contendo harmônicos.

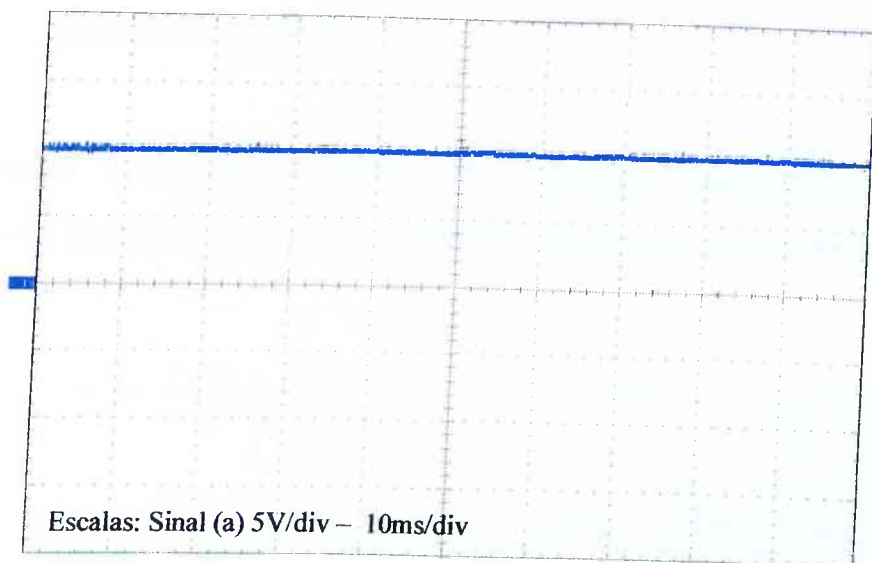


Figura 3.53 – Tensão na Saída Regulada Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% - Experimental

No caso ideal, a tensão na saída regulada possuía valor de 9,97 V. Agora, com uma distorção harmônica total de 20%, passou para 9,94 V, caracterizando, deste modo, não haver influência de harmônicos na saída regulada da fonte linear.

Assim como no caso experimental, a tensão na saída regulada obtida computacionalmente não sofreu alteração, conforme pode ser verificado através da figura 3.54.

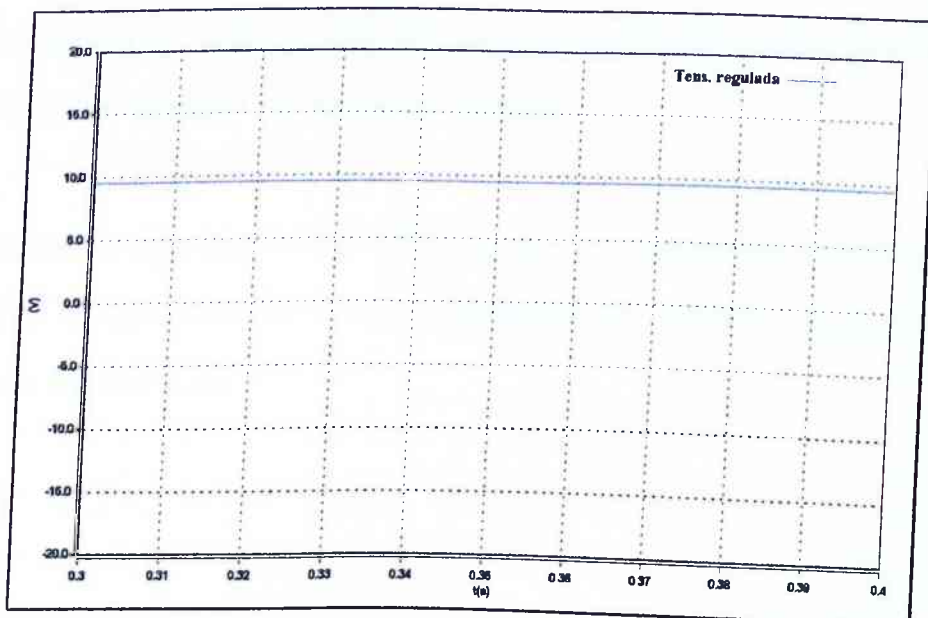


Figura 3.54 – Tensão na Saída Regulada Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% - Computacional

e) Tensão na saída não regulada

Por outro lado, a tensão na saída não regulada mostrou-se sensível aos harmônicos de tensão injetados na entrada, conforme pode ser observado na figura 3.55.

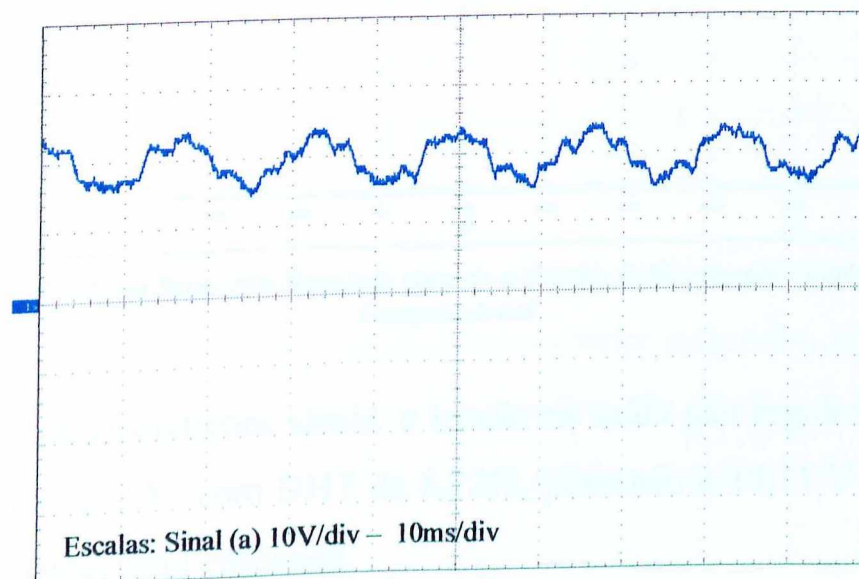


Figura 3.55 – Tensão na Saída Não Regulada Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% - Experimental

A tensão na saída não regulada possuía um valor RMS de 18,8 V para o caso ideal, passando a 19,4 V para o caso aqui focado. Além disso, seu DHT, que era de 8%, passou a 20,6%. Contudo, mesmo mediante a estas ocorrências, nada foi perceptível ao usuário do aparelho de som.

A tensão na saída não regulada obtida computacionalmente também mostrou-se sensível aos harmônicos de tensão injetados na entrada, conforme pode ser observado na figura 3.56.

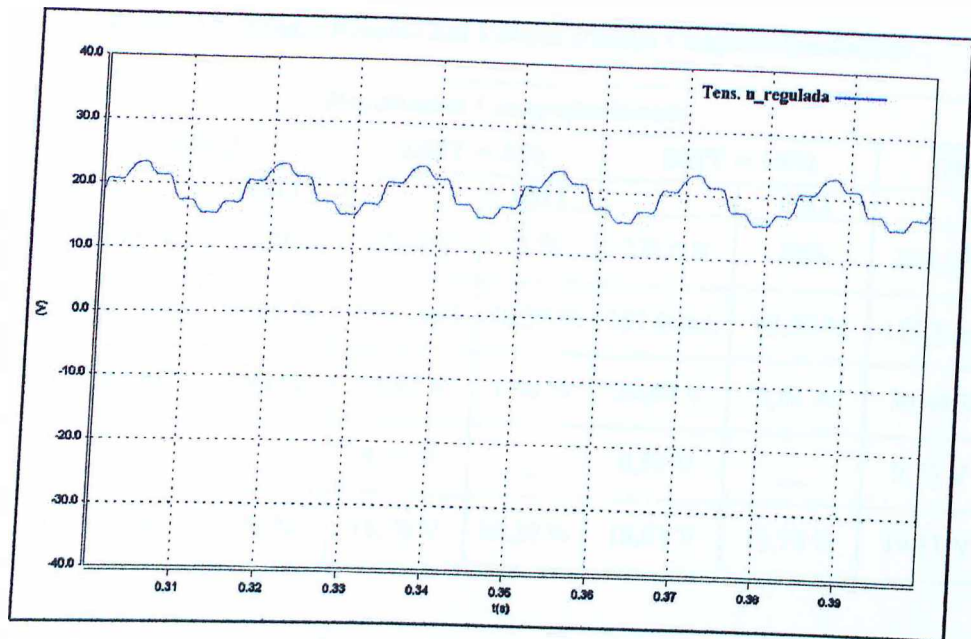


Figura 3.56 – Tensão na Saída Não Regulada Quando a Tensão de Suprimento Contém DHT=20% - Computacional

Na simulação para condições ideais, a tensão na saída não regulada possuía um valor RMS de 18,27 V, com DHT de 8,72%, passando a 19,11 V com DHT de 22,58% para o caso aqui focado.

A título de ilustração, as tabelas 3 e 4 mostram um resumo do desempenho das diversas grandezas anteriormente destacadas, no que tange aos valores obtidos experimental e computacionalmente, para diferentes níveis de distorções da tensão de alimentação do aparelho de som.

Tabela 3 – Quadro Resumo dos Valores Obtidos Experimentalmente

Resultados Experimentais								
	Ideal		DHT = 5%		DHT = 10%		DHT = 20%	
		DHT		DHT		DHT		DHT
Tensão de alimentação	219,0 V	0,53 %	220,0 V	4,91 %	220,0 V	9,9 %	219,0 V	19,85 %
Corrente na entrada	152,0 mA	72,0 %	149,0 mA	70,38 %	149,0 mA	68,59 %	151,0 mA	70,5 %
Tensão no elo CC	27,2 V	1,92 %	27,7 V	1,87 %	28,1 V	1,83 %	28,7 V	1,73 %
Tensão regulada	9,97 V	—	9,94 V	—	9,93 V	—	9,94 V	—
Tensão não regulada	18,8 V	8,0 %	19,2 V	9,45 %	19,3 V	13,0 %	19,4 V	20,6 %

Tabela 4 – Quadro Resumo dos Valores Obtidos Computacionalmente

Resultados Computacionais								
	Ideal		DHT = 5%		DHT = 10%		DHT = 20%	
		DHT		DHT		DHT		DHT
Tensão de alimentação	219,9 V	0,0	220,2 V	5 %	221,0 V	10%	224,3 V	20 %
Corrente na entrada	154,3 mA	99,69 %	152,3 mA	96,39 %	151,6 mA	93,92 %	155,3 mA	96,2 %
Tensão no elo cc	28,5 V	1,98 %	28,97 V	1,96 %	29,47 V	1,91 %	30,48 V	1,82 %
Tensão regulada	9,57 V	—	9,57 V	—	9,57 V	—	9,57 V	—
Tensão não regulada	18,27 V	8,72 %	18,76 V	10,29 %	18,81 V	13,78 %	19,11 V	22,58 %

Como pode ser visto nas tabelas, todos os valores obtidos, tanto computacional quanto experimentalmente apresentaram-se bastante parecidos, principalmente no padrão comportamental, o que permite concluir que, conhecendo-se todos os parâmetros do circuito real, é possível a realização de simulações confiáveis.

3.4.6. CASO 6 - SUPRIMENTO COM OSCILAÇÕES DE TENSÃO

Uma outra análise interessante e contemplada por este trabalho diz respeito à resposta do aparelho de som ante à alimentação contendo flutuações de tensão. Para averiguar esta condição de operação, o equipamento foi submetido a índices de oscilação de 1% , 5% e 10%, todos associados a uma frequência de 10 Hz. Motivado pela redução do volume de resultados, somente aqueles relativos ao maior nível de oscilação serão apresentados e discutidos.

a) Tensão e corrente CA de alimentação

As figuras 3.57 e 3.58 mostram, para os casos experimental e computacional, respectivamente, as formas de onda da (a) tensão de alimentação contendo

oscilação de tensão da ordem de 10% e da (b) corrente na entrada do equipamento.

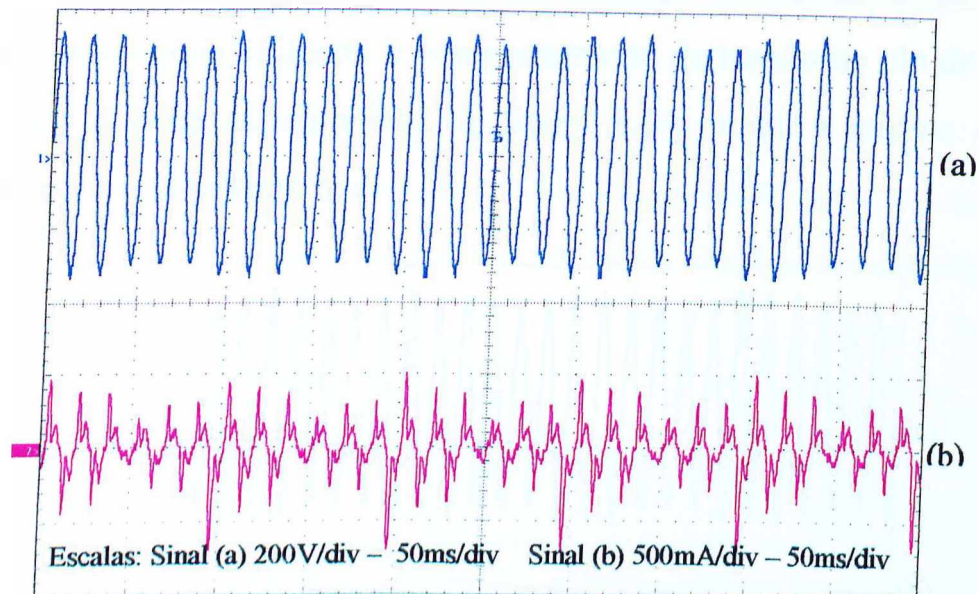


Figura 3.57 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente Medida na Entrada da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Experimental

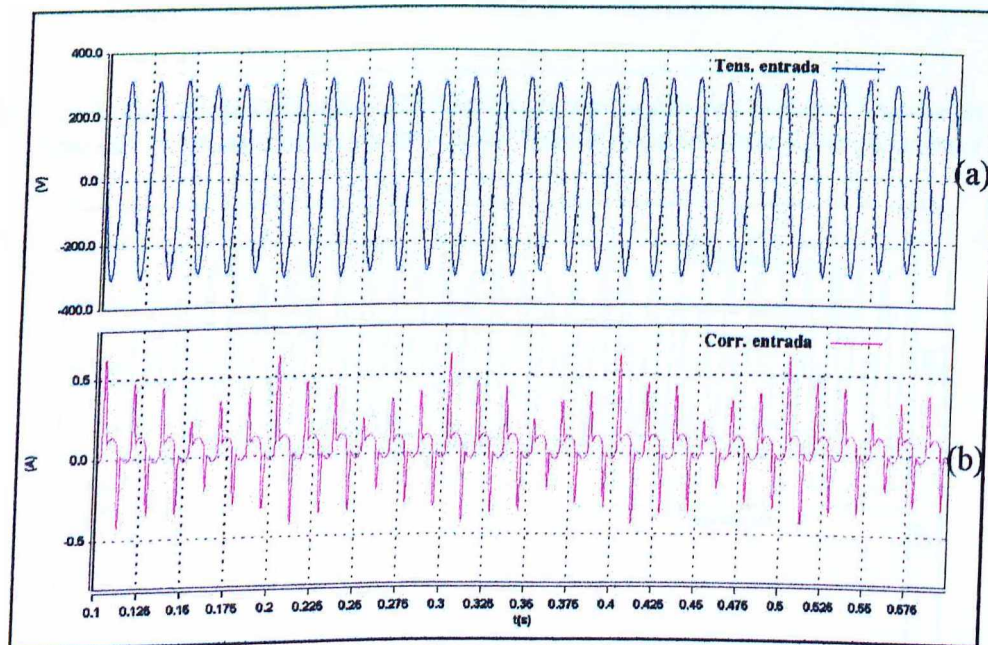


Figura 3.58 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente Medida na Entrada da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Computacional

As figuras permitem verificar, em ambas as análises, que a corrente somente reflete as conseqüências da distorção contidas na rede, como seria esperado.

b) Tensão CA de alimentação e tensão no elo de corrente contínua

Na figura 3.59 é apresentada, mais uma vez, a tensão de entrada, destacada pela letra (a), enquanto que (b) ilustra o comportamento da tensão no elo de corrente contínua, para o caso experimental. A figura 3.60 retrata a mesma situação, porém, para o caso computacional.

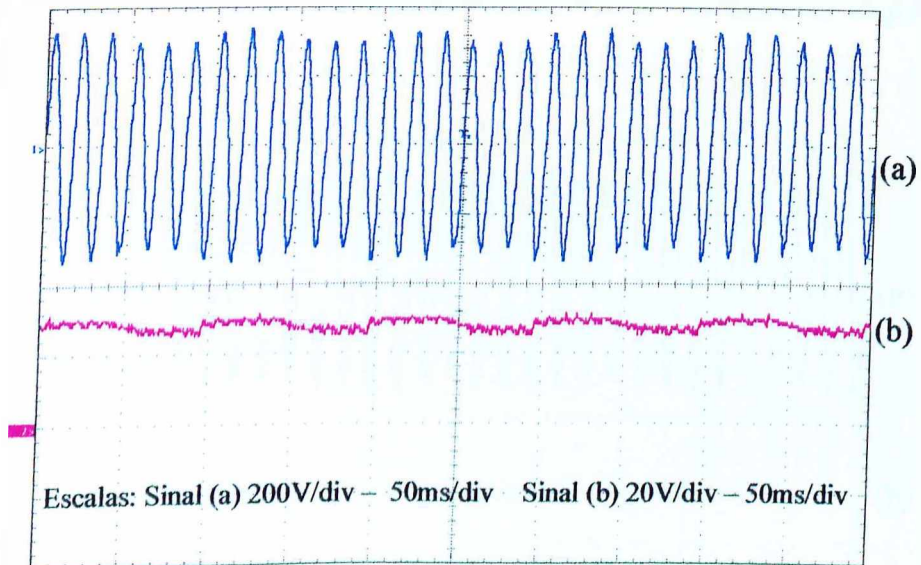


Figura 3.59 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Medida na Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Computacional

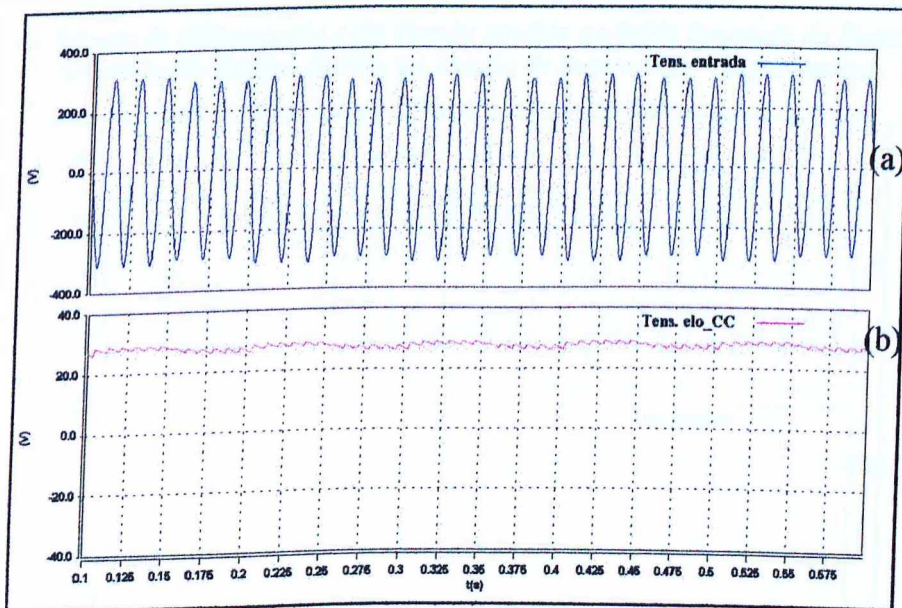


Figura 3.60 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Medida na Elo de Corrente Contínua da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Computacional

Com base nas figuras, verifica-se que a tensão no elo de corrente contínua sofre influência similar àquela encontrada na tensão de entrada.

c) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 10 V

O comportamento da tensão na saída regulada é mostrado em (b) nas figuras 3.61 e 3.62. Estas expressam, respectivamente, os resultados experimental e computacional.

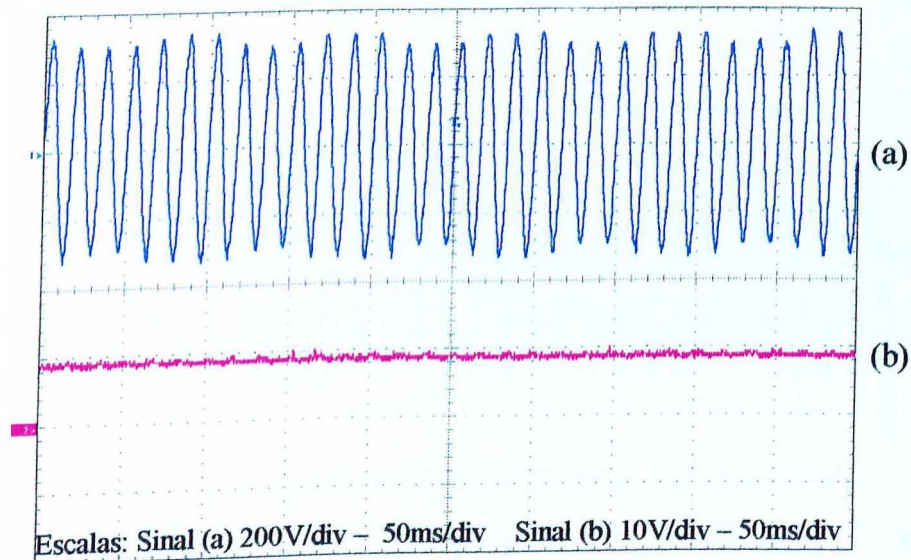


Figura 3.61 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Medida na Saída Regulada da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Experimental

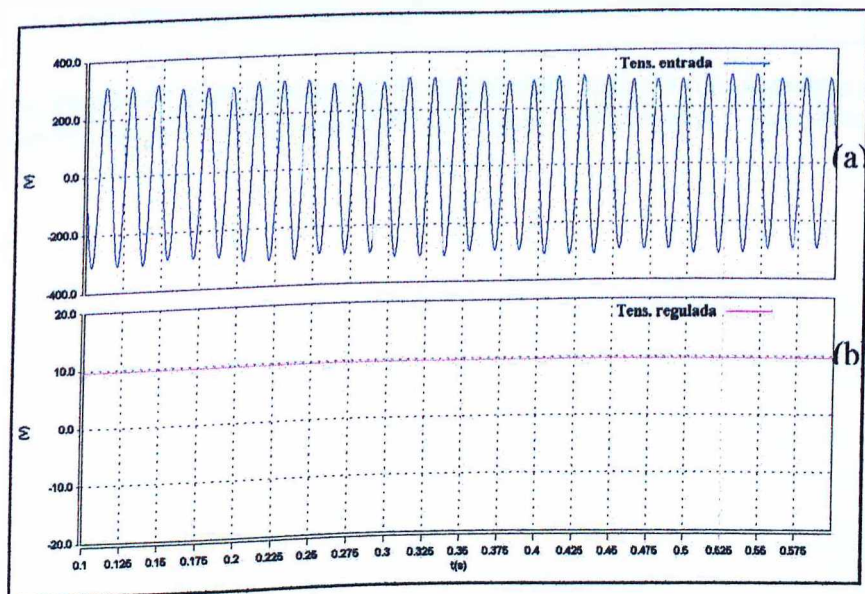


Figura 3.62 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Medida na Saída Regulada da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Computacional

Embora seja notória a oscilação no sinal de alimentação, esta não se manifesta na saída regulada da fonte linear. Isto se deve ao fato do valor da variação estar dentro da faixa de controle exercida pelo circuito de regulação.

d) Tensão CA de alimentação e tensão na saída não regulada

A tensão na saída não regulada também foi monitorada. Seu comportamento, tanto experimental como computacional, está ilustrado nas figuras 3.63 e 3.64, que também contém a forma de onda da tensão de entrada.

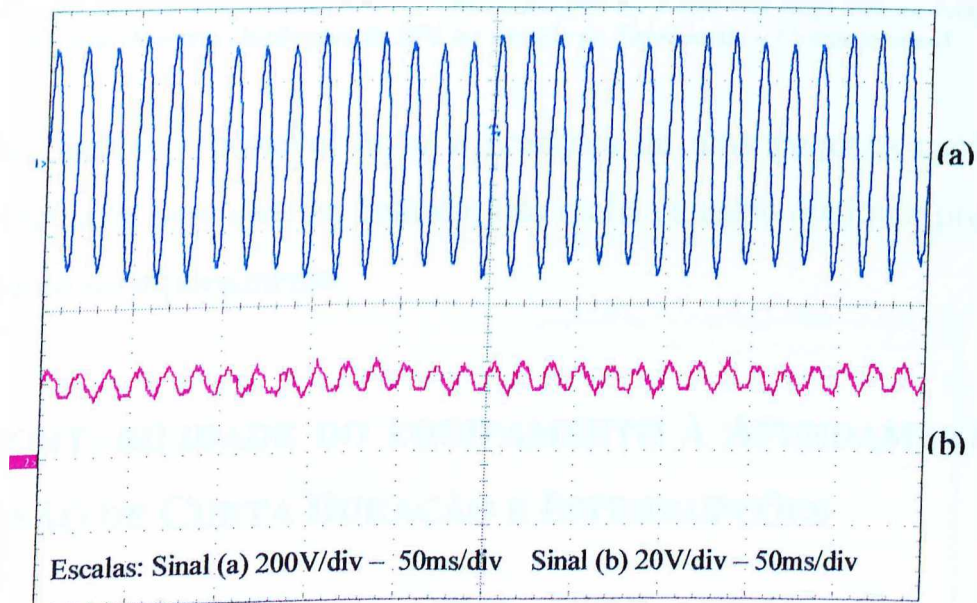


Figura 3.63 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Medida na Saída Não Regulada da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Experimental

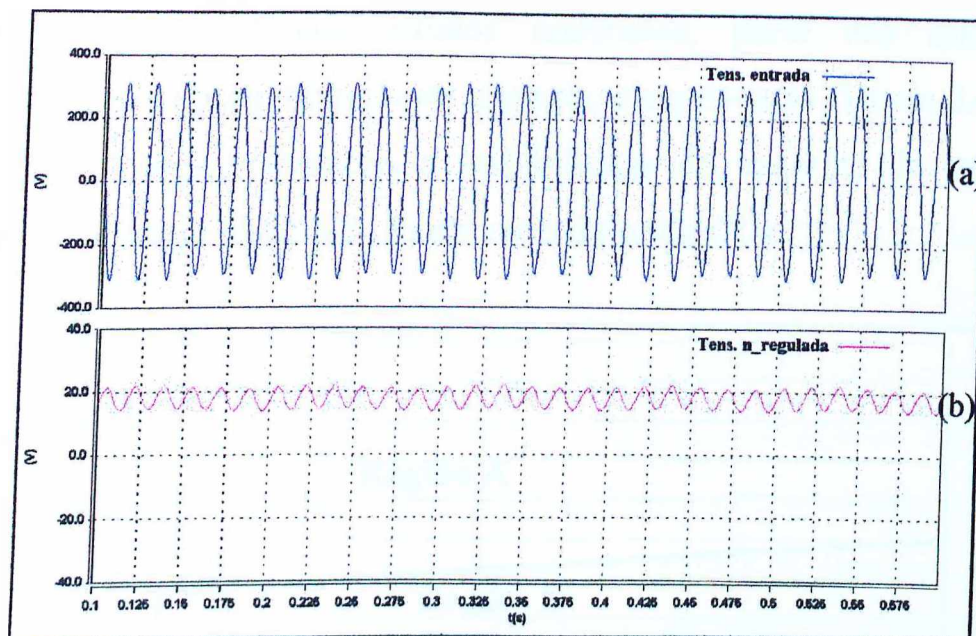


Figura 3.64 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Medida na Saída Não Regulada da Fonte Linear Quando Ocorrem Oscilações de 10% na Tensão de Suprimento – Computacional

Através das figuras é possível notar a presença de uma pequena oscilação na saída não regulada, sem que, no entanto, isto tenha causado qualquer prejuízo no funcionamento do equipamento.

3.5. SUPORTABILIDADE DO EQUIPAMENTO À AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E INTERRUPÇÕES

De acordo com os resultados obtidos, os itens de qualidade relacionados com harmônicos, oscilações e elevações de tensão de curta duração mostraram-se de pouca influência na operação da fonte linear e, conseqüentemente, não implicaram em qualquer anomalia à operação normal do aparelho de som. Por este motivo, estes distúrbios, dentro dos níveis empregados para os estudos, foram considerados secundários e não foram incluídos no escopo das curvas de sensibilidade elaboradas.

Finalmente, com base nos estudos realizados, parte dos quais foram apresentados ao longo do texto deste capítulo, chegou-se às figuras 3.65 e 3.66, que expressam, respectivamente, a sensibilidade do aparelho de som para o funcionando no modo rádio e no modo reproduzidor de CDs.

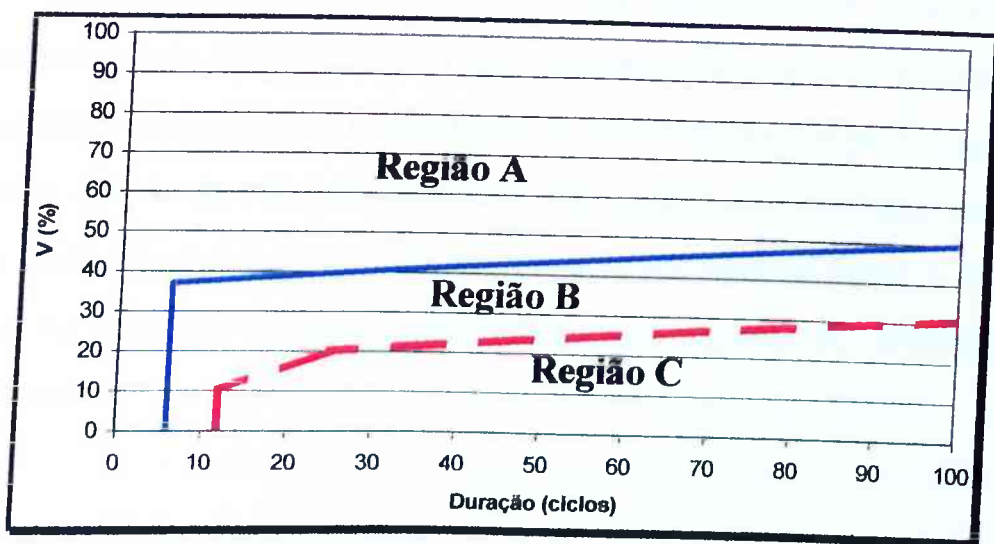


Figura 3.65 - Sensibilidade da Saída Regulada da Fonte Linear Para Afundamentos de Tensão e Interrupções no Fornecimento de Energia – Equipamento Funcionando Como Rádio

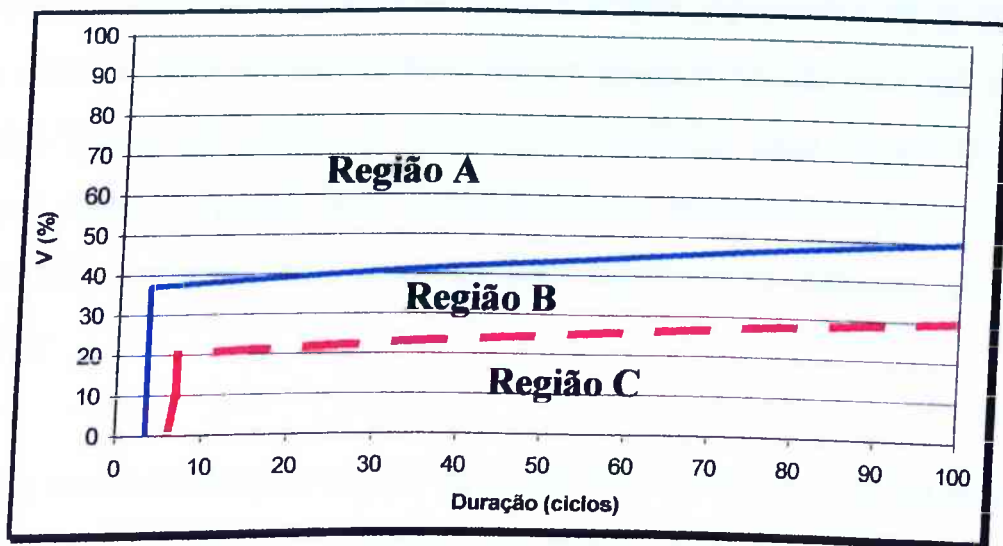


Figura 3.66 - Sensibilidade da Saída Regulada da Fonte Linear para Afundamentos de Tensão e Interrupções no Fornecimento de Energia – Equipamento Funcionando Como Reprodutor de CDs

Em ambas as figuras, a região “A” está associada ao funcionamento normal do dispositivo, mesmo para valores de tensão abaixo da nominal. A área “B” define a má operação do equipamento, com o surgimento de ruídos audíveis emitidos

pelo aparelho de som. A delimitação definida por “C” está relacionada com o desligamento completo do equipamento.

Comparando-se os dois gráficos, pode-se verificar uma diminuição no tempo de suportabilidade do aparelho de som no modo reprodutor de *CDs*. Como visto anteriormente, este fato se deve a um aumento da corrente consumida pelo equipamento e, conseqüente, diminuição no tempo de descarga do capacitor que se encontra no elo de corrente contínua. Isto indica que qualquer mudança no modo de operação que implique em aumento da corrente de carga, a exemplo de variações no volume de som, pode alterar as regiões de sensibilidade do equipamento.

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo abordou, inicialmente, os aspectos associados às características gerais e circuito equivalente da fonte linear do aparelho de som sob estudo. Na seqüência, foram discutidas as estratégias adotadas para atingir os objetivos propostos, dando ênfase aos procedimentos necessários para os estudos experimentais e computacionais. As investigações conduziram às seguintes conclusões:

- No que concerne à operação do aparelho de som sob condições de distorção harmônica e também oscilações de tensão, não foi verificada nenhuma influência significativa, desmotivando, deste modo, o levantamento de curvas de sensibilidade para estas situações;
 - Elevações temporárias de tensão de até 20% com duração de 100 ciclos não danificaram a fonte linear e nem o aparelho de som em estudo. É importante
-

frisar que não foram impostas ao equipamento elevações de tensão superiores a estes patamares;

- Fazendo-se uma comparação dos resultados deste trabalho com a curva ITIC, no tocante a elevações de tensão de curta duração, verifica-se haver inconsistência entre seus índices de sensibilidade. Nas investigações aqui realizadas o aparelho de som não foi danificado quando submetido a elevações de tensão de 20% com duração de 100 ciclos, o que se contrapõe à curva ITIC, uma vez que nesta, equipamentos eletrônicos suportam 20% de elevação de tensão por apenas 30 ciclos. Considerando-se estes aspectos, é extremamente válido salientar que, muito embora a aplicação da curva ITIC não seja especificamente para aparelhos de som, ela tem sido usada indistintamente como referência.
- Quanto ao funcionamento do aparelho de som sob afundamentos de tensão e interrupções, com objetivos voltados a observar o comportamento da saída regulada da fonte linear, foram levantadas curvas de sensibilidade para dois modos distintos de operação, ficando claro que, um acréscimo no consumo de potência aumenta a sensibilidade do equipamento;
- O aparelho de som operando no modo reprodutor de *CDs*, onde sua sensibilidade é maior, possui tolerância para interrupções em torno de 3,5 ciclos. Contudo, na curva ITIC é observada uma tolerância para interrupção de aproximadamente 1 ciclo, caracterizando, mais uma vez, divergências;
- Analisando o funcionamento do aparelho de som no que diz respeito à saída não regulada da fonte linear, pode-se dizer que, a partir de aproximadamente 20% de afundamento de tensão com duração de 3 ciclos foi possível notar

que o mesmo teve seu funcionamento afetado, ocorrendo alteração no brilho do seu *display*. Deve-se ressaltar que os limites aqui mencionados certamente possuem alguma imprecisão, uma vez que as alterações foram observadas visualmente;

- Os resultados experimentais mostraram-se bastante semelhantes aos computacionais, validando o modelo implementado. Disto desprende ser possível analisar o desempenho de fontes lineares a partir de estudos computacionais, resguardada a necessidade da posse de informações precisas com relação aos parâmetros de seus respectivos circuitos equivalentes.

CAPÍTULO IV

DESEMPENHO DE FONTES CHAVEADAS NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA – UMA APLICAÇÃO TÍPICA: MICROCOMPUTADOR

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o avanço da tecnologia de integração em larga escala, fatores como tamanho, peso, aquecimento, etc., tornam-se cada vez mais determinantes nos projetos e fabricação de equipamentos eletrônicos. Após várias investigações concluiu-se que as fontes lineares representavam a maior porção do volume total de tais dispositivos, uma vez que as mesmas eram providas de grandes transformadores, dissipadores e ventiladores. Assim, a fim de contornar estes problemas, surgiram na década de 60 as primeiras fontes chaveadas, as quais foram destinadas, primeiramente, aos programas espaciais e, em seguida, a outras aplicações, tais como: computadores, equipamentos de telecomunicações, televisores, etc. [21]. Este tipo de fonte, também composta por unidades retificadoras, dispositivos de chaveamento, transformadores de acoplamento e circuitos de controle, fornece tensões contínuas reguladas na sua saída. Deve-se ressaltar que o referido transformador de acoplamento empregado nas fontes chaveadas opera em alta frequência, fato este responsável pelo tamanho reduzido deste dispositivo.

Diante desse cenário, torna-se também de suma importância analisar o desempenho destas unidades sob o enfoque da Qualidade da Energia Elétrica, visto que o seu emprego encontra-se cada vez mais difundido.

Com tais objetivos em mente, procedeu-se a uma estratégia de estudos similar àquela utilizada no capítulo III, ou seja, realização de ensaios experimentais e simulações computacionais, substituindo-se o aparelho de som por um computador pessoal. Assim, em vista da semelhança dos procedimentos, considera-se desnecessário maiores considerações de caráter mais geral e, na seqüência, são apresentadas e discutidas as principais etapas executadas, os resultados atingidos e as constatações mais relevantes.

4.2. CARACTERÍSTICAS E CIRCUITO EQUIVALENTE DO EQUIPAMENTO ANALISADO

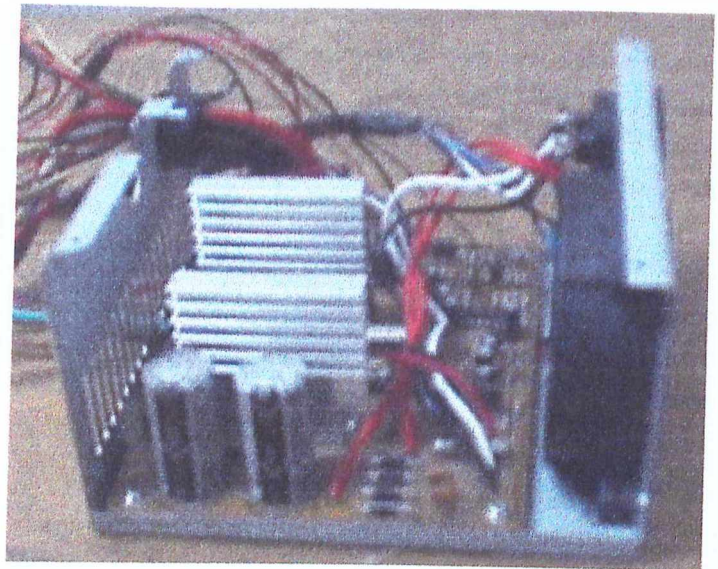
O equipamento submetido às diversas condições de anormalidades de suprimento foi um computador pessoal, cujas principais características estão descritas a seguir:

- Tensão de alimentação – 110/220 V
- Processador Pentium MMX de 200 MHz
- Potência RMS da fonte chaveada – 300 W

Novamente, o foco principal desta pesquisa está direcionado à verificação do comportamento das tensões de saída da fonte chaveada sob o impacto dos problemas de qualidade já mencionados. Para maior clareza e posicionamento físico dos pontos elétricos a serem observados, a figura 4.1 mostra em (a) e (b) os aspectos construtivos de uma fonte do tipo aqui considerada.



(a) – vista externa



(b) – vista interna

Figura 4.1. – Fonte Chaveada

Como é tradicionalmente conhecido, as fontes chaveadas fornecem vários níveis de tensão de saída, a exemplo de +12 V, -12 V, etc.. Contudo, a de 5 V foi o ponto focal selecionado para análise. A razão de tal opção está no fato desta prover a maior parcela de potência consumida pelo computador.

Para a execução dos ensaios experimentais e computacionais, tornou-se necessário a identificação do tipo de configuração do conversor da fonte chaveada em questão, bem como de suas saídas de tensão, uma vez que não se dispunha, à priori, de maiores detalhes acerca de seu esquema elétrico real. Assim procedendo obteve-se o diagrama de blocos funcional da fonte mostrado na figura 4.2.

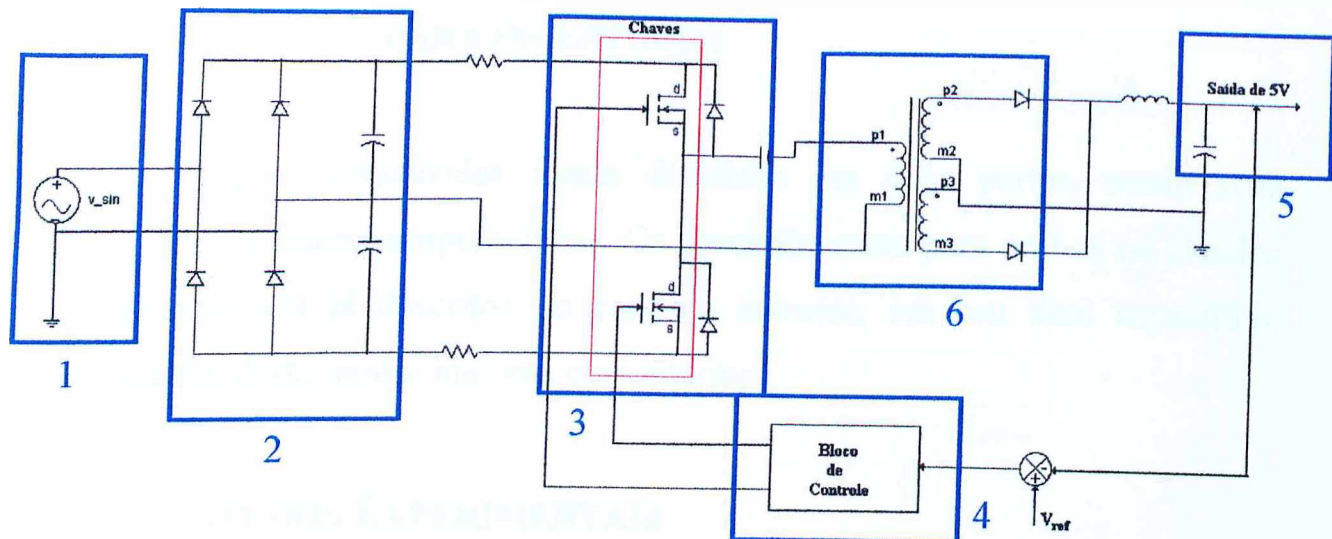


Figura 4.2 – Diagrama de Blocos Funcional da Fonte Chaveada

O arranjo da figura 4.2 corresponde a uma simplificação do circuito real, mostrando-se apenas a saída de tensão de 5 V. As demais saídas de tensão, a exemplo das saídas de 12 V, 4 V, etc., foram omitidas.

Na figura, o bloco 1 representa a rede de alimentação. O bloco 2 compreende a retificação (dobrador de tensão) e filtragem da tensão CA de entrada. No bloco 3 estão contidas as chaves que recortam a tensão CC em uma onda quadrada de alta frequência. O bloco 4 é destinado a controlar o tempo de condução das chaves, de modo a compensar uma eventual alteração na tensão de alimentação, agindo no sentido de fazer com que a tensão na saída, representada pelo bloco 5, se mantenha constante. No bloco 6 encontra-se o transformador e o retificador da tensão de saída da fonte chaveada. Vale ressaltar que, dos blocos descritos, apenas o quarto mereceu modelamento específico.

Além da tensão na saída de 5 V, as análises feitas na seqüência mostram também o comportamento da tensão CA de alimentação, tensão no elo de corrente contínua, e ainda, da corrente medida na entrada da fonte chaveada do computador.

4.3. ESTRATÉGIA PARA OS ESTUDOS

As investigações conduzidas foram divididas em duas partes, sendo uma experimental e outra computacional. Os procedimentos para ambos os estudos são similares aos já descritos no capítulo anterior, em seu item específico, dispensando, deste modo, maiores comentários.

4.3.1. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Os testes foram conduzidos mantendo-se o computador em análise operando no ambiente *windows*, sem a utilização de qualquer outro programa. Além disso, optou-se por estudar o funcionamento do equipamento sob alimentação de 115 V. Vale ressaltar que os estudos poderiam ser também realizados com suprimento em 220 V.

Todos os aparatos empregados nos ensaios de laboratório, como fonte de suprimento, instrumentos de medição, etc., são os mesmos já apresentados no capítulo anterior, requerendo, neste momento, apenas a discussão da montagem experimental implementada, conforme ilustra a figura 4.3.

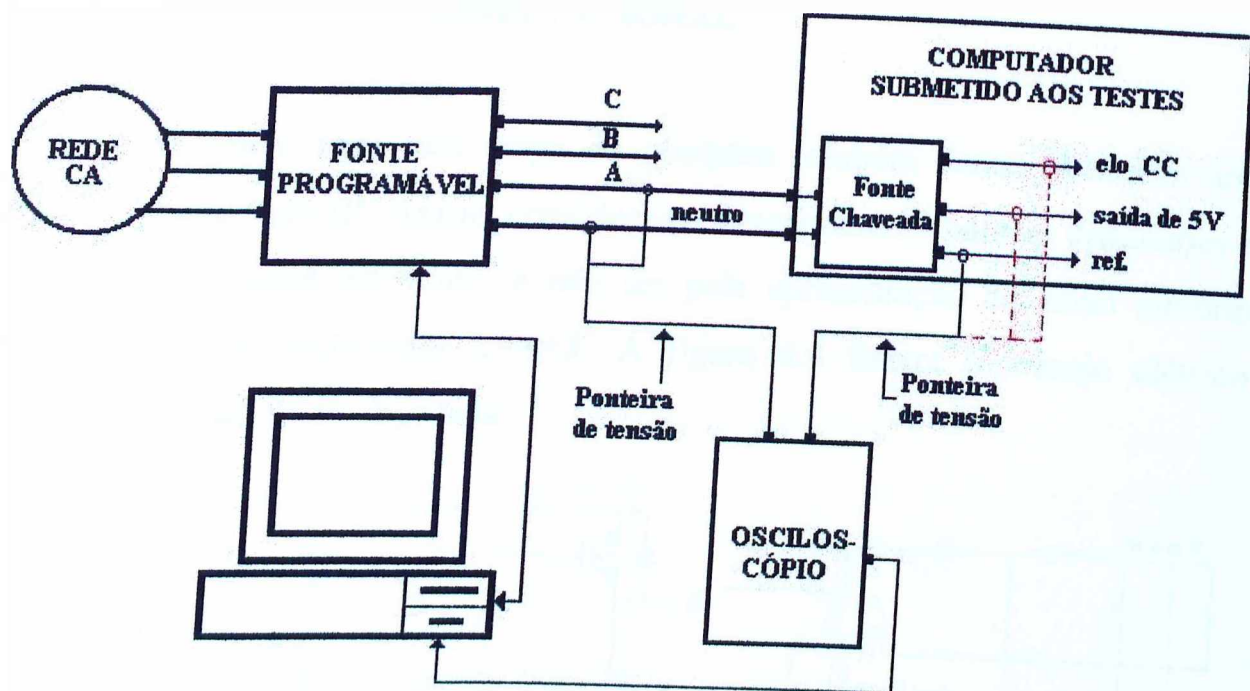


Figura 4.3 – Esquema de Conexão Para Realização dos Experimentos

O arranjo experimental ilustrado compõe-se, fundamentalmente, das seguintes unidades:

- A fonte programável, já discutida anteriormente, alimenta o computador sob teste e provê um sinal de tensão com padrão pré-requerido e obtido via programação;
- O osciloscópio, destinado a aquisição dos dados, é o mesmo empregado no capítulo III;
- Finalmente, na parte superior, à direita da figura, está ilustrada a fonte chaveada sob estudo.

Esta configuração é praticamente a mesma vista no capítulo anterior, diferindo apenas pela substituição do aparelho de som pelo computador.

4.3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os procedimentos para esta etapa da pesquisa também foram idênticos aos expostos no capítulo III. Assim, considera-se desnecessário maiores discussões e detalhamentos neste momento, a não ser pela apresentação do novo circuito implementado no simulador *SABER*. A figura 4.4 ilustra o arranjo elétrico representativo da fonte chaveada.

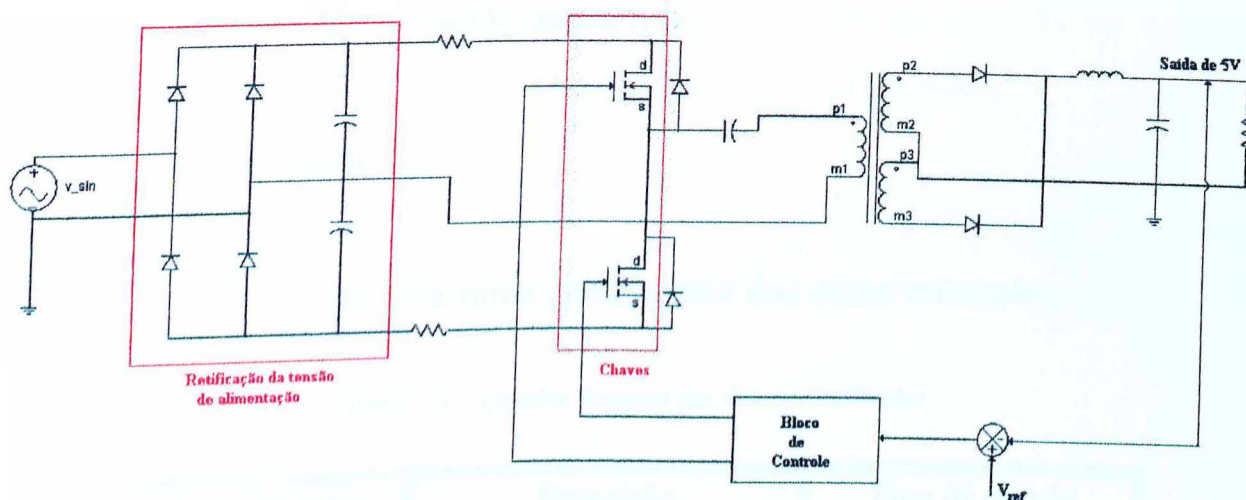


Figura 4.4 – Esquema Elétrico da Fonte Chaveada Utilizado nas Simulações Computacionais

Por se desconhecer os detalhes dos componentes supridos pelo alimentador de 5 V vale ressaltar que a este conectou-se tão apenas um resistor representativo do consumo elétrico correspondente. Medidas simplificadoras como estas resultam, sem dúvida, em perda de precisão dos resultados a serem extraídos.

Os comentários gerais a respeito dos casos estudados e seus respectivos resultados práticos e computacionais são fornecidos na seqüência, sendo realizados todos os comparativos necessários para a validação dos processos, assim como dos impactos causados pela perda da qualidade do suprimento.

4.4. CASOS ESTUDADOS

As análises consistiram em submeter o computador aos itens de perda de qualidade descritos a seguir:

- Afundamentos de tensão de curta duração (*voltage sag*);
- Elevações de tensão de curta duração (*voltage swell*);
- Interrupções no fornecimento de energia;
- Harmônicos;
- Flutuações de tensão.

A tabela 4.1 fornece um panorama geral acerca dos casos estudados.

Tabela 4.1 – Quadro Resumo dos Casos Analisados

Identificação	Descrição	Tipo de estudo
Caso 1	Condição ideal de suprimento	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 2	Elevação de tensão de curta duração (<i>voltage swell</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 3	Afundamento de tensão de curta duração (<i>voltage sag</i>)	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 4	Interrupção no fornecimento de energia	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 5	Suprimento contendo distorção harmônica	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional
Caso 6	Oscilação de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Experimental • Computacional

Os resultados computacionais e experimentais obtidos são considerados na seqüência. Ainda, no anexo B estão contidas tabelas orientativas a respeito da disposição geral das formas de onda extraídas em cada caso investigado.

4.4.1. CASO 1 - CONDIÇÃO IDEAL DE SUPRIMENTO

Para as análises em questão, o computador foi submetido a uma tensão de 115 V, perfeitamente senoidal e sem qualquer tipo de distúrbio. Nestas condições, foram individualmente monitoradas: a tensão CA de alimentação do equipamento, a tensão no elo de corrente contínua da fonte chaveada e a tensão na saída de 5 V, sendo esta última, o foco principal deste trabalho. Além das referidas tensões, foi registrada também a corrente na entrada da CPU do computador. A figura 4.3 mostra a montagem física empregada.

As mesmas condições de operação às quais o computador foi submetido experimentalmente foram também reproduzidas computacionalmente, conforme a seguir.

a) Tensão CA de alimentação

A figura 4.5 ilustra a forma de onda da tensão experimental aplicada ao computador. Apesar da programação da fonte ter sido feita para 115 V, o valor RMS medido foi de 114 V. A diferença verificada pode ser justificada por imprecisão nas medições ou mesmo oscilações da fonte utilizada.

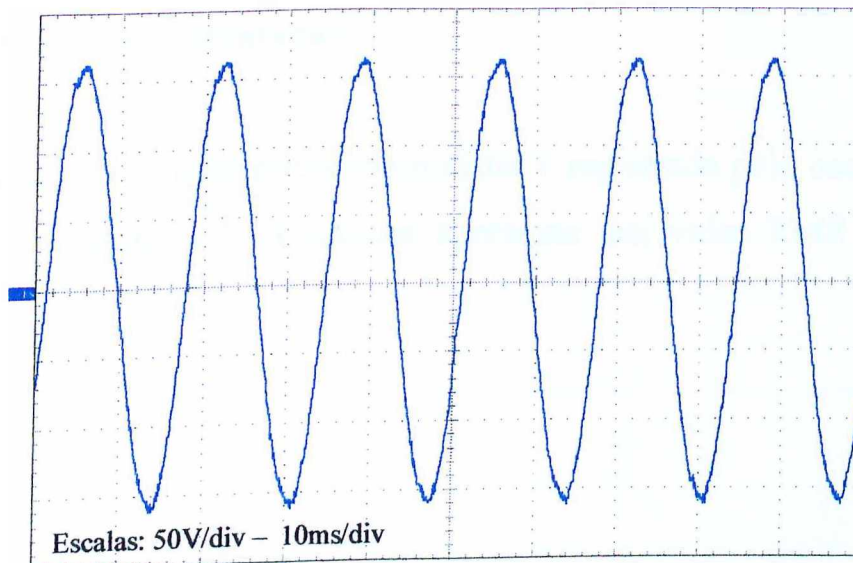


Figura 4.5 – Tensão CA de Alimentação – Experimental

Também, apesar da imposição de uma tensão perfeitamente senoidal, o espectro da forma de onda apresentou um DHT de 1,2%, que pode ser atribuído à fonte de suprimento, a qual, não consegue fornecer um sinal totalmente livre de distorções.

A forma de onda da tensão que alimenta a CPU para o caso simulado é mostrada na figura 4.6, cujo valor é de $V_{RMS}=114,5$ V, foi bem próximo do aplicado experimentalmente. A tensão aplicada ao aparelho analisado é perfeitamente senoidal.

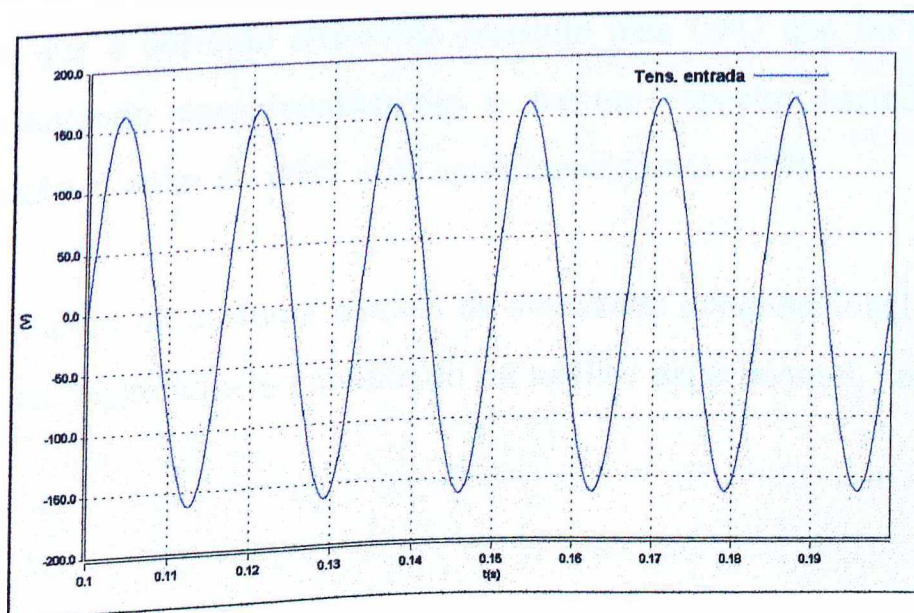


Figura 4.6 – Tensão CA de Alimentação – Computacional

b) Corrente CA de alimentação

A corrente consumida pelo microcomputador e registrada pelo osciloscópio está apresentada na figura 4.7. A mesma apresenta um valor RMS da ordem de 586 mA.

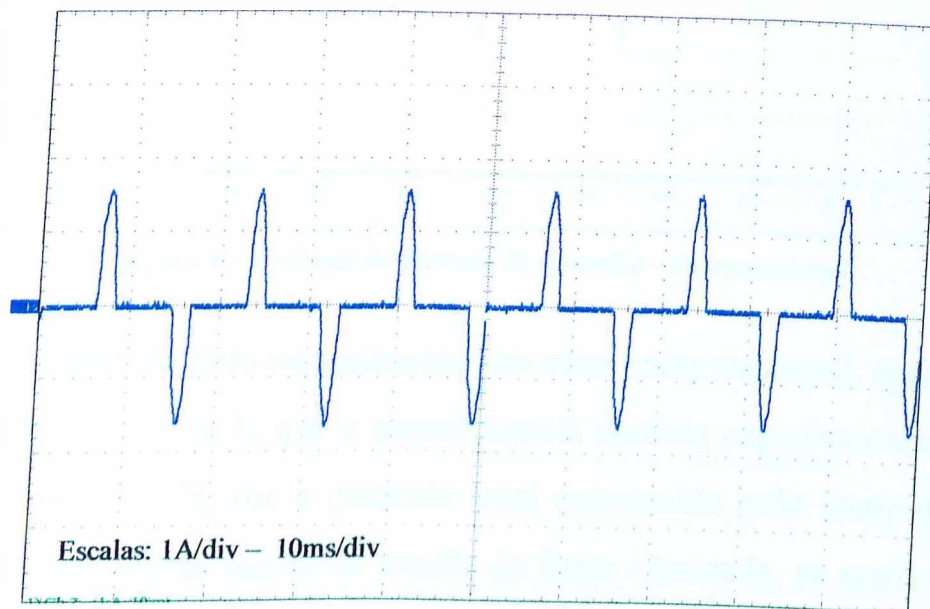


Figura 4.7 – Corrente na Entrada do Aparelho – Experimental

Como pode ser observado, a corrente apresenta-se muito distorcida, e sua forma de onda contém um DHT da ordem de 117,8%. Embora não esteja mostrada nesta seção, a corrente absorvida pela CPU juntamente com o monitor é cerca de 54% maior que a corrente absorvida somente pela CPU que foi de 586 mA, contudo, mantendo aproximadamente o mesmo espectro harmônico. Nesta última situação, o valor do DHT é de aproximadamente 120%.

O comportamento da corrente através da simulação computacional apresentou-se muito semelhante àquele encontrado na análise experimental, como ilustra a figura 4.8.

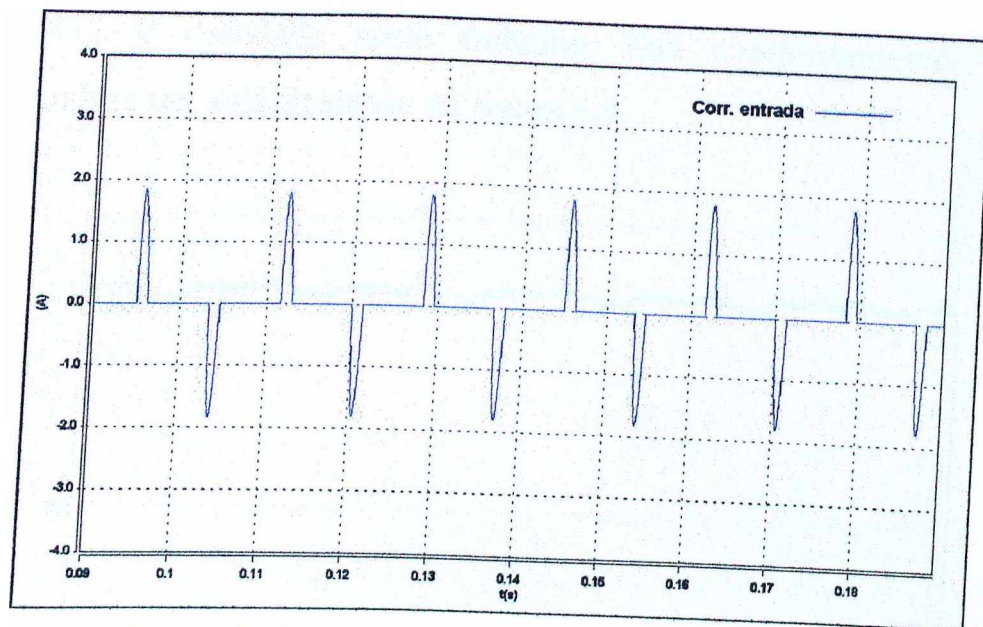


Figura 4.8 – Corrente na Entrada do Aparelho – Computacional

A corrente consumida pelo equipamento, no caso computacional, apresentou um valor eficaz de 517,13 mA, que é menor àquela medida experimentalmente. Isto se justifica pelo fato de que a corrente total consumida pelo computador deve também incluir as outras saídas de tensão da fonte chaveada, as quais não foram contempladas quando da modelagem computacional.

Embora o formato da corrente na entrada seja bastante semelhante ao da corrente medida experimentalmente, sua distorção harmônica total foi bastante superior, sendo da ordem de 169,5%. Como justificativa para tal, acredita-se que a discrepância esteja relacionada com o desconhecimento dos parâmetros reais do circuito elétrico da fonte chaveada, sendo então feitas aproximações no sistema simulado.

c) Tensão no elo de corrente contínua

Outra grandeza monitorada foi a tensão no elo de corrente contínua da fonte chaveada, uma vez que à partir desta, e por intermédio de chaves, obtém-se a

tensão de 5 V estudada neste trabalho. Seu comportamento, observado experimentalmente, está ilustrado na figura 4.9.

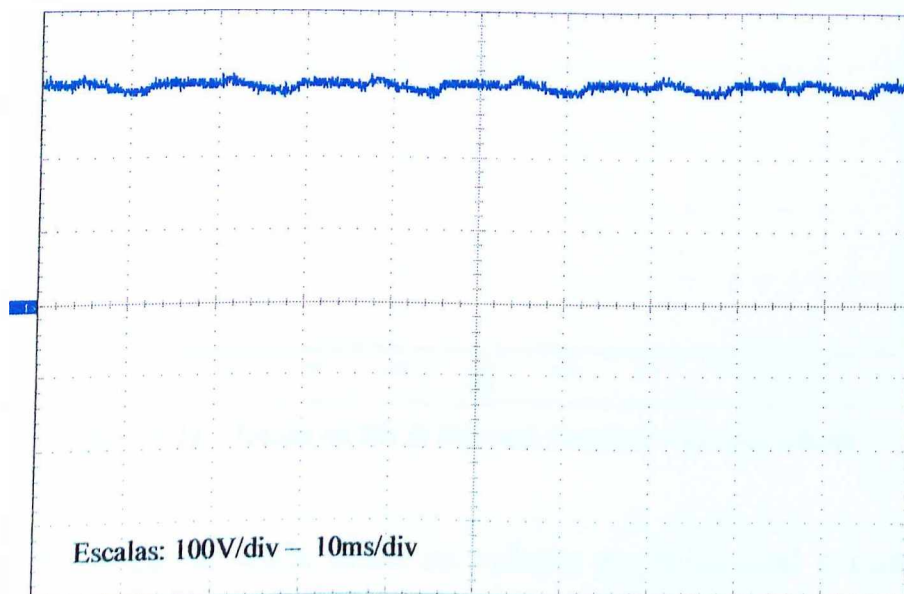


Figura 4.9 – Tensão no Elo de Corrente Contínua – Experimental

Através da figura, verifica-se que o valor da tensão no elo de corrente contínua é de aproximadamente 297 V, com uma distorção harmônica total (DHT) de 1,04%.

A figura 4.10 mostra a tensão no elo de corrente contínua para o caso computacional. Seu valor é de 311,5 V, portanto, um pouco acima do verificado experimentalmente.

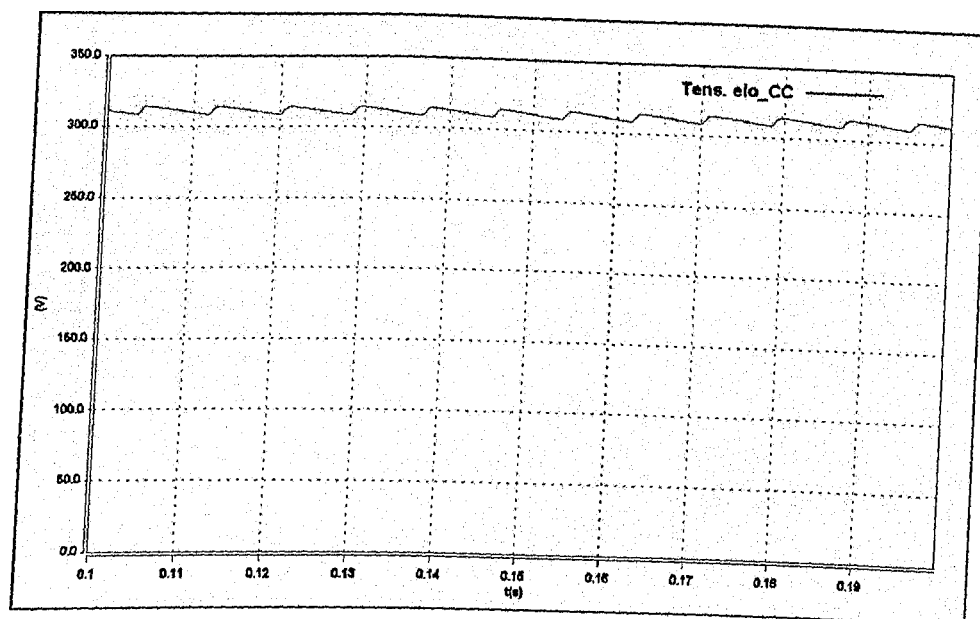


Figura 4.10 – Tensão no Elo de Corrente Contínua – Computacional

A diferença de cerca de 4,8% entre os valores experimental e computacional, pode ser associada a alguma imprecisão do equipamento de medição, ou outro motivo não explorado. Além desta diferença, a tensão no elo de corrente contínua apresentou um DHT=0,8%, sendo este valor um pouco inferior ao do caso experimental que foi de 1,04%.

d) Tensão na saída de 5 V

A figura 4.11 mostra a tensão na saída de 5 V da fonte chaveada obtida via montagem experimental. Seu valor é de 4,8 V.

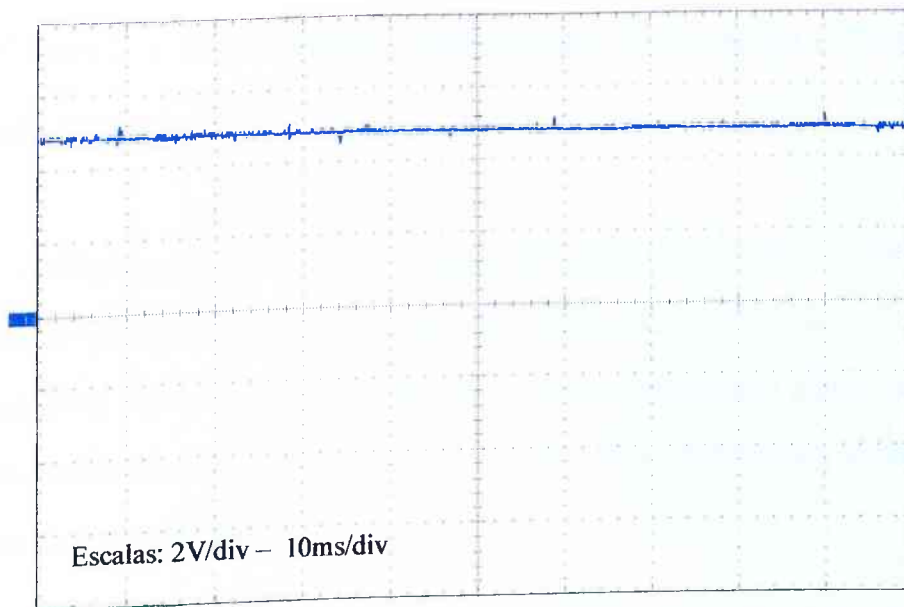


Figura 4.11 – Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada – Experimental

É importante destacar que a tensão ilustrada na figura 4.11 caracteriza a grandeza fundamental enfocada nesta parte da pesquisa, uma vez que é o seu comportamento que definirá a suportabilidade do equipamento aos distúrbios de tensão.

A figura 4.12 ilustra a forma de onda da tensão na saída regulada, obtida computacionalmente. O seu valor é de 4,85 V, portanto, muito próximo ao caso experimental.

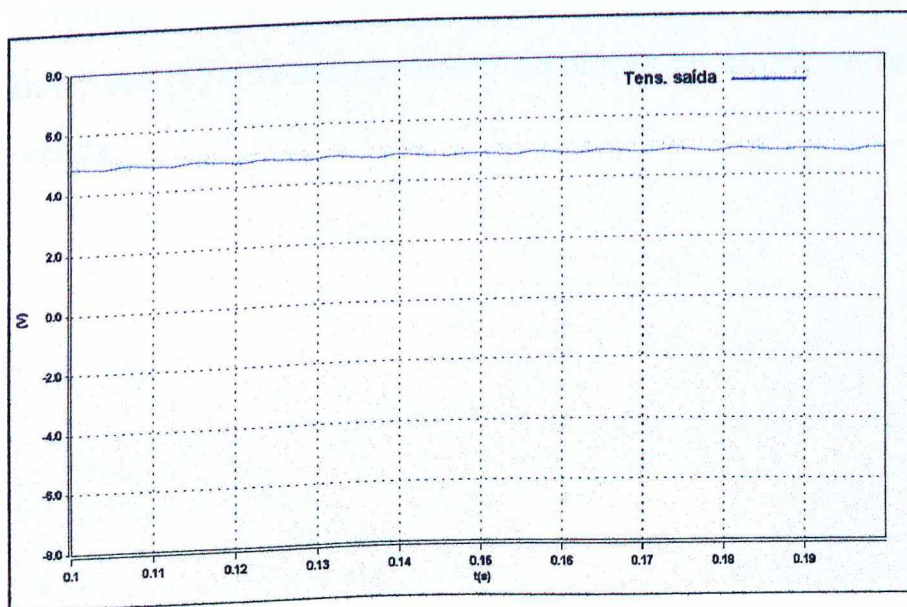


Figura 4.12 – Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada – Computacional

4.4.2. CASO 2 - SUPRIDOR CONTENDO ELEVAÇÃO TEMPORÁRIA DE TENSÃO

Este estudo dedicou-se a verificar o comportamento da tensão na saída de 5 V da fonte chaveada diante da presença de uma elevação temporária de tensão por parte do supridor. Além deste aspecto, as análises permitem ainda a observação dos reflexos deste distúrbio no comportamento do computador alimentado pela fonte chaveada em questão.

A metodologia empregada foi a mesma já discutida no item 3.4.2 do capítulo III, fato este que leva à dispensa de maiores detalhes sobre os procedimentos empregados. Não obstante a isto, considera-se fundamental lembrar que, embora diversas condições tenham sido exploradas, somente a pior condição imposta está exposta na seqüência deste trabalho. Esta situação está vinculada com uma elevação temporária de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.

a) Tensão CA de alimentação e tensão no elo de corrente contínua

A figura 4.13 mostra em (a) o comportamento da tensão de alimentação da CPU do computador e em (b) o comportamento da tensão no elo de corrente contínua da fonte chaveada.

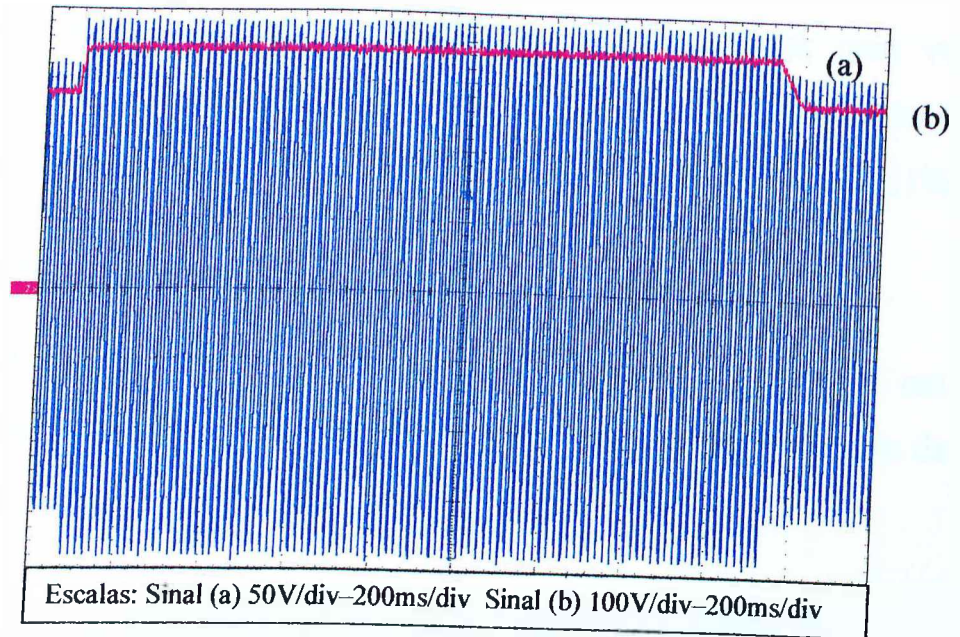


Figura 4.13 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Elo de Corrente Contínua da Fonte Chaveada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

Através da figura é possível observar que a tensão no elo de corrente contínua sofre os efeitos do distúrbio aplicado na entrada da fonte chaveada, tendo seu valor aumentado cerca de 22% durante o período em que ocorre a elevação de tensão.

O resultado obtido via computador para esta mesma situação está mostrado na figura 4.14.

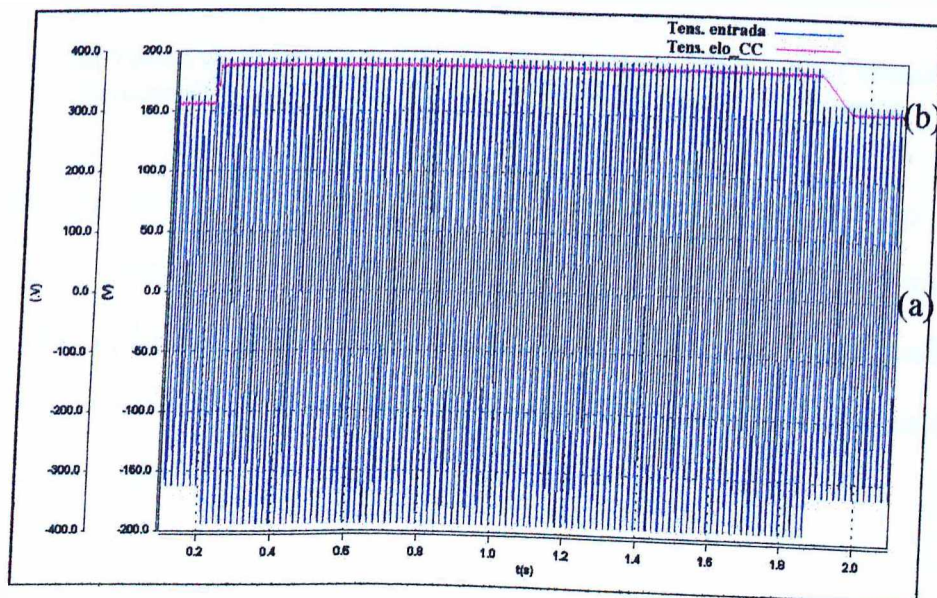


Figura 4.14 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Elo de Corrente Contínua da Fonte Chaveada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

Esta figura mostrou-se bastante semelhante à experimental, uma vez que a tensão no elo de corrente contínua também teve seu valor majorado durante a elevação de tensão. Neste caso, o aumento foi de aproximadamente 21%.

b) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A figura 4.15, atrelada à montagem experimental, mostra em (a) o comportamento da tensão de alimentação e em (b) a tensão na saída de 5 V da fonte chaveada.

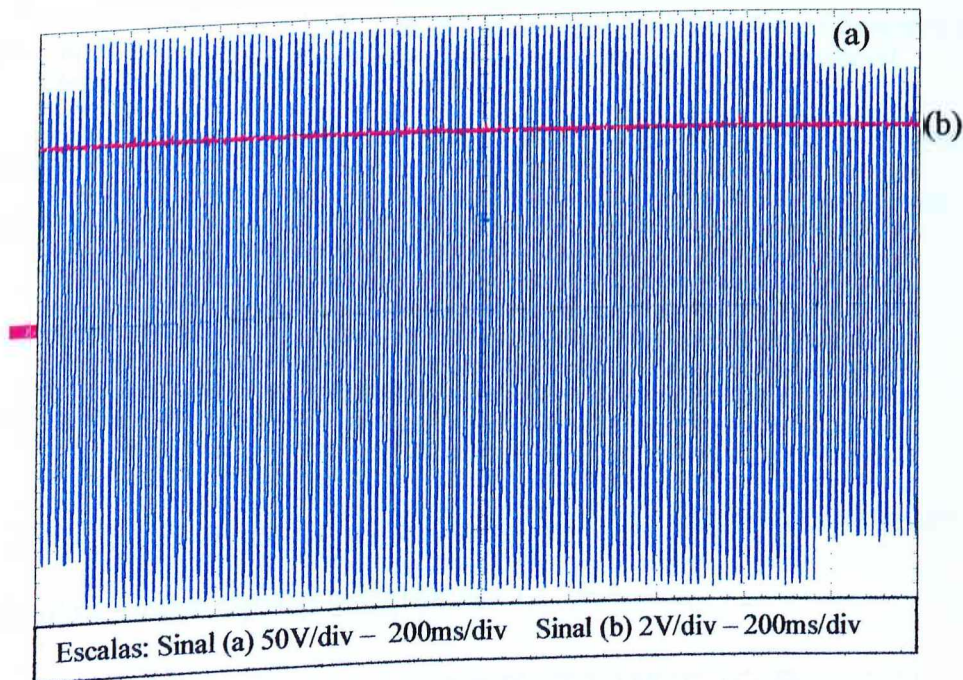


Figura 4.15 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

Através das figuras 4.13 e 4.15 é possível verificar que, apesar do aumento na tensão de alimentação e no elo de corrente contínua, a tensão na saída regulada não sofreu alteração, denotando, assim, que o controle atuou alterando a largura dos pulsos no processo de chaveamento, fazendo com que a tensão de saída se mantivesse constante.

A figura a seguir retrata a mesma condição de operação, porém, de forma computacional.

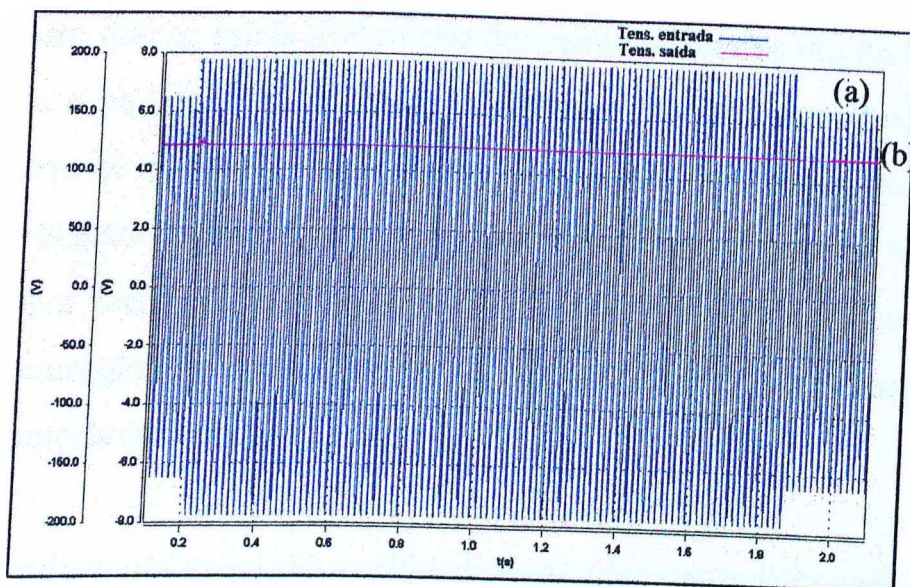


Figura 4.16 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

O comportamento computacional das tensões de alimentação e na saída regulada da fonte chaveada foi semelhante ao experimental, como pode ser visto na figura.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

As formas de onda da tensão e corrente na entrada da fonte chaveada também foram registradas, como ilustra a figura 4.17.

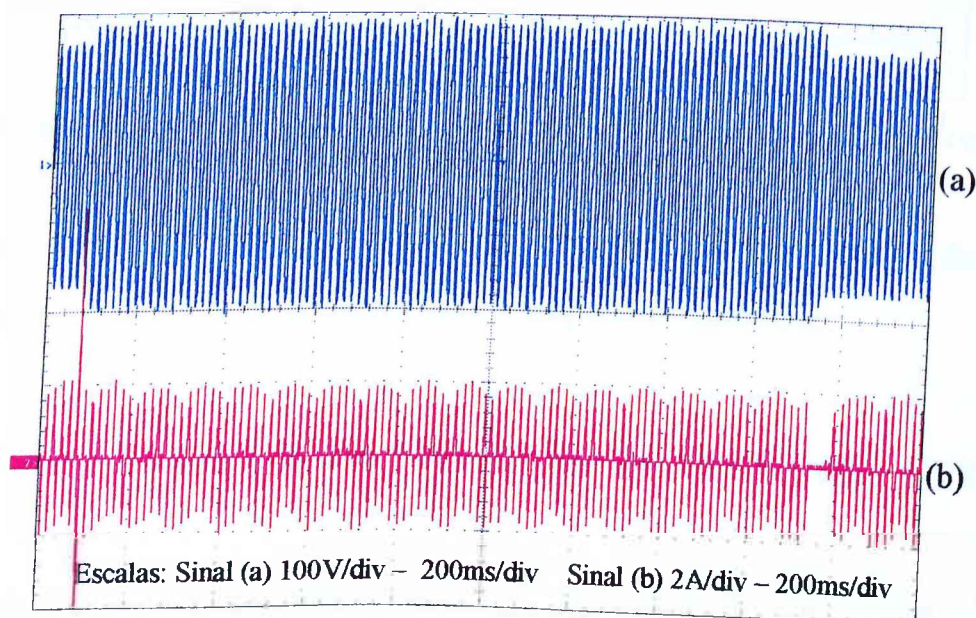


Figura 4.17 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

No instante em que se inicia a elevação de tensão, acontece um pico na corrente que alimenta o equipamento, e durante o tempo em que persistiu o "swell", o valor da corrente sofreu uma pequena diminuição. No momento em que o distúrbio na tensão da entrada chega ao fim, a corrente de entrada tem seu valor diminuído para zero, pois os capacitores assumem a corrente de carga. Quando estes se descarregam até que a tensão CC volte ao patamar nominal, a corrente volta a ser suprida pela rede.

A mesma condição de operação verificada computacionalmente está ilustrada na figura 4.18.

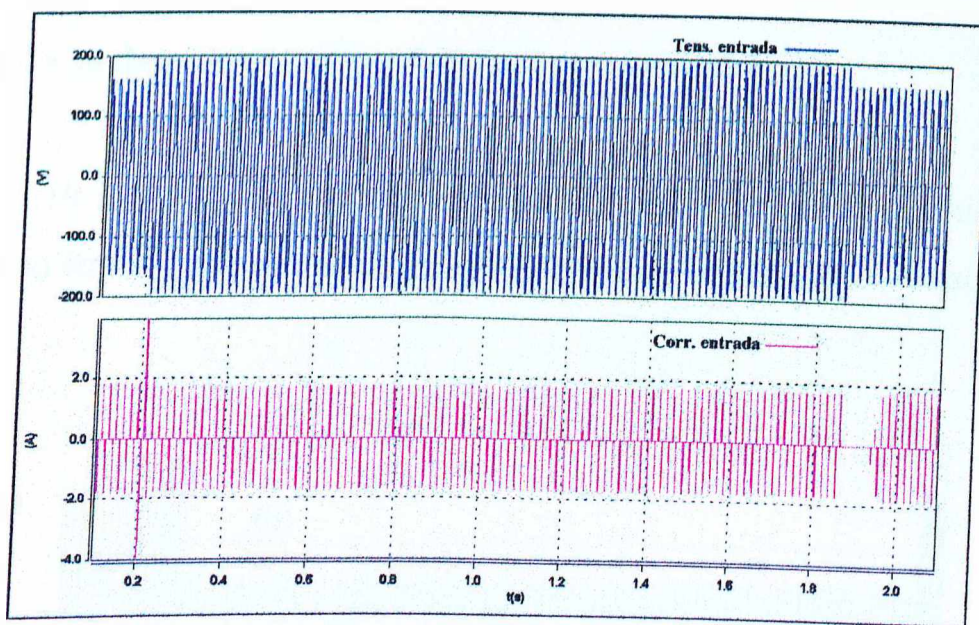


Figura 4.18 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Elevação de Tensão de 20% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

Observando-se os resultados, pode-se verificar que o comportamento da corrente na entrada foi praticamente igual ao obtido experimentalmente.

4.4.3. CASO 3 - AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Para este estudo, o equipamento analisado foi submetido a vários níveis de afundamento de tensão, da mesma forma como descrito no capítulo III. Os

resultados experimentais e digitais obtidos estão apresentados e discutidos na seqüência, sendo muito importante salientar que, como o principal interesse está voltado a definir os limites de sensibilidade, apenas as situações mais críticas se fazem presentes.

4.4.3.1. COMPORTAMENTO DA FONTE CHAVEADA DIANTE DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 40%

A escolha desta condição está atrelada ao ponto de antecedência ao início de manifestação de algum tipo de influência na saída da fonte chaveada.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A figura 4.19 mostra o comportamento experimental da tensão de saída quando acontece no suprimento um afundamento de tensão de 40% com duração de 100 ciclos.

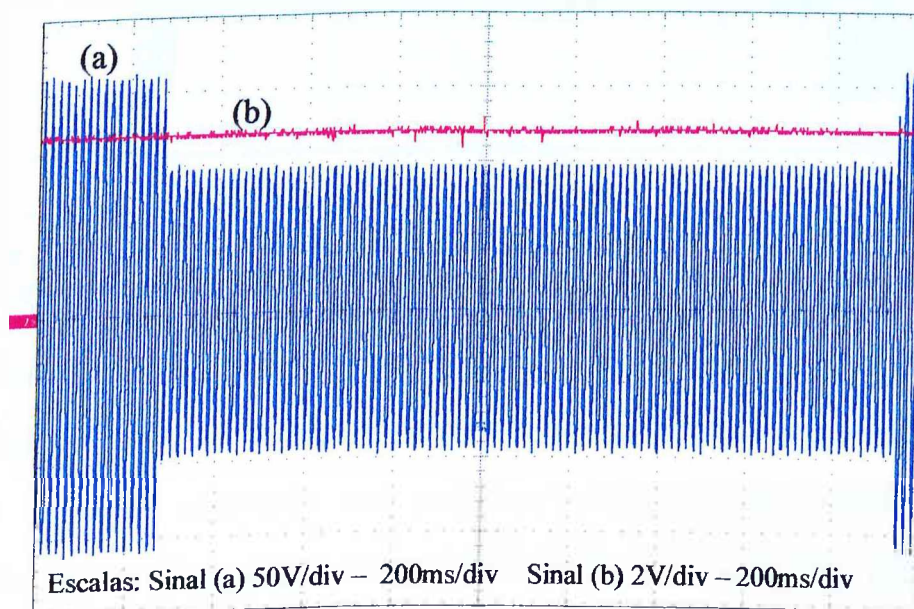


Figura 4.19 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 40% Com duração de 100 Ciclos – Experimental

A curva (a) ilustra a forma de onda da tensão que supre o equipamento e a curva (b) representa a tensão na saída de 5 V. Analisando os resultados pode-se verificar que, na ocorrência do afundamento de 40%, não há nenhuma alteração na tensão de saída de 5 V da fonte chaveada.

A correspondente simulação digital mostra que um afundamento de tensão de 40% ocorrido na entrada da fonte chaveada, assim como no teste experimental, não é transferido para a saída regulada. Isto pode ser observado na figura 4.20, onde a curva (a) representa a tensão de suprimento e a curva (b) a tensão medida na saída regulada para 5 V.

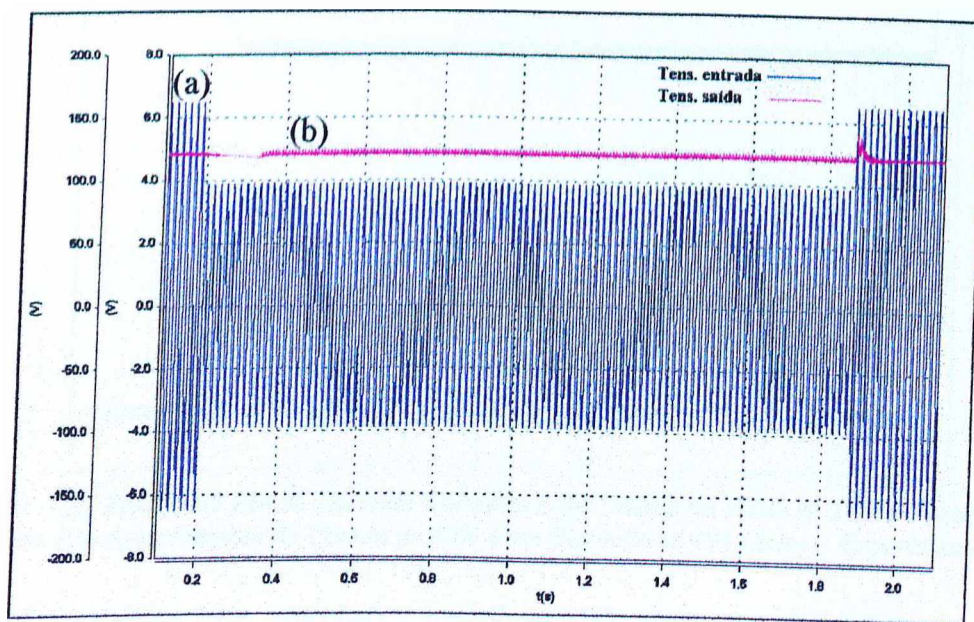


Figura 4.20 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 40% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

Comparando-se as figuras 4.19 e 4.20, nota-se somente uma pequena diferença com respeito à tensão na saída da fonte chaveada, onde a simulação apresenta uma forma de onda contendo um pequeno acréscimo de “ripple” durante o afundamento de tensão, além de um transitório sem grandes proporções no instante de restabelecimento da tensão de suprimento. Estas manifestações podem ser justificadas por uma certa ineficiência do controle implementado no

simulador, além do fato de não se conhecer os detalhes acerca do circuito elétrico original da fonte chaveada analisada.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

Na continuidade das análises, a figura 4.21 mostra em (a) a tensão no elo de corrente contínua e em (b) a tensão na saída de 5 V, quando é imposto na entrada um afundamento de tensão com as mesmas proporções já descritas.

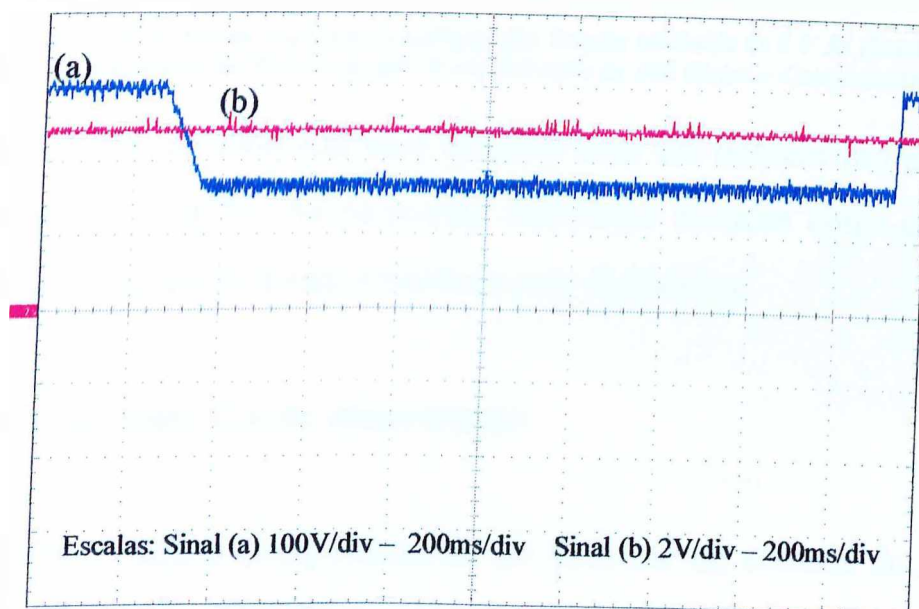


Figura 4.21 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 40% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

A figura 4.21 mostra que, mesmo a tensão no elo de corrente contínua tendo seu valor diminuído em cerca de 44%, a tensão na saída de 5 V não se modificou, mostrando desta maneira que o controle de largura de pulsos das chaves agiu de maneira eficiente.

Para o caso simulado, como era de se esperar, ocorreu o mesmo fenômeno, como ilustra a figura 4.22.

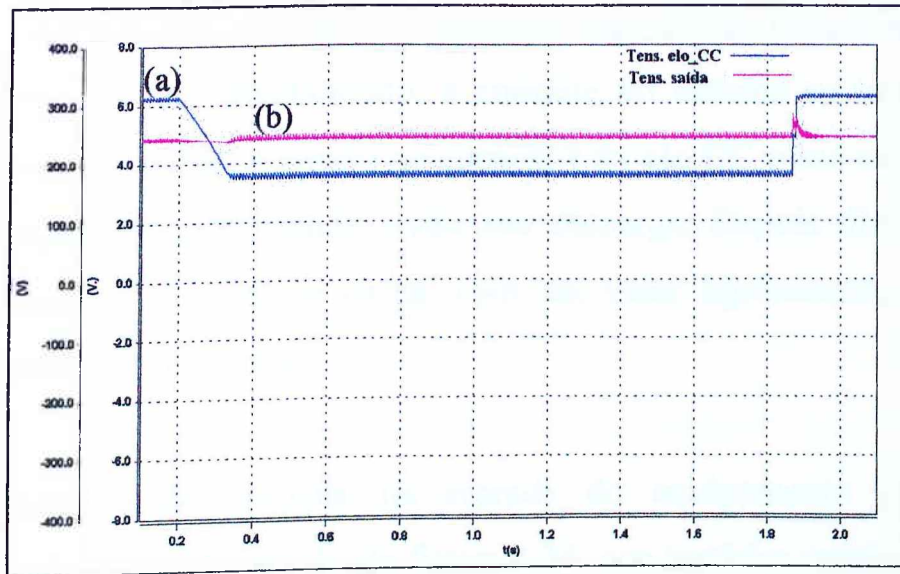


Figura 4.22 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 40% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

A tensão no elo de corrente contínua também teve um decréscimo em seu valor de aproximadamente 42%. As pequenas diferenças notadas entre as formas de onda da tensão de saída já foram anteriormente discutidas.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

Foi também observado o comportamento da corrente na entrada do dispositivo durante a ocorrência do distúrbio imposto, conforme ilustra a figura 4.23.

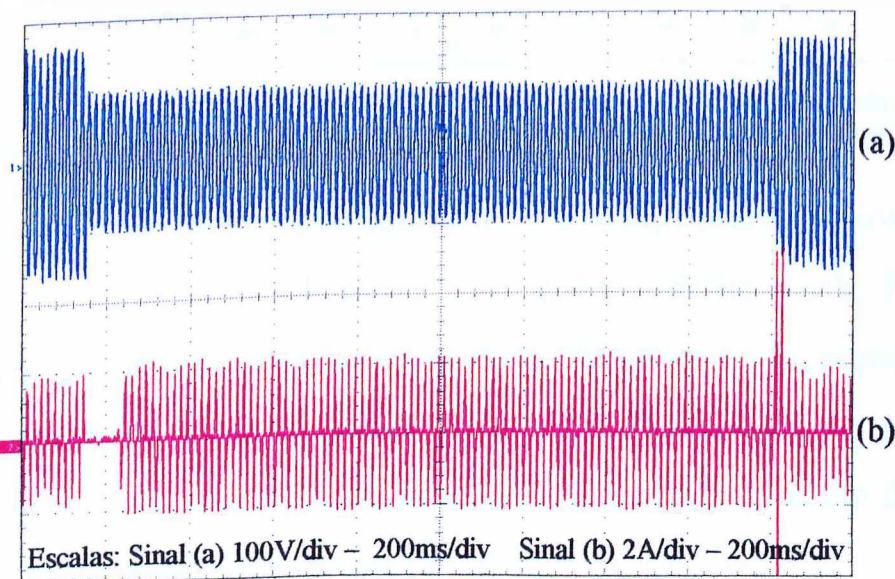


Figura 4.23 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 40% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

É possível verificar que, durante um pequeno intervalo de tempo, associado ao início da aplicação do afundamento, a corrente do sistema se torna zero. No transcorrer deste instante, a tensão no capacitor do elo CC torna-se maior que a tensão de suprimento, ocorrendo então sua descarga. Depois disto, o sistema supridor assume a corrente de carga, com um valor ligeiramente superior ao anterior, mantendo o consumo.

O comportamento da corrente na entrada do equipamento para o caso computacional é ilustrado em (b) da figura 4.24, que também contém a forma de onda da tensão de suprimento (a).

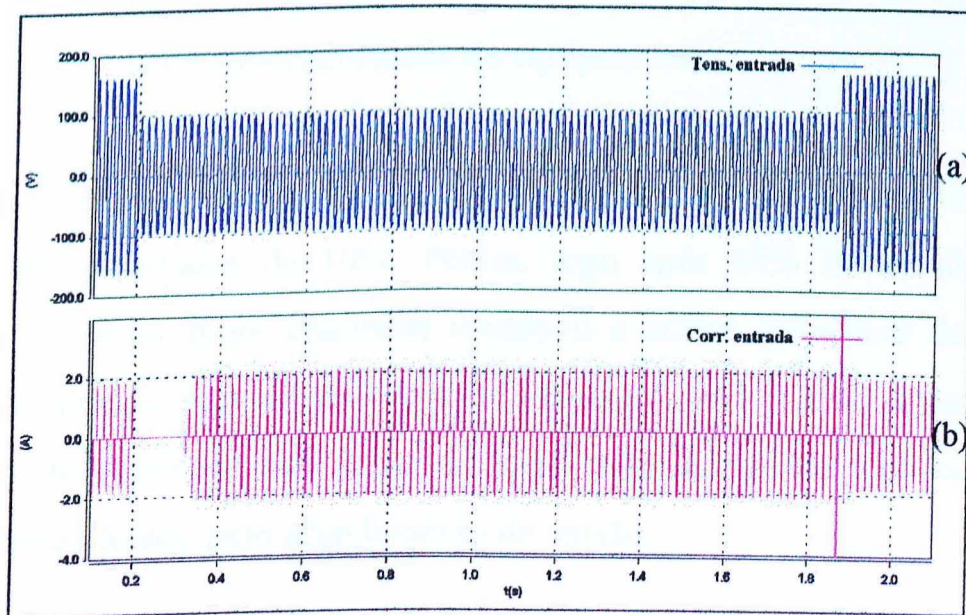


Figura 4.24 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 40% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

Confrontando-se os resultados das figuras 4.23 e 4.24, observa-se somente uma diferença no tempo de duração do período em que a corrente é nula. Para o caso computacional este período teve maior duração. Mais uma vez, acredita-se que isto seja resultado de simplificações impostas no processo de modelagem computacional ou a um sobredimensionamento do capacitor do elo de corrente contínua do circuito implementado no simulador.

Em síntese, a imposição de um afundamento temporário de tensão de 40% não produziu nenhum efeito apreciável na saída da fonte chaveada, nem no funcionamento do computador sob investigação. Devido a isto, na seqüência, procedeu-se a uma intensificação do afundamento de tensão, conforme mostrado a seguir.

4.4.3.2. COMPORTAMENTO DA FONTE CHAVEADA DIANTE DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 48%

Nesta seção é discutida a condição limite de operação que apresentou influência na saída de tensão da fonte chaveada em estudo, caracterizando, deste modo, uma das fronteiras de suportabilidade do equipamento.

A estratégia inicialmente adotada foi de diminuir a tensão, a partir do valor nominal, em patamares de 10%. Porém, logo após 40% de afundamento, a tensão de saída da fonte chaveada começou a sofrer influência do distúrbio imposto na entrada. A partir daí a tensão foi sendo diminuída de 1 em 1%, com o objetivo de encontrar um ponto no qual o funcionamento do computador também fosse afetado pelo afundamento de tensão.

Assim sendo, as figuras ilustradas na seqüência e seus respectivos comentários retratam o comportamento das tensões em análise para o caso de ocorrência de um afundamento de tensão de 48%. Para este nível, foi possível notar a manifestação de influências na saída da fonte chaveada, sem que isto, no entanto, viesse a interromper a operação do computador.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

Através da figura 4.25 pode ser observado em (a) a tensão de suprimento com o distúrbio imposto e em (b) a tensão de 5 V. Esta última, como se percebe, teve uma diminuição de seu valor nominal de 4,8 V (caso ideal), para aproximadamente 4,3 V, depois de aproximadamente 5,5 ciclos da imposição do afundamento de tensão na entrada do equipamento.

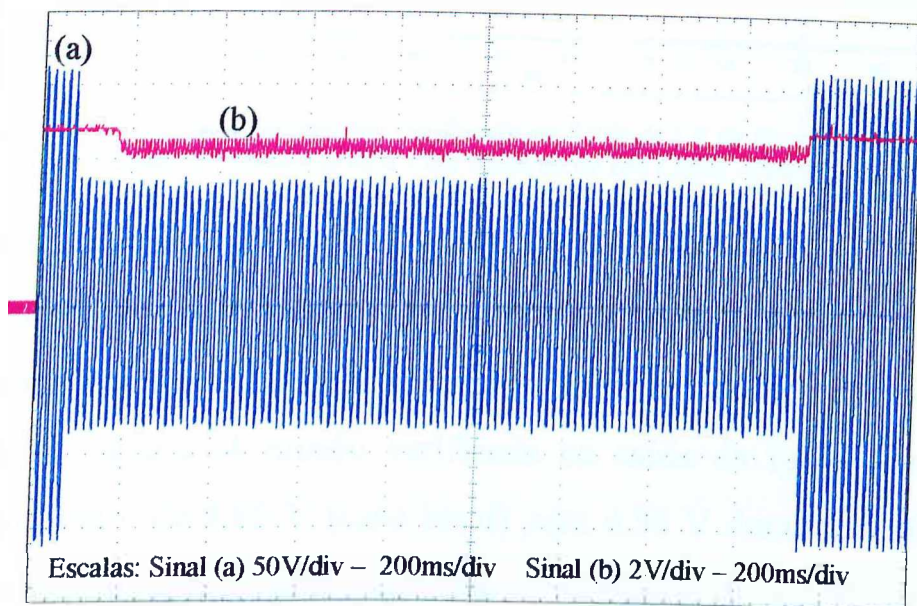


Figura 4.25 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 48% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

Mesmo manifestando-se uma alteração no valor da tensão de saída, o computador continuou funcionando normalmente, o que pode ser interpretado como sendo um ponto de transição entre o funcionamento normal e a caracterização de má operação.

Mantendo o mesmo padrão de investigação já estabelecido, foi conduzida a análise computacional da situação anterior. Os correspondentes resultados estão ilustrados na figura 4.26.

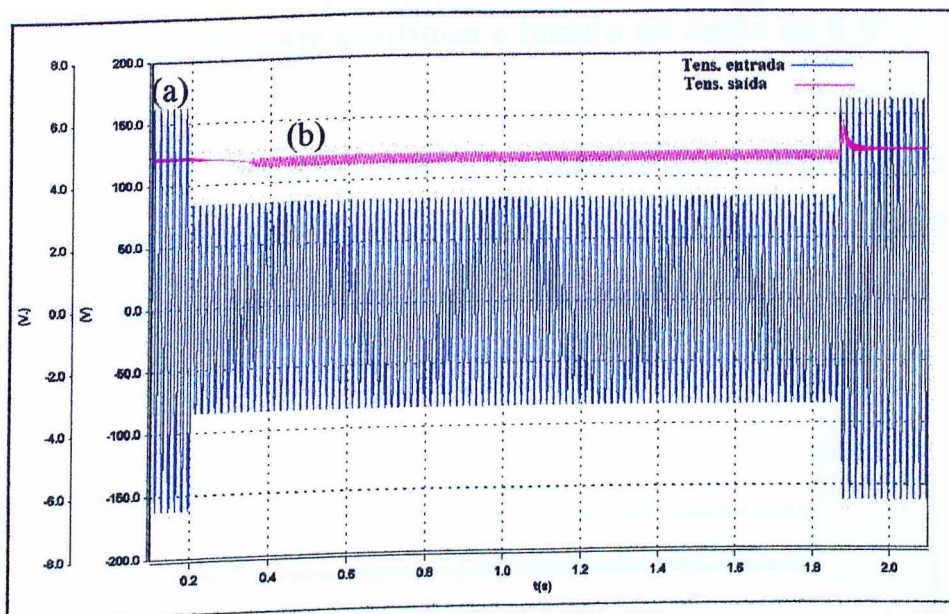


Figura 4.26 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 48% Com Duração de 100 Ciclos –Computacional

O desempenho da tensão na saída de 5 V, ilustrada na curva (b) da figura anterior, é semelhante ao obtido experimentalmente, a menos de uma pequena diferença nas amplitudes envolvidas, sendo que as formas de onda mantiveram-se praticamente iguais. A tensão verificada na saída da fonte chaveada pela simulação diminuiu de 4,85 V (caso ideal) para 4,56 V durante o afundamento de tensão, enquanto que o valor experimental diminuiu de 4,8 V para 4,3 V. O ponto em que a tensão na saída da fonte chaveada começou a sentir os efeitos do distúrbio, ficou em torno de 9 ciclos após o início do mesmo, uma vez que o tempo de descarga do capacitor do elo CC foi um pouco superior ao medido na prática. Estas diferenças são compreensíveis à medida que se recorda que, no caso prático, a fonte chaveada supre o computador através de outras saídas de alimentação, conforme anteriormente discutido. Já no caso simulado, somente a saída de 5 V supre a carga, permitindo concluir que o capacitor do elo CC mantém a tensão ligeiramente superior, uma vez que a corrente drenada é menor, além do fato de o ajuste do controle não ter sido aferido com precisão.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

As figuras 4.27 e 4.28 mostram em (a) o comportamento da tensão no elo de corrente contínua e em (b) o comportamento da tensão na saída de 5 V para os casos experimental e computacional, respectivamente.

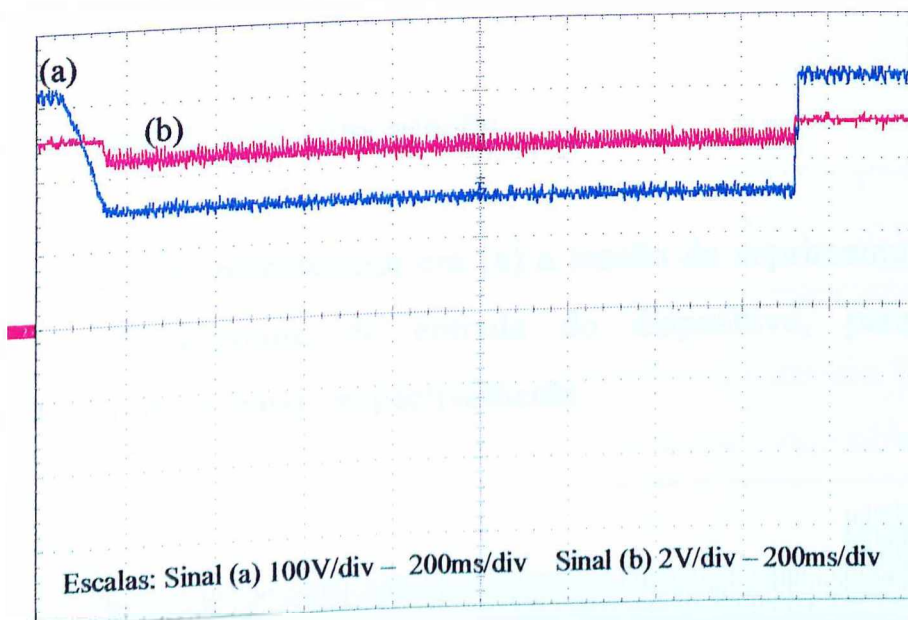


Figura 4.27 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 48% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

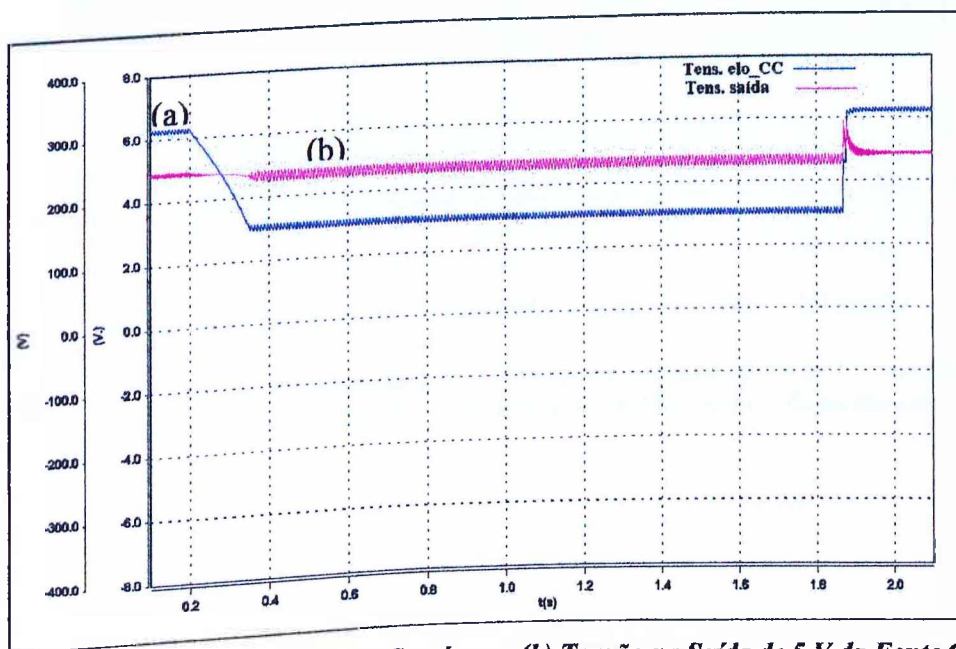


Figura 4.28 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 48% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

Para o caso experimental, a tensão no elo de corrente contínua teve uma diminuição de aproximadamente 49% durante o afundamento de tensão, tendo seu valor diminuído de 297 V para 151 V. Por outro lado, computacionalmente, observou-se que a tensão no elo CC foi reduzida de 310 V para 152,5 V, mantendo praticamente o mesmo padrão comportamental anteriormente obtido, diminuindo em cerca de 50%.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

As figuras 4.29 e 4.30 representam em (a) a tensão de suprimento e em (b) o comportamento da corrente de entrada do dispositivo, para os casos experimental e computacional, respectivamente.

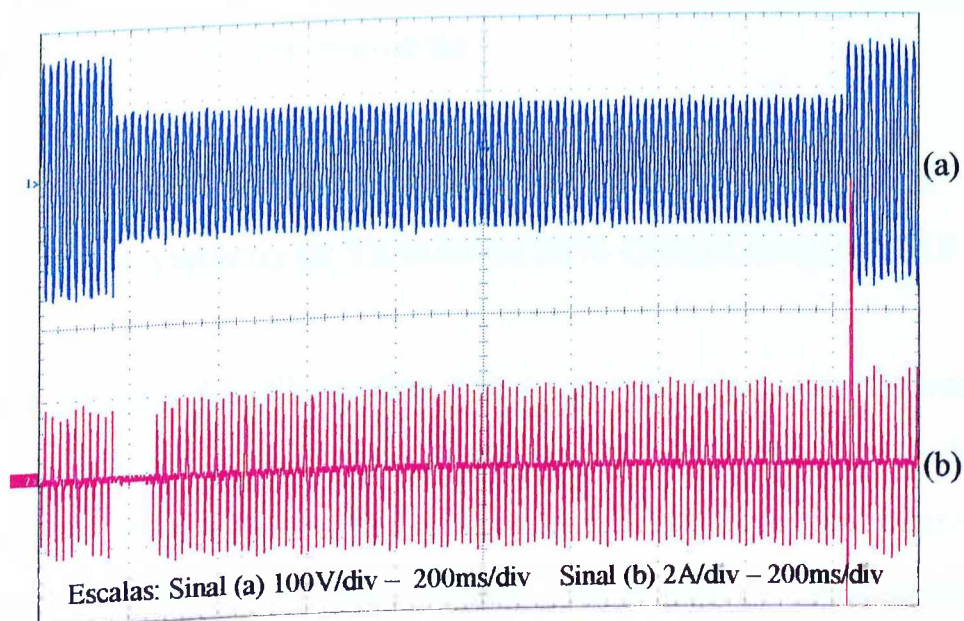


Figura 4.29 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 48% Com Duração de 100 Ciclos – Experimental

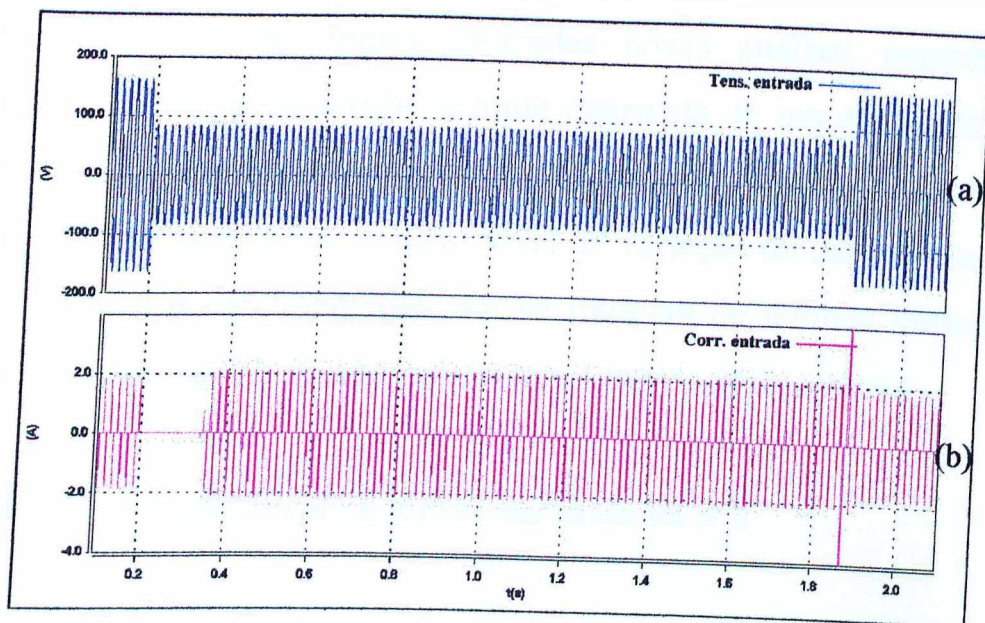


Figura 4.30 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 48% Com Duração de 100 Ciclos – Computacional

A corrente, para o afundamento de 48%, manteve-se da mesma forma que o observado para 40%, dispensando, deste modo, maiores comentários, uma vez que estes já foram tecidos anteriormente.

4.4.3.3. COMPORTAMENTO DA FONTE CHAVEADA DIANTE DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 50% COM DURAÇÃO DE 10 CICLOS

Fazendo um resumo das discussões até aqui realizadas, inicialmente foram apresentados os dados referentes à submissão da fonte chaveada a um afundamento de tensão de curta duração de 40% e, posteriormente, 48%. Conforme já estabelecido, isto foi realizado com o objetivo de se estabelecer a fronteira entre o funcionamento normal e anormal do dispositivo em estudo. Neste sentido, a observação de relevância é de que o afundamento de 40% não influencia a operação da fonte, enquanto que o outro, de 48%, embora alterando o valor da tensão de saída, ainda não se refletiu em funcionamento inadequado do computador sob investigação.

Considerando o exposto, foram realizadas novas análises experimentais e computacionais, com a imposição à fonte chaveada de um afundamento ainda maior de tensão, desta feita em 50%. Assim procedendo, apresenta-se, na seqüência, os resultados para o citado nível de variação de tensão com durações de 10 e 11 ciclos respectivamente, por se tratarem de tempos limites, onde o computador sai do regime de operação normal para o desligamento.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A figura 4.31 mostra em (a) o comportamento experimental do afundamento de tensão de 50% aplicado à fonte chaveada do computador estudado, com duração de 10 ciclos. Na mesma figura, em (b) está ilustrado o comportamento da tensão na saída de 5 V.

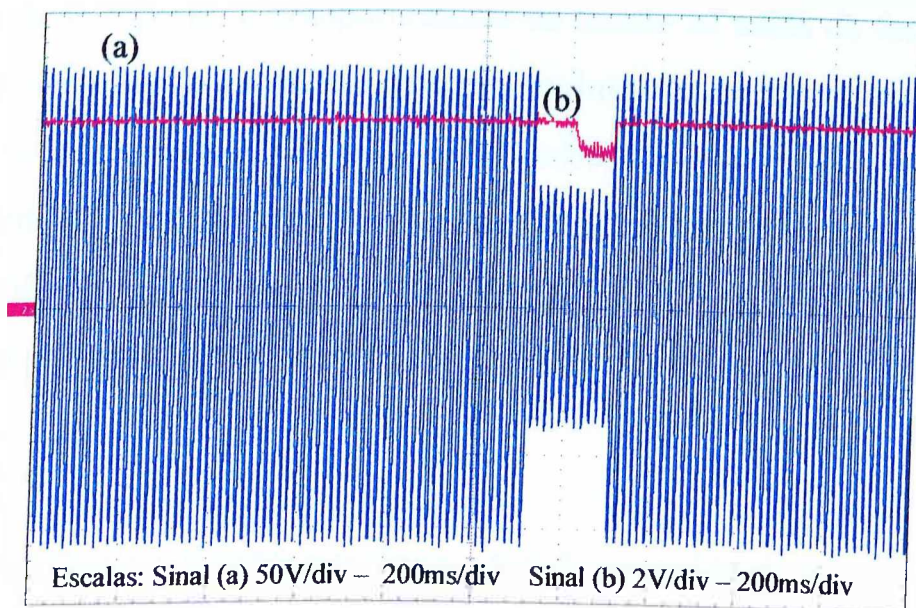


Figura 4.31 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 10 Ciclos – Experimental

Analisando a figura, nota-se que a tensão de saída tem seu valor reduzido de 4,8 V para 4,0 V após aproximadamente 5,5 ciclos do início do distúrbio, tendo seu valor restabelecido após o termino do afundamento. Para o caso em questão, o computador continuou funcionando normalmente.

A figura 4.32 retrata computacionalmente a condição anterior, onde a CPU do computador é submetida a um afundamento de 50% com duração de 10 ciclos.

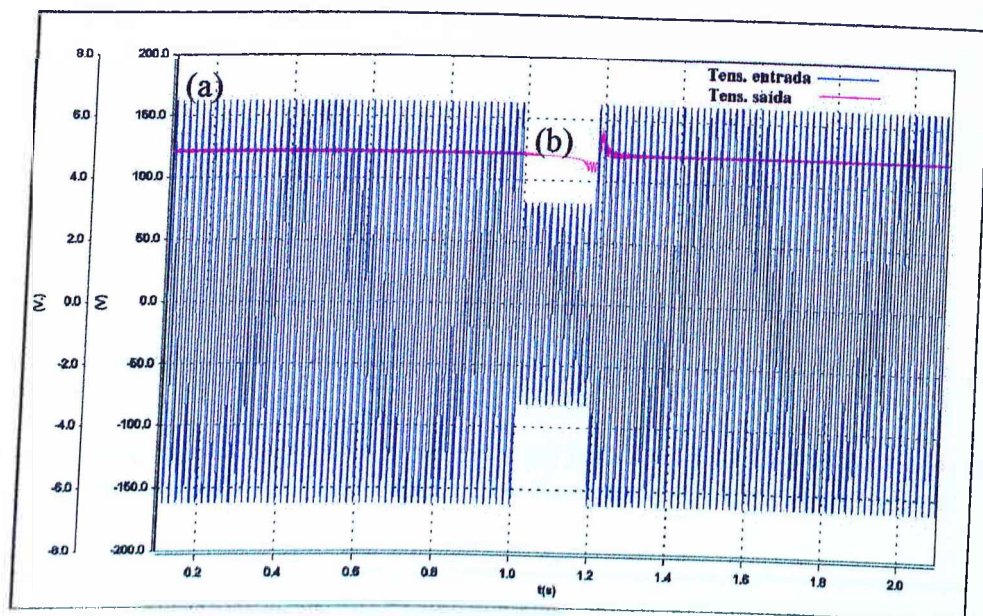


Figura 4.32 (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 10 Ciclos – Computacional

Como era de se esperar, o comportamento da tensão na saída da fonte chaveada mostrou-se semelhante ao obtido experimentalmente. As diferenças observadas na tensão de saída podem ser justificadas pelos mesmos motivos mencionados anteriormente no caso de um afundamento de tensão de 40%, ou seja, por uma certa ineficiência do controle implementado no simulador, além do fato de não se conhecer os detalhes acerca do circuito elétrico original da fonte chaveada analisada.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

As figuras 4.33 e 4.34 mostram em (a) o comportamento da tensão no elo de corrente contínua e em (b) o comportamento da tensão na saída de 5 V para os casos experimental e computacional, respectivamente.

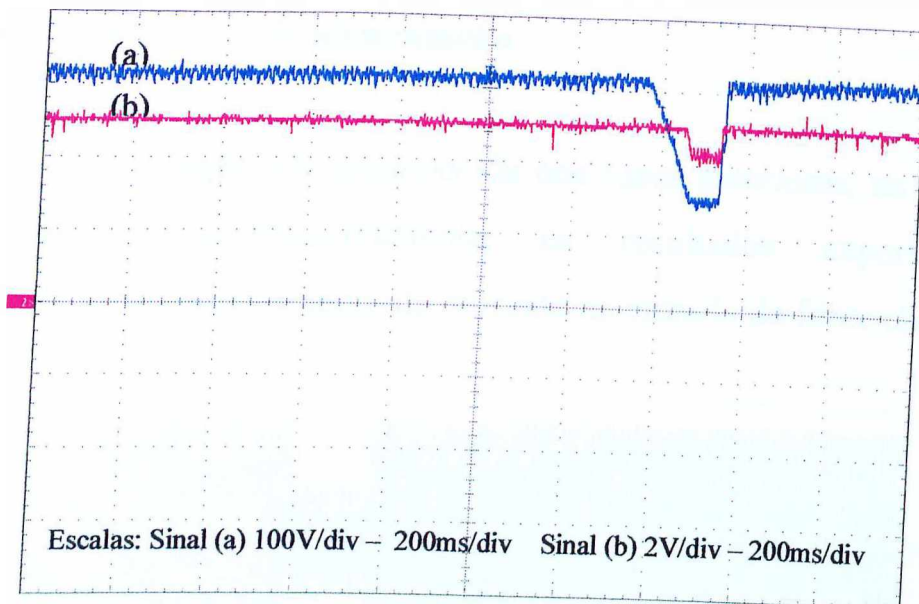


Figura 4.33 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 10 Ciclos – Experimental

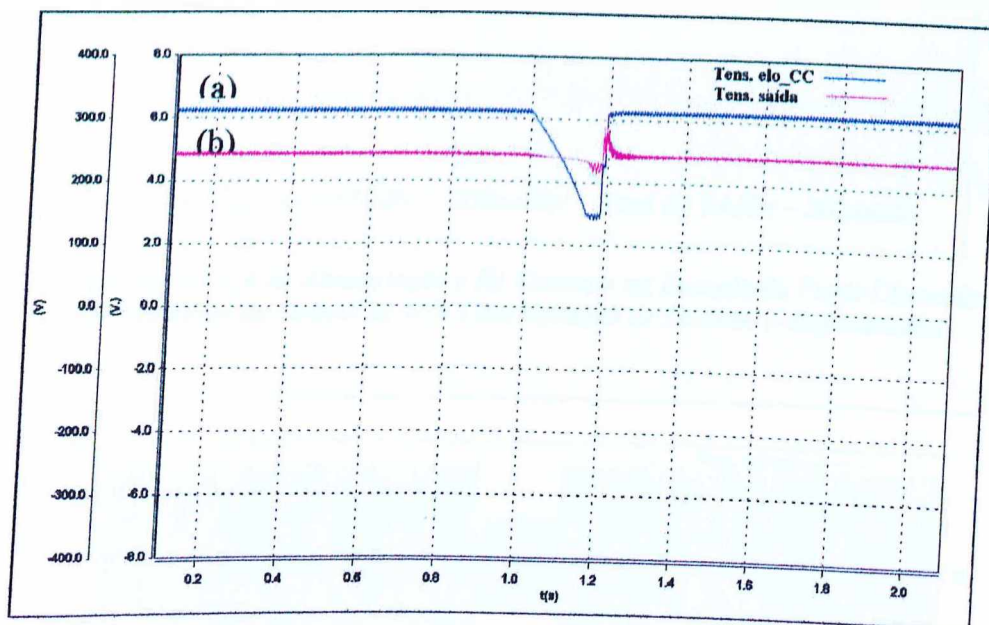


Figura 4.34 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 10 Ciclos – Computacional

As duas figuras anteriores permitem verificar que, diante da ocorrência do afundamento, a tensão de saída sofre uma pequena variação, porém, sem produzir nenhuma manifestação na operação do computador, afirmativa esta feita com base nas observações realizadas nos ensaios experimentais.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

Mantendo a mesma seqüência estabelecida nos casos anteriores, as figuras 4.35 e 4.36 mostram, consecutivamente, os resultados experimentais e computacionais do comportamento da corrente na entrada da fonte chaveada.

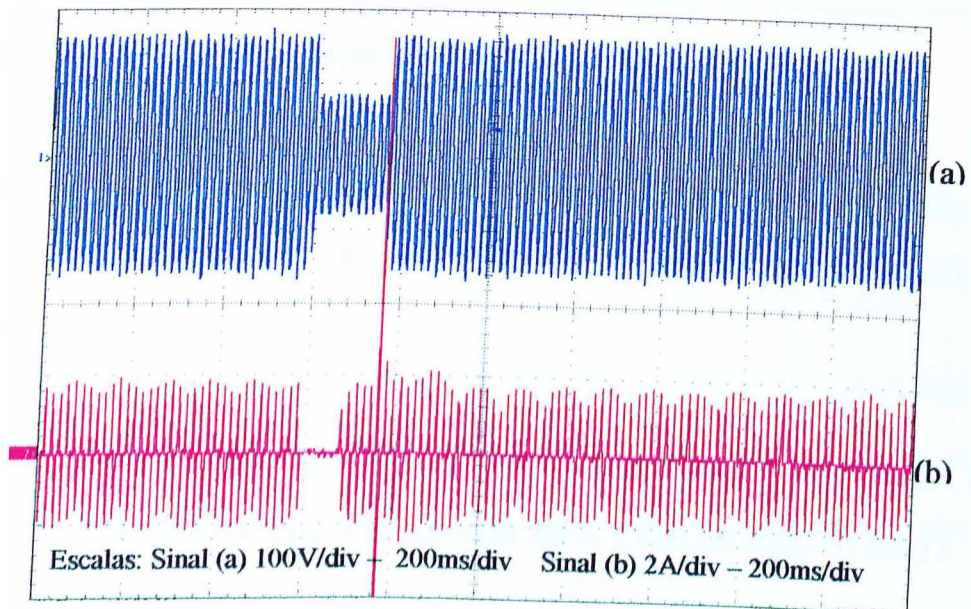


Figura 4.35 – (a) Tensão CA de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 10 ciclos – Experimental

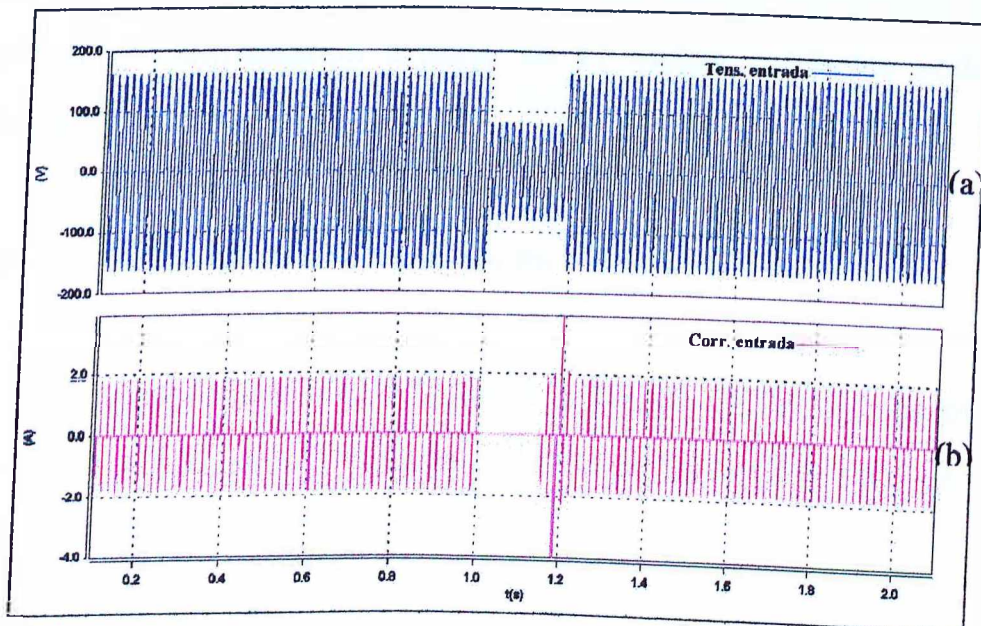


Figura 4.36 – (a) Tensão CA de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 10 ciclos – Computacional

Nas duas figuras anteriores, as formas de onda destacadas pela letra (a) representam o distúrbio imposto à fonte chaveada. As formas de onda denotadas pela letra (b), em ambas as figuras, merecem alguns comentários. Para o fenômeno imposto, o computador não apresentou sinais de mal funcionamento aos olhos do operador. Disto segue que durante o intervalo de tempo em que a corrente de entrada ficou em um patamar nulo, a potência elétrica foi proveniente da descarga dos capacitores do elo CC.

Diante dos resultados obtidos, fica claro a necessidade de se investigar novas condições de operação, até a definição da fronteira da sensibilidade do equipamento.

4.4.3.4. COMPORTAMENTO DA FONTE CHAVEADA DIANTE DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 50% COM DURAÇÃO DE 11 CICLOS

Para o presente caso, o computador foi sujeito à aplicação de um afundamento de tensão de 50% com duração superior a 10 ciclos, sendo que ocorrências significativas se manifestaram à partir de 11 ciclos, conforme pode ser visto mais adiante.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A figura 4.37 representa em (a) a forma de onda da tensão de suprimento e em (b) a tensão na saída para 5 V, para um afundamento de tensão de 50% com duração de 11 ciclos.

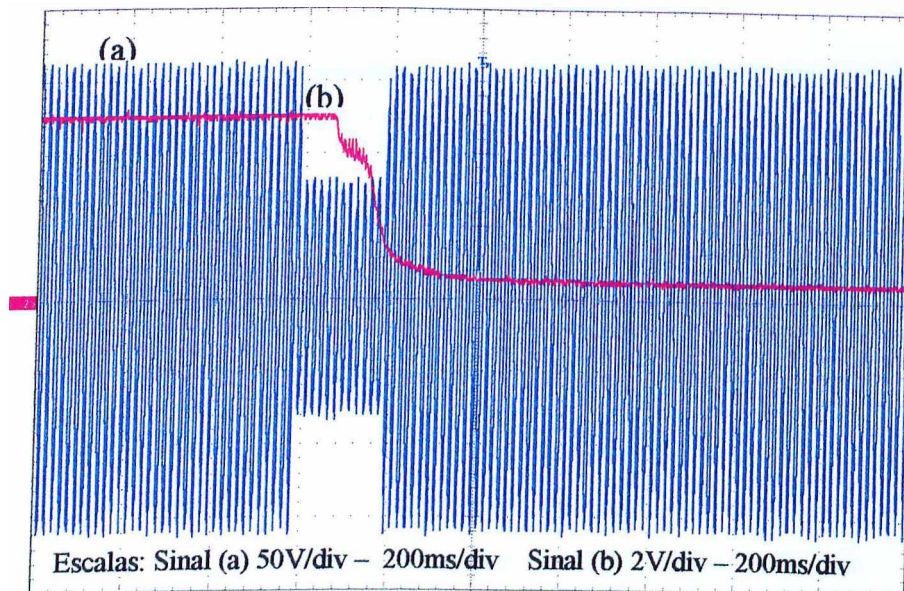


Figura 4.37 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 11 Ciclos – Experimental

Na figura, nota-se que durante o distúrbio imposto, a tensão de saída da fonte em estudo diminuiu abruptamente, caracterizando o desligamento total do computador após o décimo ciclo. Nestas condições, houve a necessidade de se realizar o religamento da máquina.

Vale a pena ressaltar que, uma vez encontrado um ponto limite para a operação do computador, a simulação computacional foi descartada. Isto se deve ao fato de que o interesse do trabalho não é voltado a modelar o computador enquanto carga, dispensando, deste modo, novas implementações computacionais no sentido de reproduzir digitalmente o desligamento do computador.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

A figura 4.38 ilustra em (a) o comportamento oscilografado da tensão no elo CC e em (b) a tensão de saída da fonte chaveada.

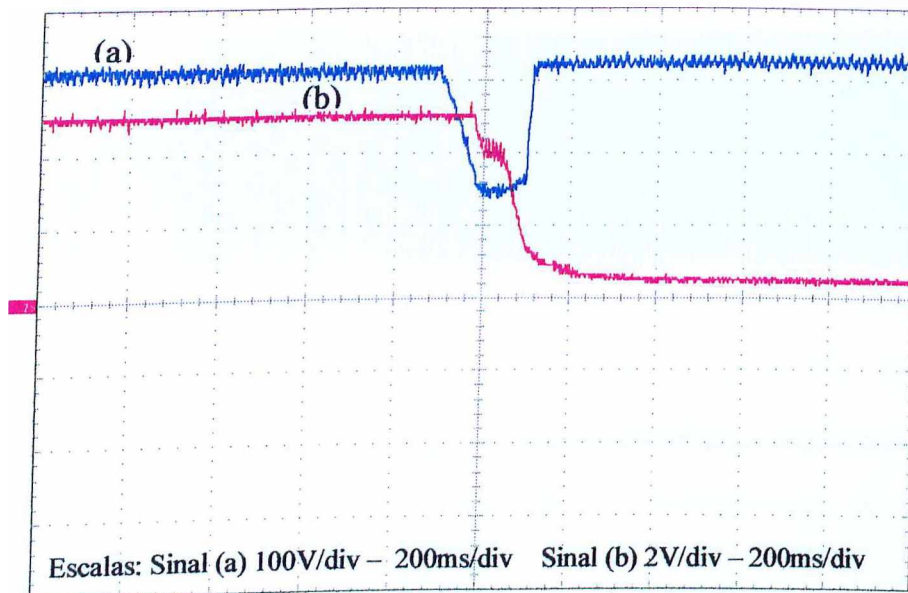


Figura 4.38 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 11 Ciclos – Experimental

A figura permite constatar que, durante o distúrbio imposto, a tensão de saída decresceu significativamente e após o seu término, tornou-se praticamente nula, o que significa afirmar que o computador desligou. Em outras palavras, após o restabelecimento da tensão do sistema, a tensão de saída não retornou ao seu valor normal, definindo, deste modo, um limite de suportabilidade da fonte chaveada.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

O comportamento da corrente de alimentação obtido experimentalmente está ilustrado em (b) da figura 4.39, que também mostra, a título de comparação, a forma de onda do distúrbio aplicado ao computador.

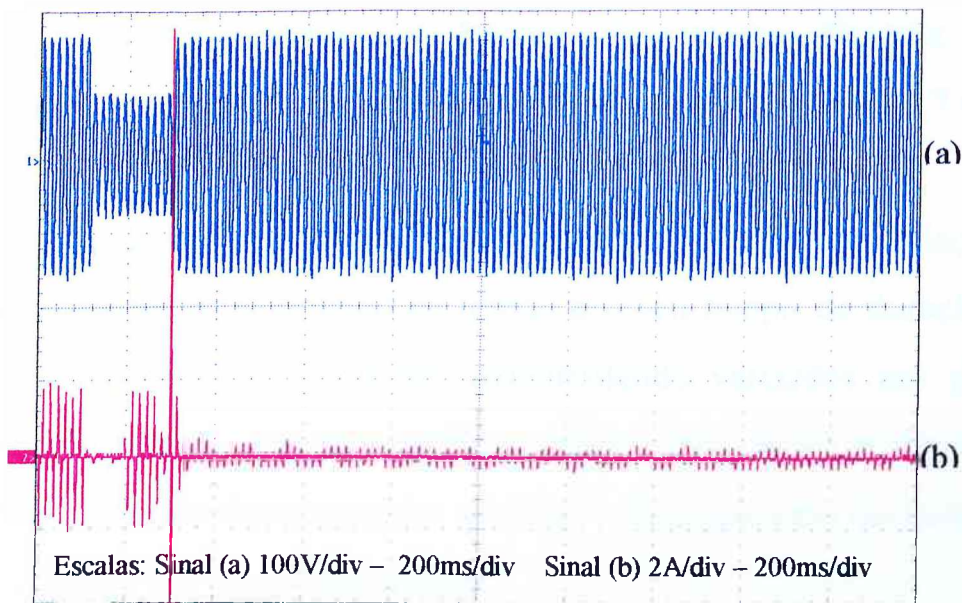


Figura 4.39 – (a) Tensão CA de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 50% Com Duração de 11 Ciclos – Experimental

Concordantemente com o observado na tensão de saída da fonte chaveada, a corrente absorvida pelo computador apresenta um período nulo, no qual certamente o capacitor do elo CC está suprindo a corrente de carga. Em seguida há um transitório que surge em função da tensão do sistema se tornar maior que aquela presente no ramo intermediário da fonte. Contudo, existe um ponto em que, mesmo a tensão do sistema sendo restabelecida, o computador se desliga involuntariamente, instante este em que a corrente torna-se nula permanentemente.

Tomando por base as informações fornecidas pelo procedimento aqui descrito, com certeza define-se um limite de sensibilidade para o computador. Todavia, buscando ampliar a zona que delimita as regiões de operação do dispositivo em análise, novas experiências foram realizadas, cujos resultados e comentários são apresentados na seqüência.

4.4.3.5. COMPORTAMENTO DA FONTE CHAVEADA DIANTE DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 55% COM DURAÇÃO DE 7 CICLOS

É óbvio que para se definir a sensibilidade do computador há uma relação direta entre o percentual de afundamento de tensão e o seu tempo de duração. Deste modo, foram realizados novos testes, contemplando variações nas grandezas supracitadas. No entanto, somente estudos experimentais foram realizados, uma vez que não é interesse desta pesquisa modelar o desligamento do computador. Os dados coletados são discutidos adiante.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A figura 4.40 mostra o comportamento experimental da tensão na saída de 5 V quando na tensão de suprimento da fonte chaveada acontece um afundamento de tensão de 55% com duração de 7 ciclos.

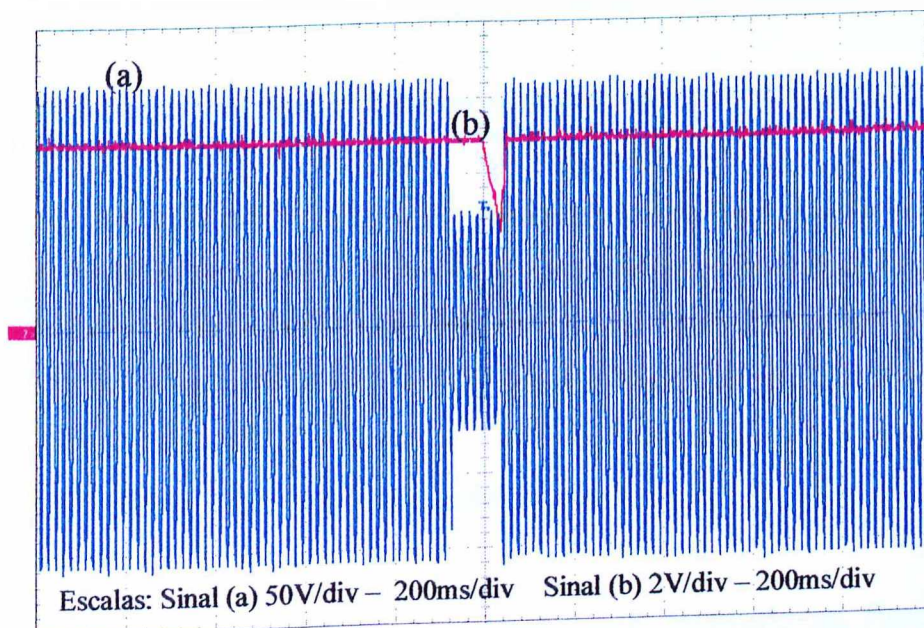


Figura 4.40 – (a) Tensão de Alimentação e b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 55% Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

Nota-se para o caso estudado que, muito embora haja uma manifestação na tensão de saída, após aproximadamente 4,5 ciclos, esta se restabelece ao término

do distúrbio aplicado, sendo que nada foi observado no funcionamento do computador.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

A figura 4.41 ilustra o perfil das tensões no elo de corrente contínua e na saída da fonte, cujos comentários são concordantes com os imediatamente anteriores.

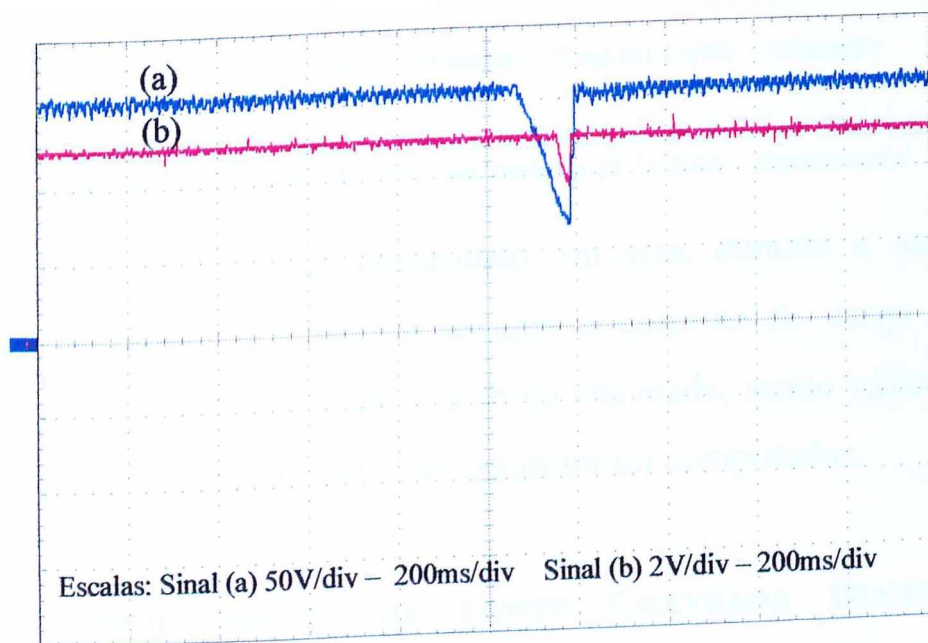


Figura 4.41 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 55% Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

Com base na figura anterior e também considerando as observações durante o ensaio, é possível afirmar que, nas condições às quais a fonte foi submetida, não há interferência na operação do computador.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

A corrente do sistema para o caso em estudo está ilustrada na figura 4.42, que também contém a forma de onda do afundamento de tensão aplicado à fonte chaveada.

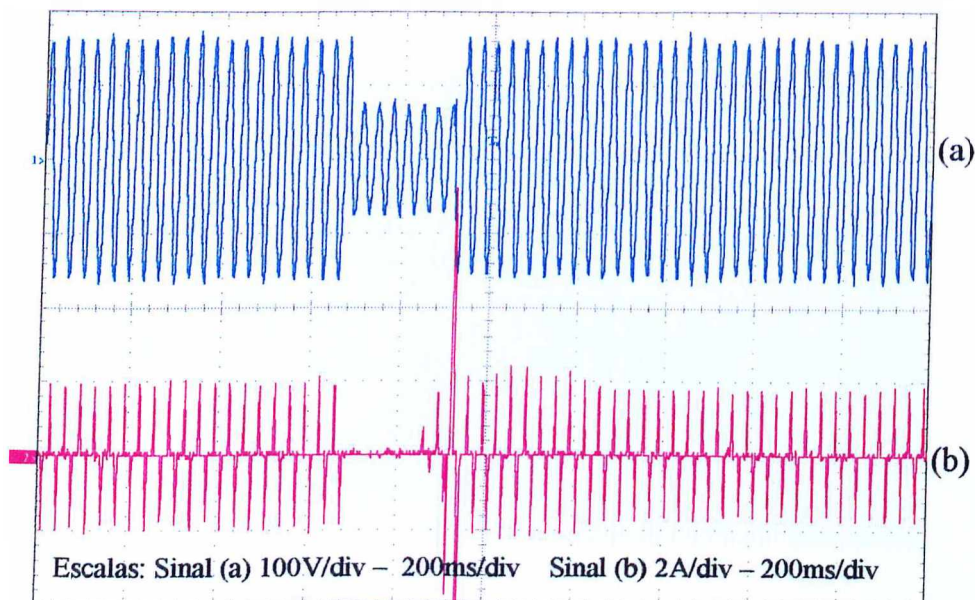


Figura 4.42 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 55% Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

A figura revela o que já fora comentado, ou seja, durante a ocorrência do afundamento de tensão o capacitor assume a corrente de carga e após seu término, o sistema é que passa a suprir a fonte chaveada, sendo válido mais uma vez afirmar que nada foi perceptível ao operador do computador.

4.4.3.6. COMPORTAMENTO DA FONTE CHAVEADA DIANTE DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO DE 55% COM DURAÇÃO DE 8 CICLOS

Nesta fase da investigação, aplicou-se novamente um afundamento de tensão de 55% no equipamento, porém, alterando-se a duração do distúrbio de 7 para 8 ciclos. Os resultados desta nova análise experimental estão apresentados na seqüência.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A figura 4.43 ilustra em (a) a tensão na entrada da fonte chaveada e em (b) a tensão na saída de 5 V.

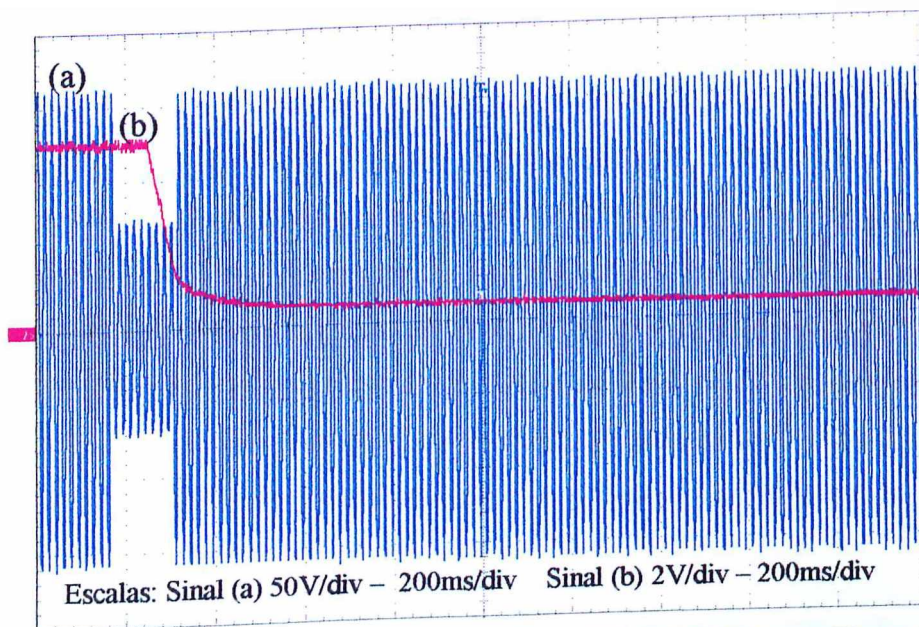


Figura 4.43 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 55% Com Duração de 8 Ciclos – Experimental

Na figura, nota-se que durante o distúrbio imposto, a tensão de saída da fonte em estudo diminuiu abruptamente, sendo que ocorreu o desligamento total do computador após o sétimo ciclo, o que fica bem caracterizado pela permanência da tensão de saída em um valor quase nulo. Nestas condições, houve a necessidade de se realizar o religamento do mesmo.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

Concordantemente com os comentários anteriores, fica claro que o computador se desliga, como pode ser observado pelo comportamento da tensão de saída da fonte comparada com a tensão no elo de corrente contínua, conforme a figura a seguir.

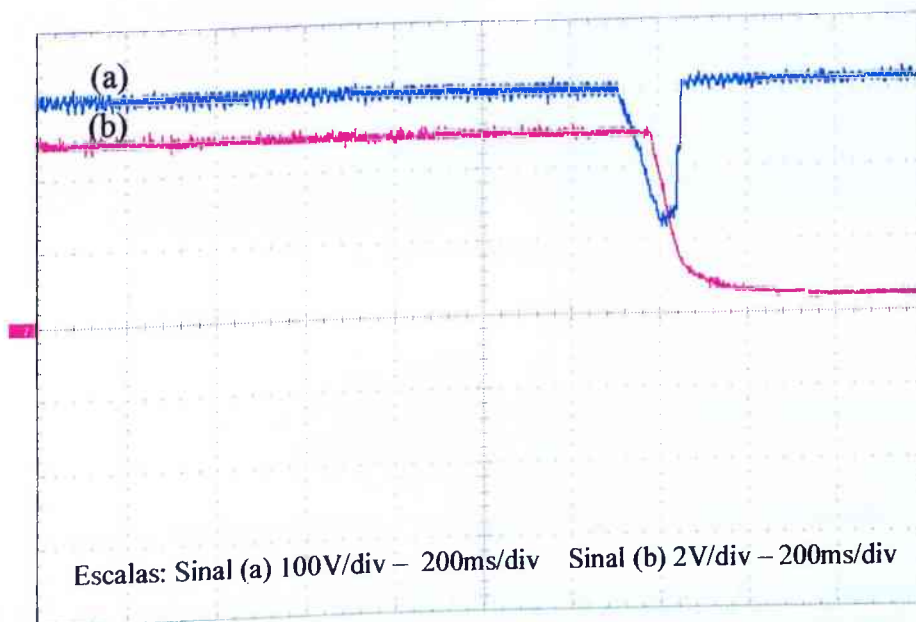


Figura 4.44 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 55% Com Duração de 8 Ciclos – Experimental

Em outras palavras, embora tenha havido o restabelecimento da tensão do sistema e, por conseguinte, a tensão retificada no elo CC se restabelecesse, a tensão na saída tornou-se nula.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

Somente no sentido de consolidar as constatações até aqui apresentadas, a figura 4.45 retrata o comportamento da corrente do sistema em função do distúrbio aplicado ao computador. Como já mencionado, mesmo ocorrendo o restabelecimento da tensão do sistema, a corrente torna-se zero, o que indica que o computador não está acionado, sendo necessário reinicializá-lo.

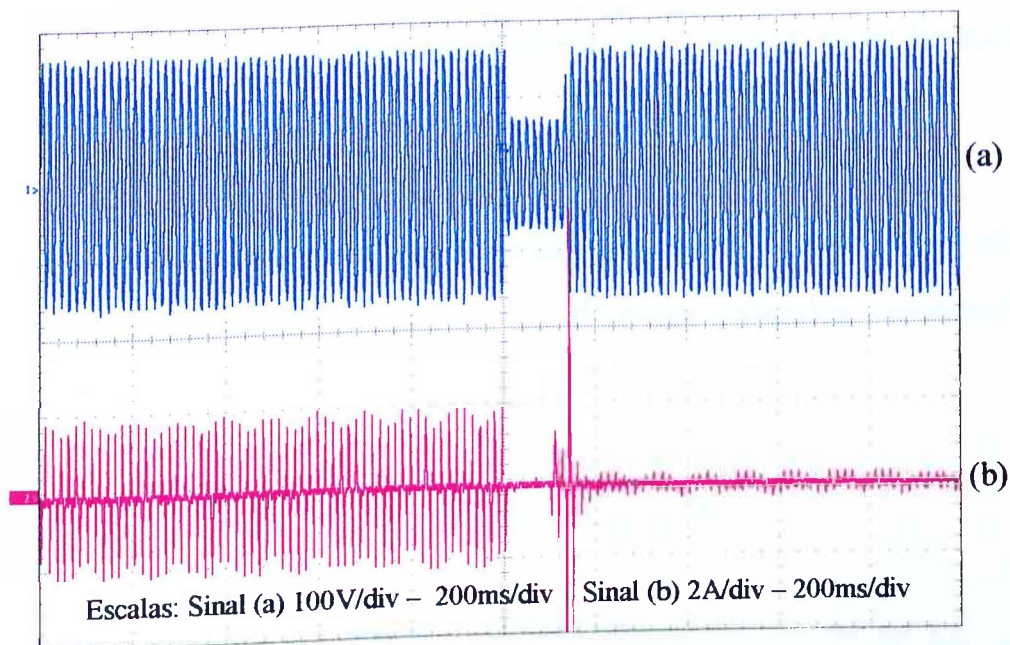


Figura 4.45 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Um Afundamento de Tensão de 55% Com Duração de 8 Ciclos – Experimental

Qualquer redução na tensão de suprimento, superior ou igual a 55%, tem seus resultados semelhantes aos mostrados anteriormente para o caso de afundamento de tensão de 55%, onde o limite de desligamento ocorre após sete ciclos, independente do percentual de afundamento, descaracterizando, portanto, a necessidade da apresentação de resultados para “sags” superiores a este patamar.

4.4.4. CASO 4 - INTERRUÇÃO DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os estudos experimentais e computacionais conduzidos nesta seção buscaram estabelecer os limites de vulnerabilidade da fonte chaveada, bem como do computador alimentado por ela, sob condição de interrupção no fornecimento de energia elétrica. Para tanto, a estratégia adotada foi alimentar o equipamento em estudo com valor nominal de tensão e provocar interrupções no suprimento, com durações que variaram de 0,5 ciclo até o instante em que o equipamento deixou de operar. Para este caso também serão apresentados apenas os resultados mais próximos dos limites, uma vez que este é o interesse da investigação.

4.4.4.1. INTERRUPÇÃO DO FORNECIMENTO DE TENSÃO COM DURAÇÃO DE 7 CICLOS

Os resultados mostrados a seguir estão atrelados à condição de interrupção supra identificada e ilustram o funcionamento das diversas unidades componentes do microcomputador.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

A tensão de suprimento fornecida pela fonte programável está ilustrada na figura 4.46 (a), enquanto em (b) da mesma figura está ilustrada a tensão na saída de 5 V.

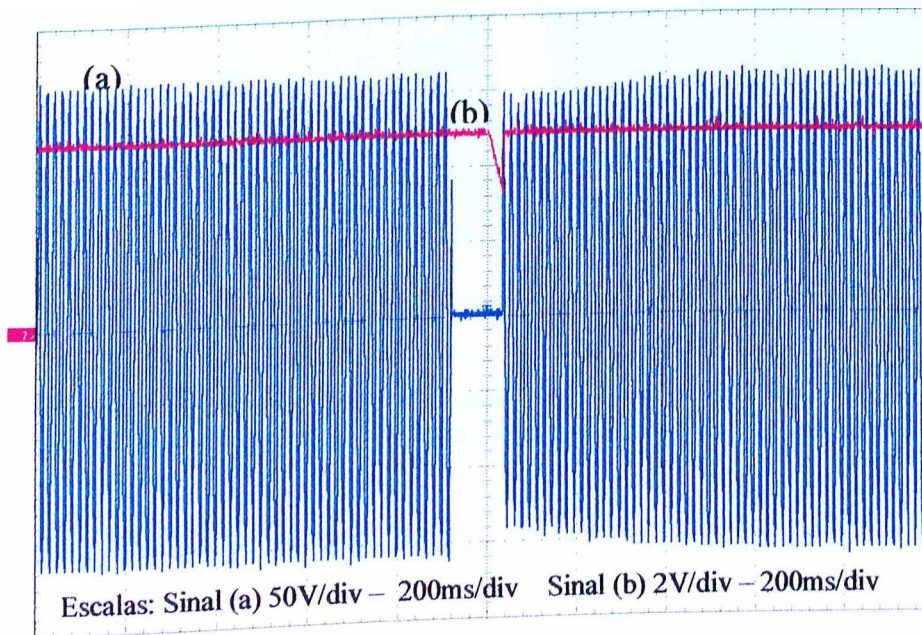


Figura 4.46 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

Assim como observado no caso em que ocorreu afundamento de tensão de 55%, a saída regulada foi afetada cerca de 4,5 ciclos após o início do distúrbio na entrada do equipamento. Após o término da interrupção do fornecimento de

energia, a tensão na saída volta ao seu valor normal, sendo que o computador não apresentou nenhum problema de funcionamento.

Para o caso computacional, como pode ser verificado na figura 4.47, o comportamento foi semelhante ao experimental, embora tenha ocorrido discrepância entre a forma de onda da tensão de saída simulada e a experimental, que assim como nos casos anteriores pode ser justificada por imprecisão no modelo computacional.

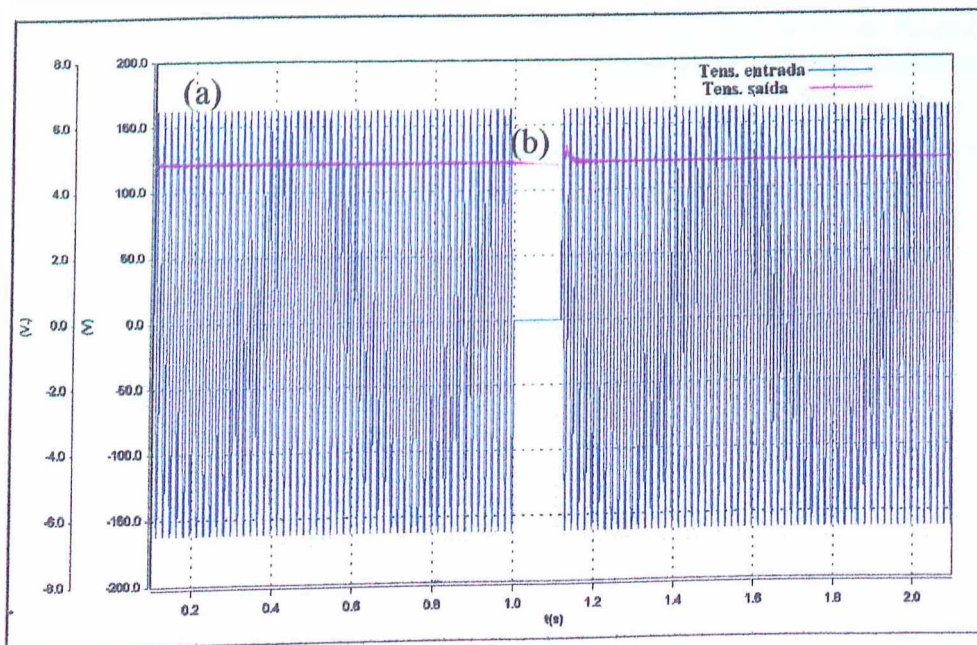


Figura 4.47 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

Os desempenhos experimental e computacional da tensão no elo CC e na saída de 5 V estão ilustrados nas figuras 4.48 e 4.49.

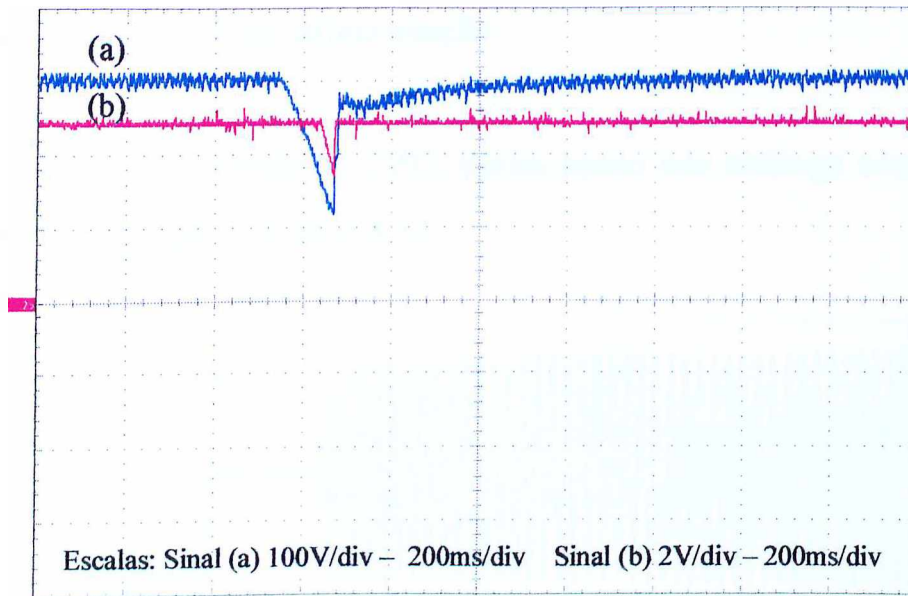


Figura 4.48 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

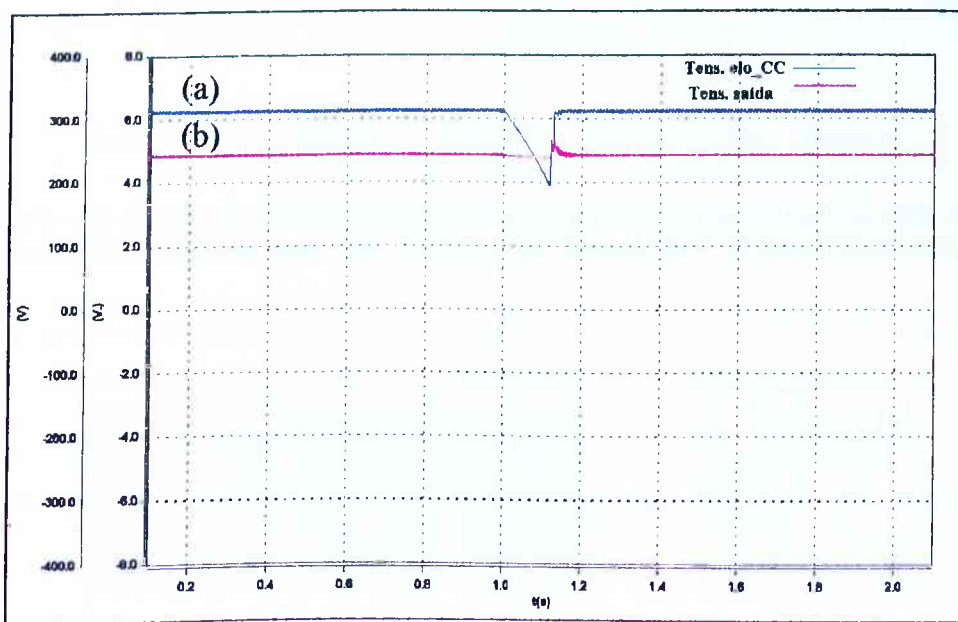


Figura 4.49 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

Novamente, embora a tensão na saída de 5 V tenha sido afetada pelo distúrbio imposto na entrada, o computador permaneceu funcionando normalmente durante a interrupção aplicada, caracterizando, desta maneira, que o mesmo suporta uma interrupção com duração de 7 ciclos.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

A corrente medida na entrada da CPU, assim como sua análoga computacional, estão ilustradas nas figuras 4.50 e 4.51.

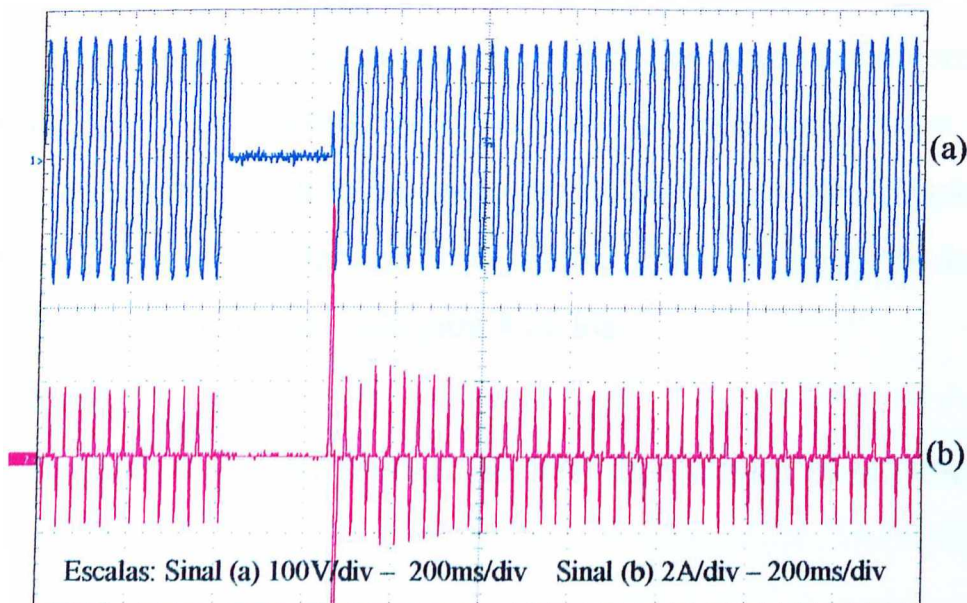


Figura 4.50 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Experimental

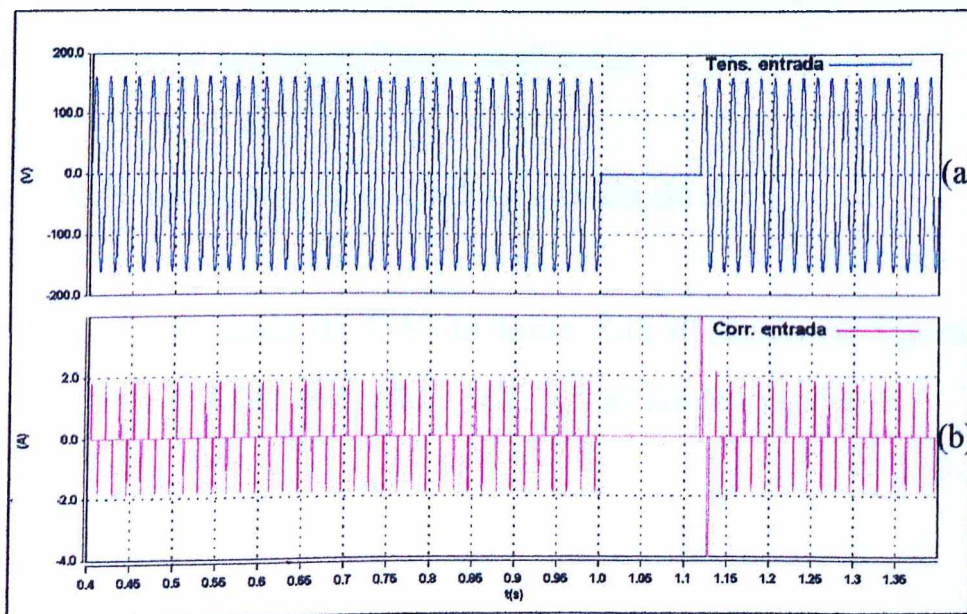


Figura 4.51 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 7 Ciclos – Computacional

Em ambas as figuras verifica-se o aparecimento de um considerável transitório de restabelecimento na corrente no momento em que a tensão do sistema volta a seu valor nominal, mostrando assim a semelhança entre os resultados experimental e computacional.

Muito embora não tenha sido pronunciado o efeito da interrupção com duração de 7 ciclos na operação do computador, a tensão de saída apresentou uma leve alteração, o que denota o início do problema causado pela interrupção. Assim sendo, na seqüência é realizada uma nova análise, com o aumento da duração do fenômeno aplicado à fonte chaveada para 8 ciclos.

4.4.4.2. INTERRUPÇÃO DO FORNECIMENTO DE TENSÃO COM DURAÇÃO DE 8 CICLOS

O computador alimentado pela fonte programável foi submetido, neste ensaio, a uma interrupção no fornecimento de tensão com duração de 8 ciclos. Os resultados obtidos são apresentados na seqüência.

a) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

O perfil da tensão na saída de 5 V da fonte está ilustrado na figura 4.52, que também contém a forma de onda da tensão fornecida pelo sistema.

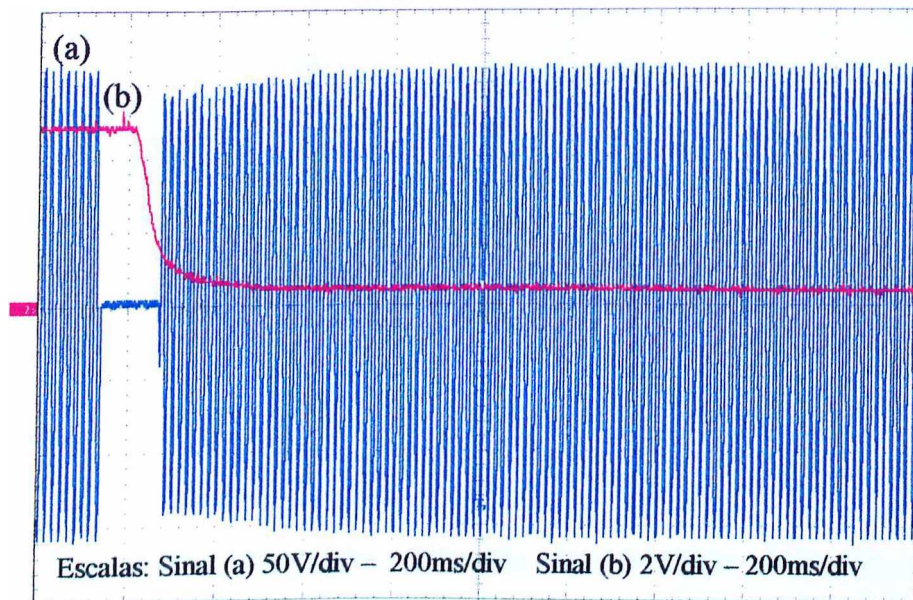


Figura 4.52 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 8 Ciclos – Experimental

A tensão de saída da fonte chaveada começa a ser afetada aproximadamente 4,5 ciclos após o início da interrupção, mesmo assim o computador continua funcionando normalmente até o sétimo ciclo, como observado no ensaio para interrupção com duração de 7 ciclos. Porém, no caso agora estudado, no oitavo ciclo, houve o desligamento do computador. Assim, após o restabelecimento da tensão CA de suprimento, a saída de 5 V CC tornou-se praticamente nula, caracterizando, desta forma, o desligamento do dispositivo.

b) Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V

Reforçando os comentários imediatamente anteriores, a figura a seguir ilustra o comportamento das tensões no elo CC e na saída de 5 V.

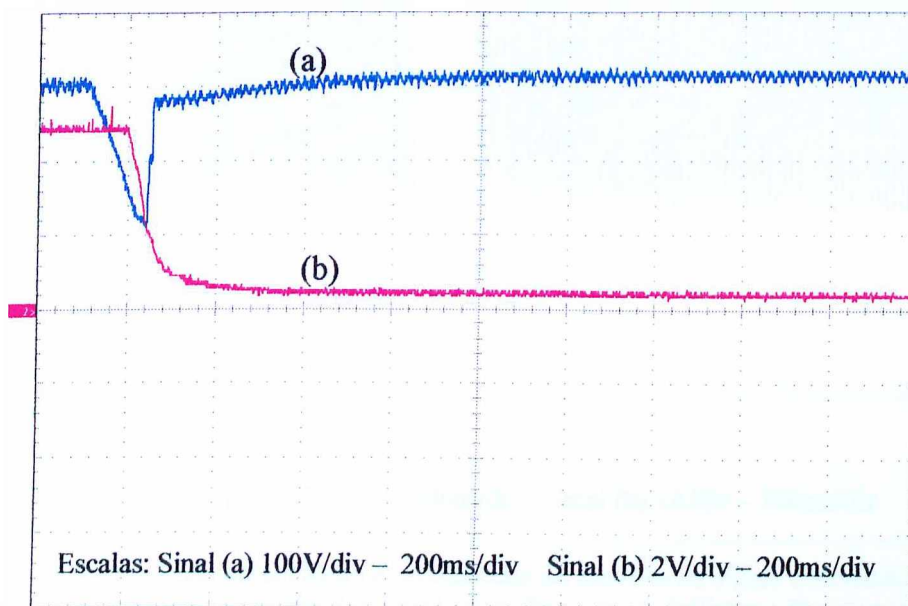


Figura 4.53 – (a) Tensão no Elo de Corrente Contínua e (b) Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 8 Ciclos – Experimental

Após o término da interrupção, a tensão retificada normaliza-se, entretanto, a tensão na saída não resgata seu valor anterior, caracterizando a paralisação da operação da saída da fonte chaveada e, conseqüentemente, o desligamento do computador.

c) Tensão e corrente CA de alimentação

Finalmente, demonstrando que realmente há uma paralisação de operação do computador, a figura 4.54 destaca a forma de onda da corrente de suprimento.

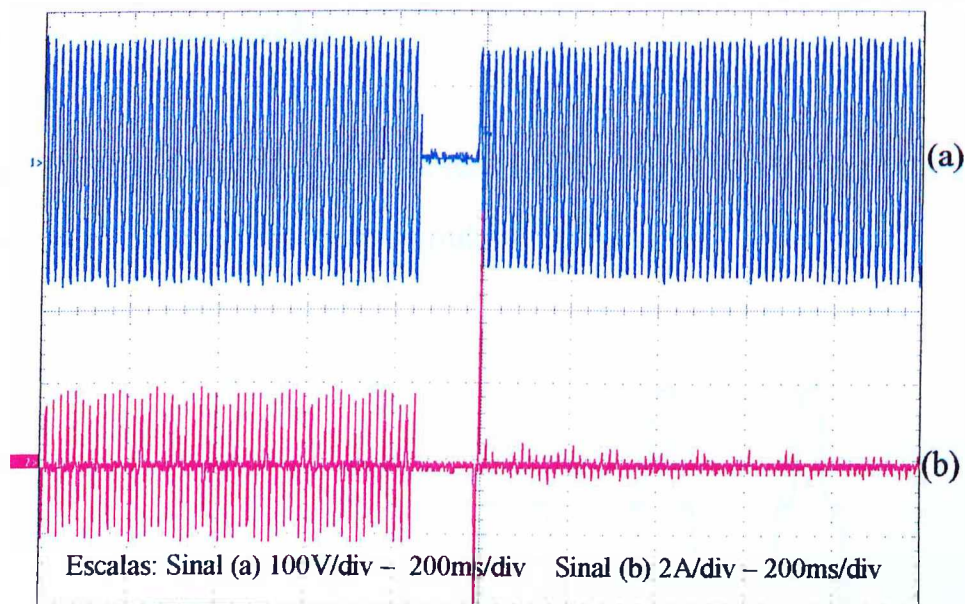


Figura 4.54 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Interrupção no Fornecimento de Energia Com Duração de 8 Ciclos – Experimental

Deve-se frisar que as análises computacionais, da mesma forma como no afundamento de tensão que culminou no desligamento do computador, não foram exploradas.

4.4.5. CASO 5 – SUPRIMENTO CONTENDO DISTORÇÃO HARMÔNICA DE TENSÃO

Os testes descritos na seqüência, também realizados de forma experimental e computacional, visam o conhecimento do inter-relacionamento entre a operação de um microcomputador e sua alimentação sob condições distorcidas de tensão. Para tanto foram realizados ensaios e simulações de forma tal que o suprimento apresentava-se com distorções harmônicas totais de tensão de 5%, 10% e 20%, respectivamente.

É importante salientar que os resultados gráficos são ilustrados apenas a situação mais crítica à qual o computador foi submetido, no caso, 20% de distorção harmônica. As demais análises são sintetizadas através de uma tabela comparativa, conforme será visto mais adiante.

a) Tensão CA de alimentação

As figuras 4.55 e 4.56 retratam, consecutivamente, as formas de onda das tensões aplicadas experimental e computacionalmente.

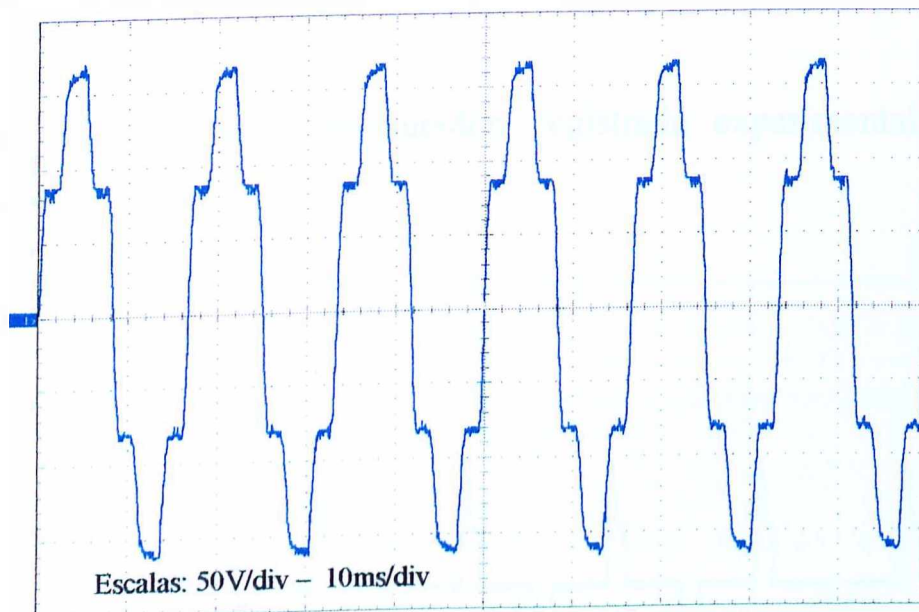


Figura 4.55 – Tensão de Alimentação Com DHT = 20% – Experimental

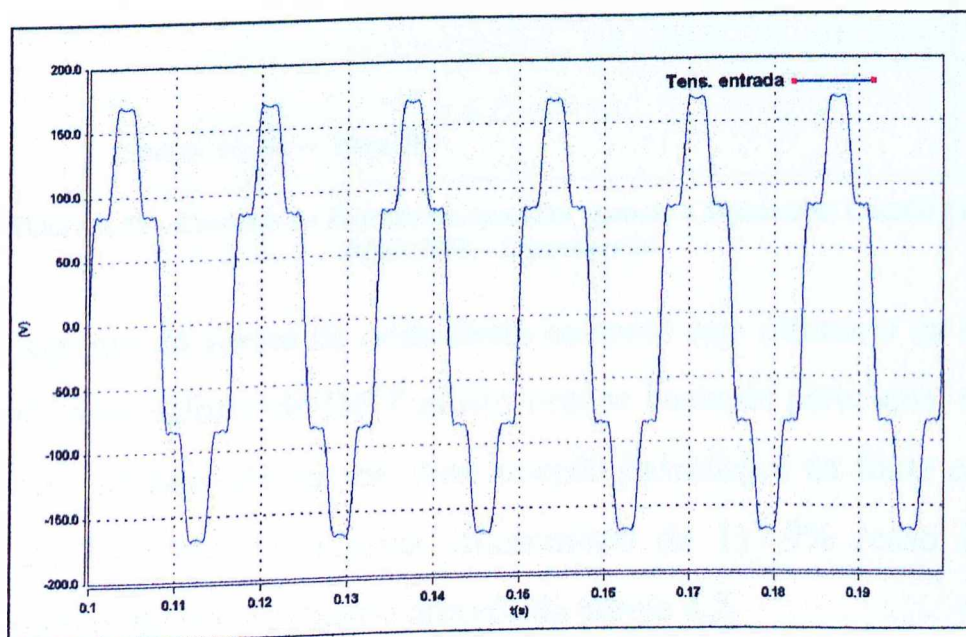


Figura 4.56 – Tensão de Alimentação Com DHT = 20% - Computacional

Com a imposição da tensão distorcida vista nas figuras anteriores aos terminais de alimentação do computador, procedeu-se a observação do comportamento das grandezas elétricas de interesse, as quais são apresentadas a seguir.

b) Corrente CA de alimentação

A corrente absorvida pelo computador, registrada experimentalmente, está ilustrada na figura 4.57.



Figura 4.57 – Corrente na Entrada do Aparelho Quando o Suprimento Contém Um DHT=20% – Experimental

Embora o aspecto da forma de onda desta corrente seja diferente da obtida para o caso ideal, seus valores de DHT mostraram-se bastante parecidos, devendo-se comentar que, no caso da análise com injeção harmônica na fonte chaveada, a distorção foi ligeiramente inferior, diminuindo de 117,9% (caso ideal) para 114,5%, como pode ser verificado através da tabela 4.2.

Na continuidade das análises, a figura 4.58 ilustra a forma de onda obtida computacionalmente.

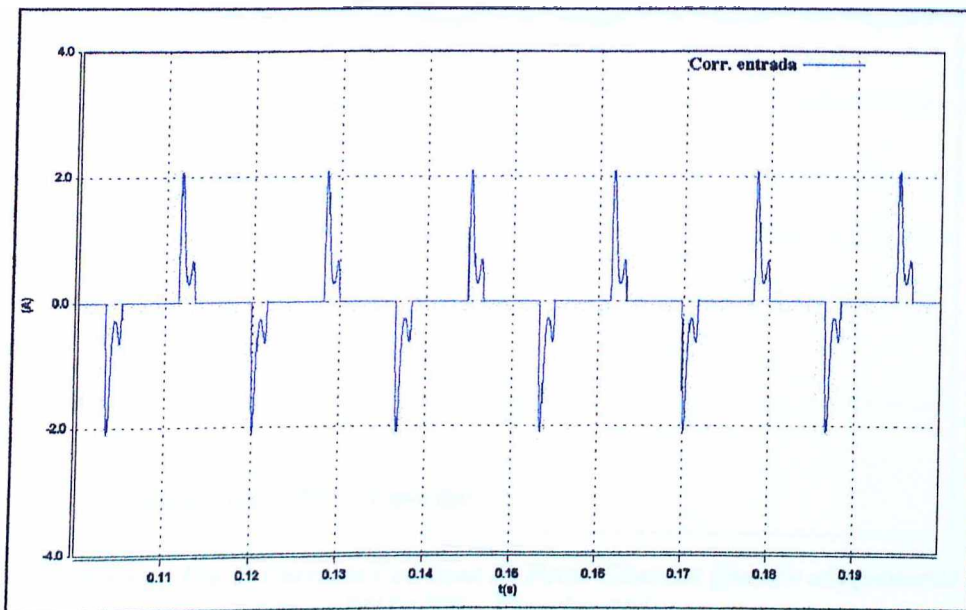


Figura 4.58 – Corrente na Entrada do Aparelho Quando o Suprimento Contém Um DHT=20% - Computacional

Comparando-se as formas de onda de corrente obtidas experimental e computacionalmente, nota-se, mais uma vez, haver uma forte semelhança entre ambas. Contudo, para o caso prático, o valor de DHT foi de 114,5%, enquanto que o caso computacional forneceu 161,6% de DHT. As prováveis causas das diferenças já foram oportunamente consideradas.

c) Tensão no elo de corrente contínua

As figuras 4.59 e 4.60 ilustram, respectivamente, o comportamento da tensão no elo de corrente contínua para o caso experimental e computacional.

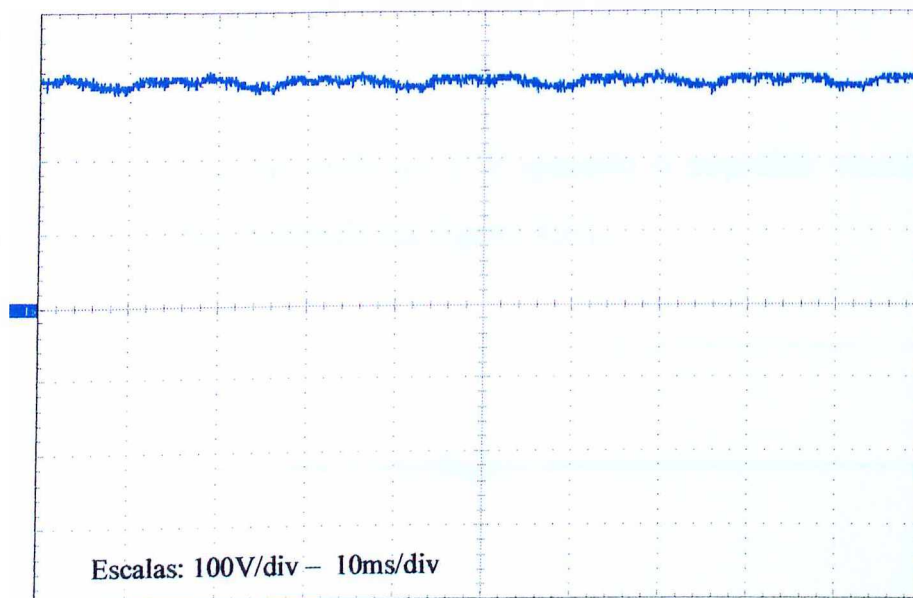


Figura 4.59 – Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Chaveada Quando o Suprimento Contém Um DHT=20% - Experimental

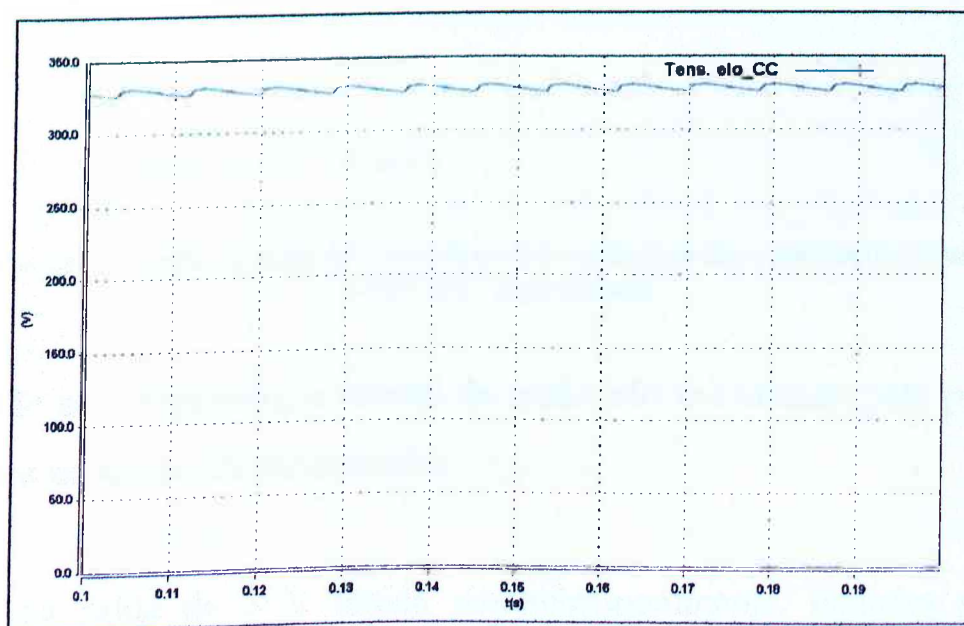


Figura 4.60 – Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Chaveada Quando o Suprimento Contém Um DHT=20% - Computacional

No caso experimental, o valor da tensão no elo CC, se comparado com o caso ideal, aumentou de 297 V para 304 V. Por outro lado, seu DHT teve uma pequena diminuição, caindo de 1,04% para 0,91%. O mesmo padrão de comportamento foi registrado para o caso computacional, ou seja, ocorreu um aumento na magnitude da tensão no elo CC, que era 311,5 V no caso ideal, passando para 328,6 V no caso simulado com injeção harmônica e seu DHT diminuiu de 0,8% (caso ideal) para 0,66%.

d) Tensão na saída de 5 V

O oscilograma da tensão na saída de 5 V quando o supridor contém distorção harmônica de tensão está ilustrada na figura 4.61.

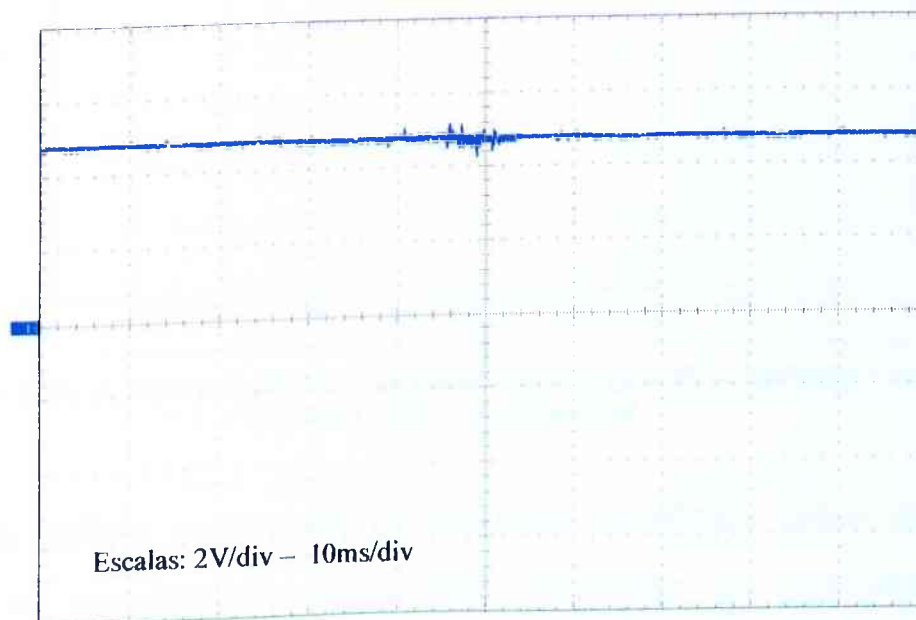


Figura 4.61 – Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Quando o Suprimento Contém Um DHT=20% - Experimental

Como pode ser observado, a tensão de saída não foi afetada pela presença de harmônicos na tensão de alimentação.

A tensão na saída de 5 V obtida computacionalmente, também não sofreu alterações apreciáveis, como pode ser verificado através da figura 4.62.

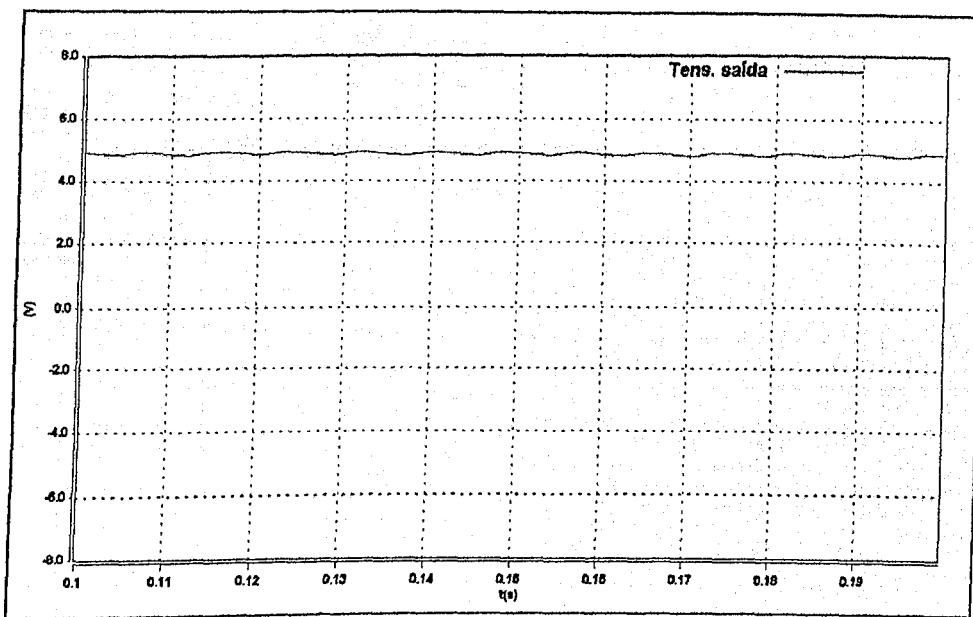


Figura 4.62 – Tensão na Saída de 5 V da Fonte Chaveada Quando o Suprimento Contém Um DHT=20% - Computacional

Outros dois índices percentuais de distorção harmônica foram aplicados aos terminais do computador, objetivando consolidar os resultados até aqui apresentados. As informações obtidas estão dispostas nas tabelas 4.2. e 4.3.

Tabela 4.2 – Quadro Resumo dos Valores Obtidos Experimentalmente

Resultados Experimentais								
	Ideal		DHT = 5%		DHT = 10%		DHT = 20%	
		DHT		DHT		DHT		DHT
Tensão de alimentação	113 V	1,2 %	113 V	5,02 %	113 V	9,82 %	113 V	19,74 %
Corrente na entrada	586 mA	117,9 %	571,0 mA	115,3 %	561,0 mA	114,0 %	552,0 mA	114,5 %
Tensão no elo_cc	297 V	1,04 %	295 V	0,98 %	299 V	0,95 %	304 V	0,91 %
Tensão na saída de 5V	4,8 V	–	4,76 V	–	4,76 V	–	4,75 V	–

Tabela 4.3 – Quadro Resumo dos Valores Obtidos Computacionalmente

Resultados Computacionais								
	Ideal		DHT = 5%		DHT = 10%		DHT = 20%	
		DHT		DHT		DHT		DHT
Tensão de alimentação	114,5 V	0 %	114,7 V	5 %	115,1 V	10 %	116,8 V	20 %
Corrente na entrada	516,4 mA	169,5 %	481,8 mA	159,6 %	468,5 mA	156,8 %	465,0 mA	161,6 %
Tensão no elo_cc	311,5 V	0,8 %	315,7 V	0,77 %	320,2 V	0,73 %	328,6 V	0,66 %
Tensão na saída de 5V	4,85 V	–	4,85 V	–	4,86 V	–	4,87 V	–

Como pode ser visto nas tabelas, apesar dos valores obtidos em ambos procedimentos de análise apresentarem um certo nível de diferença entre seus pares, o comportamento genérico de variação nos estudos computacionais foi o mesmo observado nos ensaios de bancada, o que permite concluir que, uma vez conhecendo-se todos os parâmetros do circuito real, é possível realizar simulações confiáveis e condizentes com a realidade.

4.4.6. CASO 6 - SUPRIMENTO COM OSCILAÇÕES DE TENSÃO

Neste estudo, o computador foi submetido a índices de oscilação de 1% , 5% e 10%, todos associados à uma frequência de 10 Hz. Contudo, somente os resultados relacionados ao percentual mais elevado são apresentados e discutidos, por se tratar da pior condição imposta ao equipamento.

a) Tensão e corrente CA de alimentação

As figuras 4.63 e 4.64 mostram, para os casos experimental e computacional respectivamente, em (a) a forma de onda da tensão de alimentação contendo

oscilação de tensão da ordem de 10%, e em (b) a forma de onda da corrente na entrada do equipamento para esta condição de suprimento.

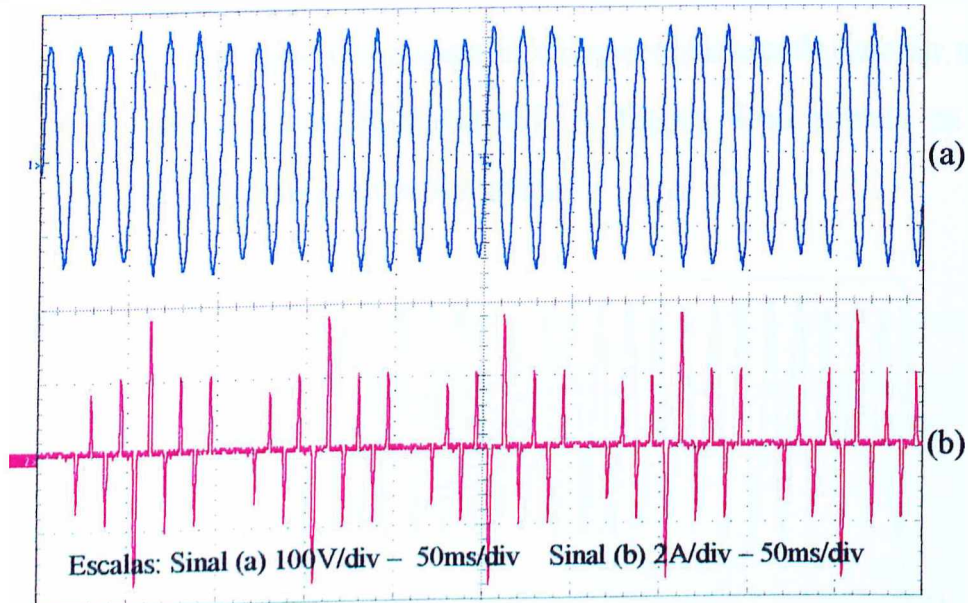


Figura 4.63 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Oscilação de Tensão de 10% – Experimental

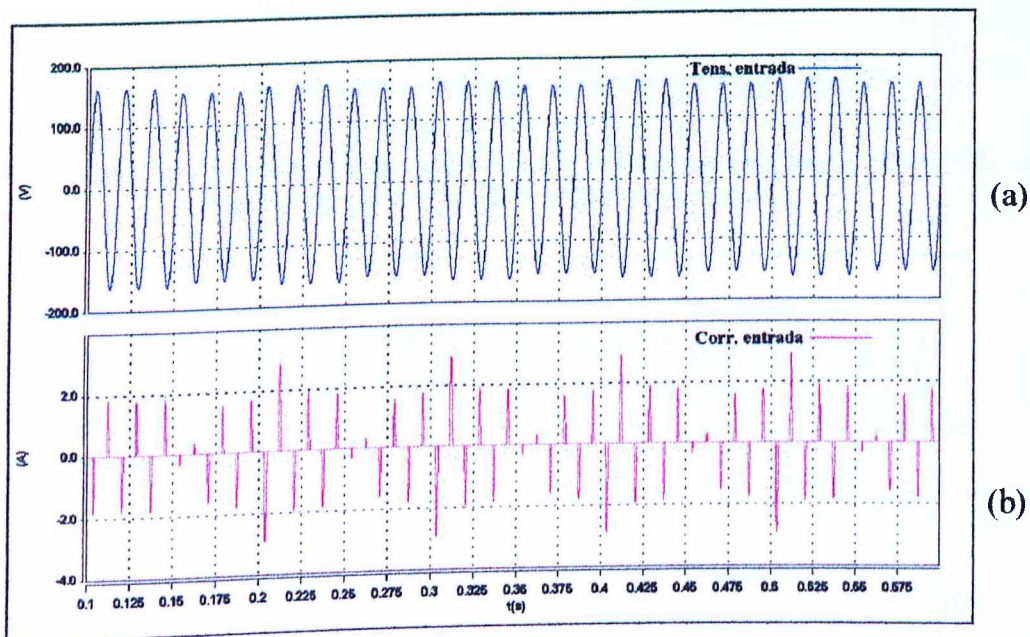


Figura 4.64 – Tensão de Alimentação e (b) Corrente na Entrada da Fonte Chaveada Para Uma Oscilação de Tensão de 10% – Computacional

É possível notar, tanto para o caso experimental como para o computacional, a presença da oscilação na tensão e também na corrente.

b) Tensão CA de alimentação e tensão no elo de corrente contínua

Na figura 4.65 é apresentada, mais uma vez, a tensão de entrada, destacada pelo oscilograma (a), enquanto que (b) ilustra o comportamento da tensão no elo de corrente contínua para o caso experimental. A figura 4.66 retrata as mesmas condições, porém, para o caso computacional.

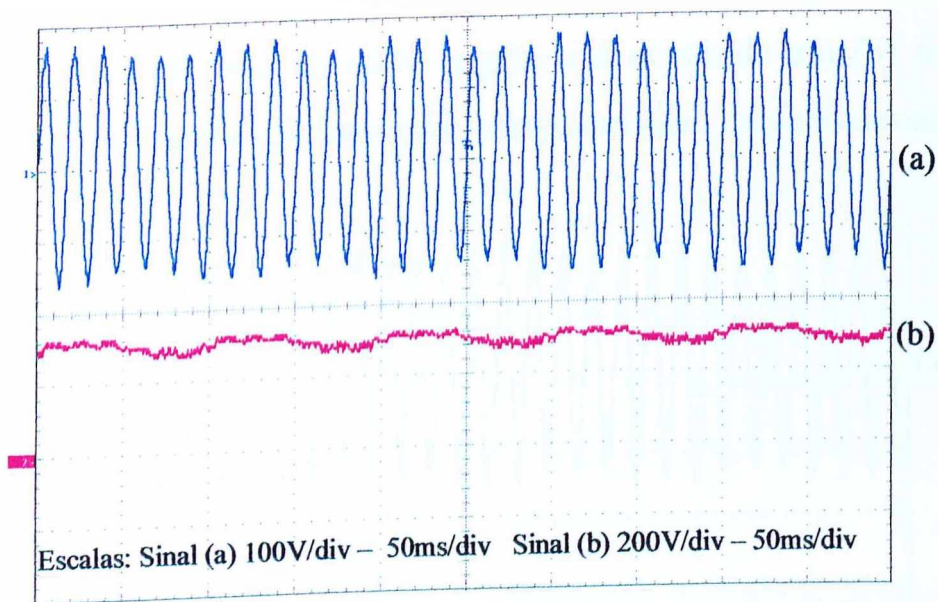


Figura 4.65 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Chaveada Para Uma Oscilação de Tensão de 10% – Experimental

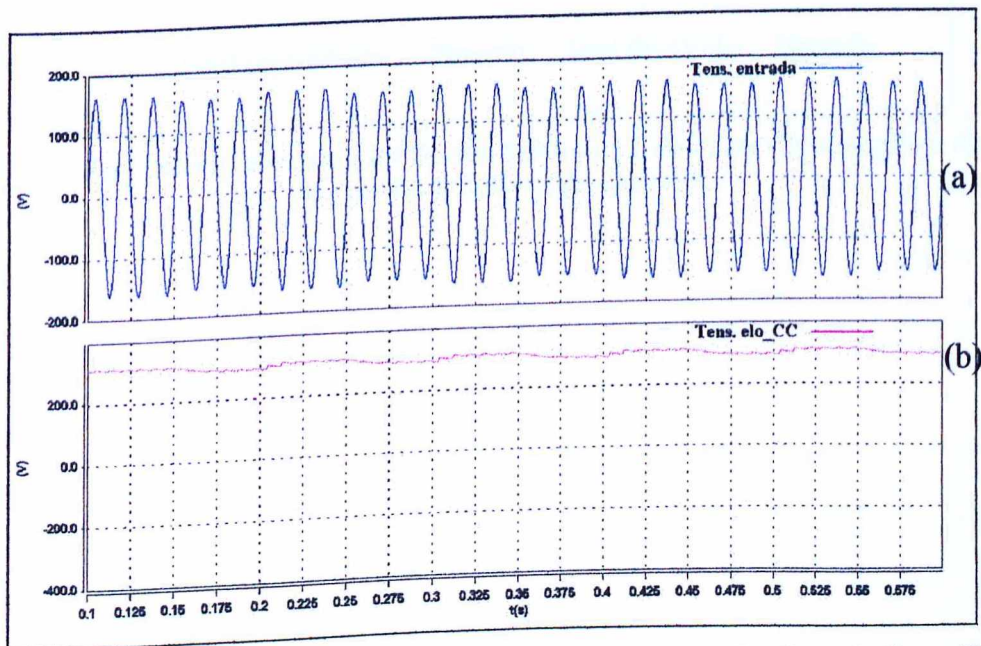


Figura 4.66 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão no Elo de Corrente Contínua da Fonte Chaveada Para Uma Oscilação de Tensão de 10% – Computacional

Com base nas figuras, é possível afirmar que a oscilação na tensão de alimentação é refletida para a tensão no elo de corrente contínua nas mesmas proporções da entrada. Assim sendo, torna-se conveniente verificar o comportamento da saída de 5 V, o que será realizado na seqüência.

c) Tensão CA de alimentação e tensão na saída de 5 V

O comportamento da tensão na saída regulada é mostrado em (b) nas figuras 4.67 e 4.68, para os casos experimental e computacional, respectivamente.

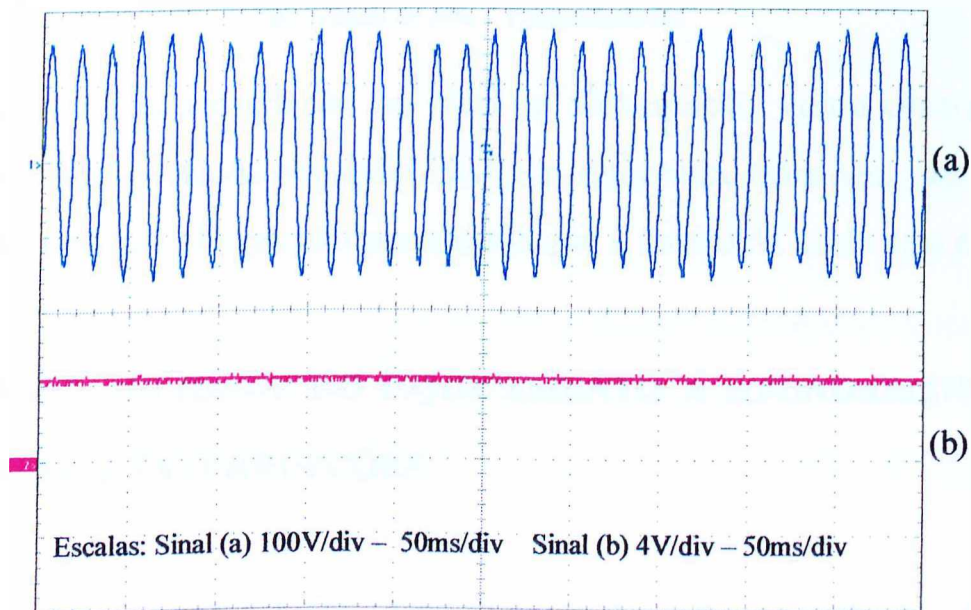


Figura 4.67 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Oscilação de Tensão de 10% – Experimental

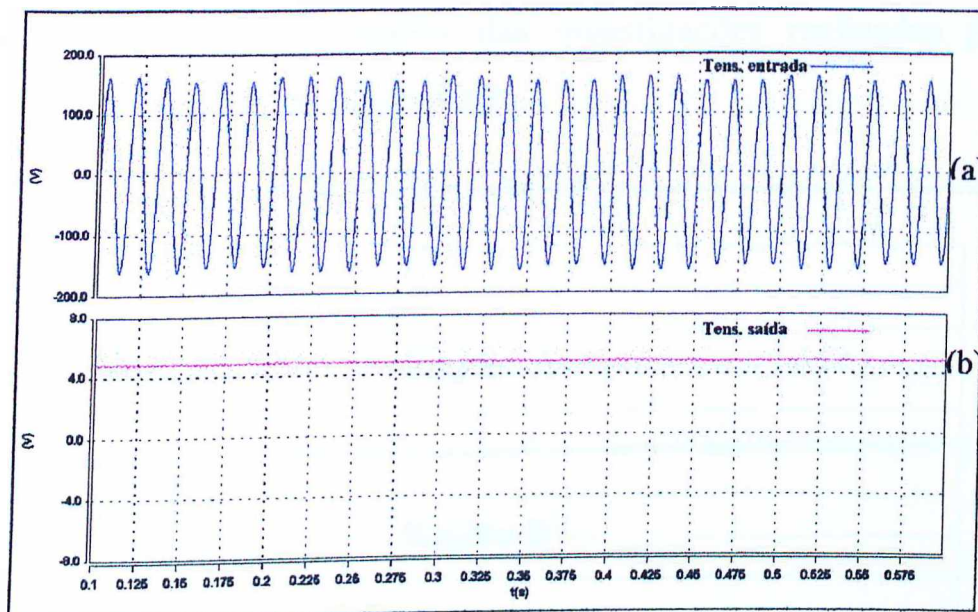


Figura 4.68 – (a) Tensão de Alimentação e (b) Tensão Saída de 5 V da Fonte Chaveada Para Uma Oscilação de Tensão de 10% – Computacional

Embora seja notória a oscilação no sinal de alimentação, como esperado, esta não se manifesta na saída regulada da fonte chaveada, uma vez que existe o controle que atua nas chaves não permitindo que a tensão na saída seja afetada.

4.5. SUPORTABILIDADE DO EQUIPAMENTO A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO E INTERRUPÇÕES

Ante aos resultados gerais obtidos, harmônicos, elevações e oscilações de tensão não são discutidos no que concerne à sensibilidade do computador. Deste modo, somente a curva de sensibilidade relativa a afundamentos de tensão de curta duração e interrupções no fornecimento de energia elétrica é apresentada.

Vale a pena lembrar que esta curva fundamenta-se nos pontos críticos para os quais o computador apresentou mudanças em seu estado operativo, que passou de ligado para desligado.

A tabulação dos valores extraídos das investigações realizadas permitiu o traçado da curva ilustrada na figura 4.69.

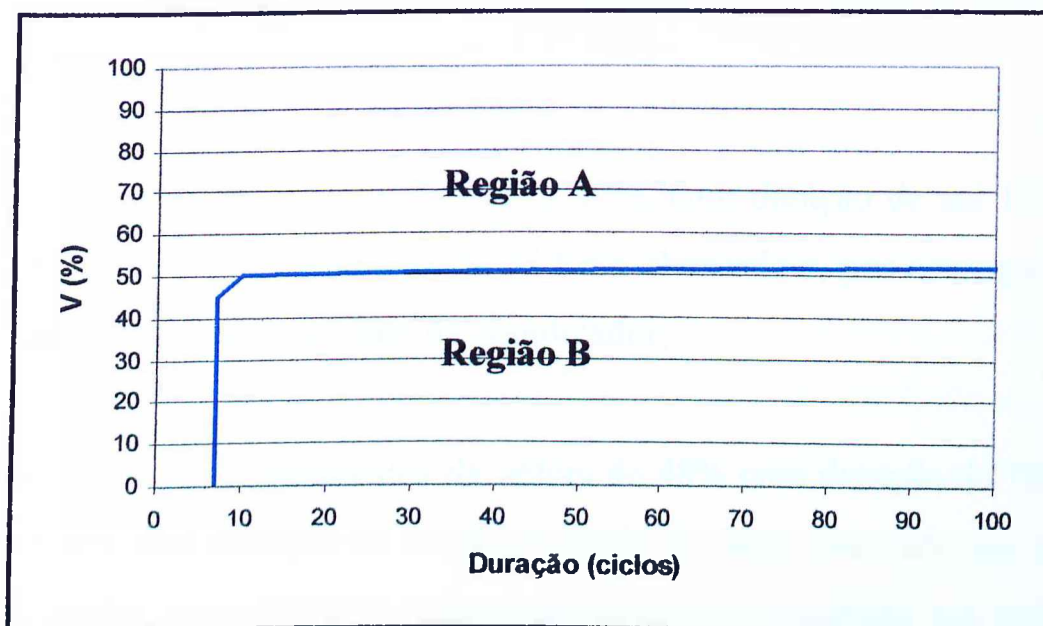


Figura 4.69 - Sensibilidade do Computador Alimentado Pela Fonte Chaveada Para Afundamentos de Tensão e Interrupções no Fornecimento de Energia

Na figura, a região “A” está associada ao funcionamento normal do computador, mesmo quando a tensão está abaixo do seu valor nominal. Por outro lado, a zona destacada por “B” está relacionada com desligamento completo do equipamento.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou, inicialmente, de forma resumida, os aspectos associados às características gerais e circuito equivalente da fonte chaveada do microcomputador submetido aos testes de qualidade de energia. Na sua continuidade, de forma análoga ao capítulo III, foram discutidas as estratégias adotadas para atingir os objetivos propostos. Subseqüentemente, foram realizadas investigações laboratoriais e computacionais, as quais propiciaram as seguintes conclusões:

- Os níveis de harmônicos, flutuações e elevações de tensão aplicados aos terminais do microcomputador não provocaram substanciais alterações no seu funcionamento, dispensando o levantamento de curvas de sensibilidade para os mesmos;
 - Afundamentos de tensão inferiores a 40%, com duração de até 100 ciclos, não são transferidos para a saída da fonte chaveada e, por conseguinte, não prejudicam o funcionamento do computador;
 - Por outro lado, afundamentos da ordem de 48% com duração de 100 ciclos provocam uma redução na tensão de saída da fonte chaveada em cerca de 10%, porém, sem prejuízos ao funcionamento do computador sob enfoque;
 - Para afundamentos de tensão de 50%, o computador opera normalmente por um período de aproximadamente 10 ciclos;
 - Quando ocorrem afundamentos de tensão superiores a 55%, o computador tem sua operação comprometida depois de 7 ciclos de duração do fenômeno;
 - Interrupções no fornecimento de energia provocam o desligamento do computador depois de aproximadamente 7 ciclos, assim como para afundamentos de tensão superiores a 55%;
 - Foram notadas algumas inconsistências entre os índices de sensibilidade aqui definidos e aqueles presentes na curva ITIC, que é a atual sucessora da CBEMA, conforme retrata a tabela a seguir:
-

Tabela 4 – Tabela Comparativa de Suportabilidade

	Afundamentos de tensão de curta duração		Elevações de tensão de curta duração		Interrupções
	Magnitude	Duração	Magnitude	Duração	Duração
ITIC	70%	30 ciclos	120%	30 ciclos	1,2 ciclos
Esta Pesquisa	52%	100 ciclos	120%	100 ciclos	7 ciclos

Considerando-se os valores contidos na tabela, constata-se a existência de divergências entre as sensibilidades definidas pela curva obtida e por aquela apresentada pela literatura. Este fato remete à conclusão de que não é possível haver uma curva de sensibilidade generalizada, uma vez que há uma variedade de projetos de fontes chaveadas;

- Sobre os estudos computacionais, que foram validados experimentalmente, pode-se afirmar que é possível analisar o desempenho de dispositivos e equipamentos elétricos através deste recurso. Contudo, é fundamental que os parâmetros exatos dos circuitos equivalentes a serem simulados sejam conhecidos, garantindo, desta forma, a fidelidade dos resultados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES GERAIS

Não obstante à existência de comentários conclusivos ao final de cada capítulo, é fundamental uma abordagem global do trabalho desenvolvido, a fim de proporcionar ao leitor uma visão ampla, rápida e sucinta da investigação como um todo. Neste sentido, este capítulo é voltado a apresentar uma síntese das principais constatações feitas nos capítulos anteriores, além de destacar as principais contribuições a respeito dos estudos aqui realizados.

O capítulo I mostrou, de uma maneira geral, o contexto energético atual brasileiro, a importância atual do tema Qualidade da Energia, uma revisão bibliográfica sobre o tema abordado neste estudo, além de ressaltar as lacunas a serem preenchidas dentro da sub-área específica enfocada pela presente dissertação. Adicionalmente, foram estabelecidos os objetivos gerais e a estrutura desta pesquisa de mestrado.

O capítulo II se prestou a mostrar um panorama global a respeito dos problemas de qualidade de energia elétrica. Na oportunidade, mostrou-se um resumo dos itens de qualidade, suas causas e efeitos, de onde conclui-se a abrangência e importância da área dentro do contexto da operação de Sistemas Elétricos. Na sua continuidade, o texto esclareceu e teceu comentários sobre o estado da arte das pesquisas voltadas ao desempenho/suportabilidade de equipamentos. Finalmente, foram apresentadas as principais diretrizes normativas previstas pela regulamentação brasileira, em vigor desde outubro de 2000. O documento

consultado corresponde a mais nova referência nacional sobre a questão e tem por origem e responsabilidade a ANEEL e o ONS.

O capítulo III abordou, inicialmente, os aspectos associados às características gerais e circuito equivalente da fonte linear do aparelho de som escolhido como alvo para as análises. Este exemplo prático constituiu-se numa clássica aplicação comercial das conhecidas fontes lineares disponibilizadas pelo mercado. Ainda, foram discutidas as estratégias e procedimentos experimentais e computacionais requeridos com vistas a atingir os objetivos propostos. Após isto, foram expostos e discutidos os resultados computacionais e de laboratório, com destaque para as divergências obtidas entre as curvas ITIC e os valores de suportabilidade levantados por este estudo. Outro ponto importante foi o processo de validação da modelagem computacional desenvolvida, a qual, para a grande maioria dos testes, se mostrou bastante confiável para os estudos de desempenho do equipamento enfocado na pesquisa.

O capítulo IV, voltado para estudos similares ao anterior, porém empregando como dispositivo foco uma fonte chaveada, empregou como exemplo de aplicação um microcomputador PENTIUM MMX – 200 MHz. O capítulo procurou então descrever suas principais características e a partir de tal reconhecimento, obteve o seu respectivo circuito equivalente. Posteriormente, foram definidas as estratégias e procedimentos no sentido de verificar o comportamento da carga ora mencionada diante de problemas da qualidade da energia. Os recursos laboratoriais foram os mesmos empregados anteriormente e, o computacional, também da mesma forma que antes, fundamentou-se no uso do simulador *SABER*. Por fim, foram mostrados e explanados os resultados dos estudos mencionados. Mais uma vez, as atenções foram voltadas para a semelhança entre os resultados laboratoriais e computacionais, confirmando ser esta última uma importante forma de auxílio para os especialistas da área de

Qualidade de Energia no sentido de se conhecer o desempenho do equipamento sob teste, e outros, dentro do contexto da qualidade da energia elétrica. Novamente, os desempenhos indicados pelos diversos oscilogramas obtidos e correspondentes valores mais característicos, também evidenciaram substanciais inconsistências entre os resultados aqui obtidos comparativamente à curva ITIC.

De um modo geral, os resultados obtidos para ambas as fontes, indicaram que, quer pelo lado computacional como também experimental, as fontes linear e chaveada se revelaram como dispositivos robustos e com fortes capacidades de suportar a maioria dos distúrbios típicos, sem qualquer alteração funcional significativa. Esta afirmativa se fundamentou nos índices de desempenho quanto a presença de harmônicos, elevações de tensão de curta duração e flutuações de tensão, dentro dos padrões freqüentemente presentes nos sistemas elétricos.

Não obstante ao acima afirmado, verificou-se que, sob a ação de afundamentos temporários de tensão e/ou interrupções momentâneas, conforme seus níveis e duração, a operação das citadas fontes já sofrem substanciais efeitos que variam deste uma operação temporariamente imprópria até seu completo desligamento. Um aspecto de grande relevância foi evidenciado para o que se denomina de grau de suportabilidade ou imunidade do equipamento ou fonte. Em outras palavras, os dispositivos mostraram possuir, como seria esperado, um certo nível de suportabilidade que resultam em que os mesmos, para certas situações de afundamento de tensão ou mesmo interrupção, continuam funcionando normalmente. Numa certa região, definida pelos níveis e duração dos afundamentos e/ou interrupções, inicia-se o processo da interferência, sem que isto implique em desligamentos e, a partir daí, o colapso funcional é inevitável. Estes resultados foram altamente significativos e traduzidos na forma de curvas de sensibilidade anexadas aos correspondentes capítulos.

Muito embora se reconheça que os valores numéricos obtidos sejam válidos e aplicáveis aos produtos testados, os mesmos são orientativos e não devem servir de referência para todo e qualquer outro equipamento similar aos testados. Para o estabelecimento de recomendações mais abrangentes torna-se necessário a realização de inúmeros testes de desempenho empregando-se uma larga variedade de equipamentos com características similares.

Outra contribuição merecedora de destaque e oferecida por esta pesquisa está relacionada com o desenvolvimento de uma modelagem computacional que foi validada através de correspondentes ensaios experimentais. Apesar das simplificações impostas aos modelos teóricos, ficou claro que, para a maioria dos ensaios e testes, as duas estratégias de simulação conduziram a desempenhos que, tanto qualitativa, como quantitativamente, se mostraram muito próximos.

Mesmo diante dos avanços oferecidos por esta dissertação, os desenvolvimentos e discussões feitos ao longo deste trabalho deixaram claro a existência de muitas lacunas a serem preenchidas. Assim, como sugestões para pesquisas futuras, destacam-se:

- A realização de aprimoramentos dos modelos de fontes lineares e chaveadas, de forma a contemplar melhores representações para os circuitos posteriores aos alimentadores CC regulados e não regulados;
 - Estudos com vistas ao estabelecimento de estratégias para melhorar o nível de suportabilidade dos equipamentos face aos padrões de afundamentos reais dos sistemas elétricos aos quais se encontram conectados;
 - Estudos mais abrangentes envolvendo outros tipos de fontes e procedimentos estatísticos para a obtenção de curvas de sensibilidade mais genéricas que aquelas aqui obtidas;
-

- Extensão dos procedimentos para outros tipos de dispositivos residenciais, comerciais e industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, EULER GUIMARÃES, “Desenvolvimento de *Softwares* Aplicativos para a Análise da Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, UFU, 1998.
 - [2] REID, W. EDUARD, “Power Quality Issues – Standards and Guidelines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, pp. 625-632, May/June 1996.
 - [3] PQTN Brief 39: “Ride-through Performance of Programmable Logic Controllers”, EPRI Power Electronics Applications Center, Knoxville, TN, November 1996.
 - [4] SMITH, J. C., LAMOREE, J., VINETT, P., DUFFY, T., and KLEIN, M., “The Impact of Voltage Sags on Industrial Plant Loads”, Int. Conf. Power Quality: End-use applications and perspectives (PQA-91), pp. 171-178.
 - [5] IEEE Recommended for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications, Std. 446. IEEE Orange Book, 1995.
 - [6] RIBEIRO, T. N., “Uma Discussão dos Critérios e Normas Relativos à Qualidade da Energia Elétrica”, Belo Horizonte – PUC – MG (Dissertação de Mestrado PPGEE – ago., 1998).
-

- [7] BRIEF 11, "Undervoltage Ride-Through Performance of Off-the-Shelf Personal Computers", EPRI Power Quality Database, Elforsk, Stockholm, Sweden, 1995.
- [8] SEKINE, Y., YAMAMOTO, T., MORI, S., SAITO, N., KUROKAWA, H., "Present State of Momentary Voltage Dip Interferences and the Countermeasures in Japan", Inc. Conf. On Large Electric Networks (CIGRE), 34th Session 1992, Paris, France.
- [9] ANDERSON, LISA M., NORTHEAST UTILITIES, AND BOWES, KENETH B., "The Effects of Power-Line Disturbances on Consumer Electronic Equipment", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, pp. 1062-1065, April 1990.
- [10] SMITH, STEPHEN B. AND STANDLER, RONALD B., "The Effects of Surges on Electronic Appliances", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, pp. 1275-1282, July 1992.
- [11] ARSENEAU, R., OUELLETTE, M., "The Effects of Supply Harmonics on the Performance of Compact Fluorescent Lamps", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, pp. 473-479, April 1993.
- [12] FUCHS, E. F., ROESLER, D. J. AND KOVACS, K. P., "Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power Systems Voltage. Part II: Television sets, Induction Watt-hour and Universal Machines" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, pp. 1275-1282, April 1987.
-

- [13] IEEE STD 1159, “Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, November, 1995
- [14] IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment, Std 1100, IEEE Emerald Book, 1992
- [15] FILHO, JOSÉ MARIA DE CARVALHO, “Uma Contribuição à Avaliação do Atendimento a Consumidores com Cargas Sensíveis – Proposta de Novos Indicadores”, Dissertação de Doutorado, EFEI, 2000.
- [16] BOLLEN, MATH H. J., Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press, 2000.
- [17] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Submódulo 2.2 – Padrões de Desempenho da Rede Básica”, Outubro, 2000.
- [18] Manual do aparelho de som modelo *E650*, da marca *Gradiente*.
- [19] Manual da fonte programável **HP**, modelo **HP6834A**.
- [20] DORR, DOUGLAS S., HUGHES, M. BRENT, GRUZS, THOMAS M. AND JUREWICZ, ROBERT E., “Interpreting Recent Power Quality Surveys to Define the Electrical Environment”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, pp.1480-1487, Nov./Dec., 1997.
-

-
- [21] GRUPO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA, “Apostila de Fontes Chaveadas”.
- [22] SANTOS, ANA C. D., OLIVEIRA, JOSÉ C., SANTOS, SILMÁRIO B., GONÇALVES, WALKYRIA K. A., “Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica”, IV SBQEE, pg. 127-132, Agosto, 2001.
- [23] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, “Submódulo 3.8 – Requisitos Mínimos Para a Conexão à Rede Básica”, Outubro, 2000.
-

ANEXO A
CASOS ESTUDADOS –
FONTE LINEAR

Anexo A-1 – Tabela Resumo – Condição Ideal de Suprimento

Caso 1 – Condição Ideal de Suprimento			
Grandeza	Figura	Página	Principais Observações
• Tensão de alimentação (experimental)	3.7	54	• $V_{RMS} = 219,0$ V • DHT = 0,5 %
• Tensão de alimentação (computacional)	3.8	54	• $V_{RMS} = 219,9$ V • DHT = 0,0 %
• Corrente na entrada (experimental)	3.9	55	• $V_{RMS} = 152$ mA • DHT = 72 %
• Corrente na entrada (computacional)	3.10	56	• $V_{RMS} = 154,3$ mA • DHT = 99,69 %
• Tensão no elo CC (experimental)	3.11	57	• $V_{RMS} = 27,2$ V • DHT = 1,92 %
• Tensão no elo CC (computacional)	3.12	57	• $V_{RMS} = 28,5$ V • DHT = 1,98 %
• Tensão na saída regulada (experimental)	3.13	58	• $V_{RMS} = 9,97$ V
• Tensão na saída regulada (computacional)	3.14	59	• $V_{RMS} = 9,57$ V
• Tensão na saída não regulada (experimental)	3.15	59	• $V_{RMS} = 18,8$ V • DHT = 8 %
• Tensão na saída não regulada (computacional)	3.16	60	• $V_{RMS} = 18,27$ V • DHT = 8,72 %

Anexo A-2 – Tabela Resumo – Suprimento com Elevação de Tensão de Curta Duração

Caso 2 – Supridor Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração			
Grandeza	Figura	Página	Magnitude da Elevação
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.17	62	• Elevação de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.18	62	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (experimental)	3.19	63	• Elevação de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (computacional)	3.20	64	
• Tensão de alimentação e tensão na saída não regulada (experimental)	3.21	65	• Elevação de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída não regulada (computacional)	3.22	65	

Anexo A-3 – Tabela Resumo – Suprimento com Afundamentos de Tensão de Curta Duração

Caso 3 – Supridor Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração			
Grandeza	Fig.	Pag.	Magnitude do Afundamento – Modo de Operação
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.23	68	• Afundamento de tensão de 60% com duração de 100 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.24	68	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (experimental)	3.25	69	• Afundamento de tensão de 60% com duração de 100 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (computacional)	3.26	70	
• Tensão de alimentação e tensão na saída não regulada (experimental)	3.27	71	• Afundamento de tensão de 60% com duração de 100 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio
• Tensão de alimentação e tensão na saída não regulada (computacional)	3.28	72	
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.29	73	• Afundamento de tensão de 63% com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.30	74	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (experimental)	3.31	75	• Afundamento de tensão de 63% com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (computacional)	3.32	75	
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.33	76	• Afundamento de tensão de 90% com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.34	76	
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.35	78	• Afundamento de tensão de 63% com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como reprodutor de CDs.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.36	79	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (experimental)	3.37	80	• Afundamento de tensão de 63% com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como reprodutor de CDs.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (computacional)	3.38	80	

Anexo A-4 – Tabela Resumo – Interrupção do Fornecimento de Energia

Caso 4 – Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica			
Grandeza	Figura	Página	Duração da Interrupção – Modo de Operação
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.39	82	• Interrupção com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.40	83	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (experimental)	3.41	84	• Interrupção com duração de 7 ciclos. • Equipamento funcionando como rádio.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (computacional)	3.42	84	
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.43	86	• Interrupção com duração de 6 ciclos. • Equipamento funcionando como reprodutor de CDs.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.44	86	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (experimental)	3.45	87	• Interrupção com duração de 6 ciclos. • Equipamento funcionando como reprodutor de CDs.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída regulada (computacional)	3.46	87	

Anexo A-5 – Tabela Resumo – Suprimento Com distorção Harmônica de Tensão

Caso 5 – Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão			
Grandeza	Figura	Página	Principais Observações
• Tensão de alimentação (experimental)	3.47	89	• $V_{RMS} = 219,0 \text{ V}$ • DHT = 19,85%
• Tensão de alimentação (computacional)	3.48	90	• $V_{RMS} = 224,3 \text{ V}$ • DHT = 20,0%
• Corrente na entrada (experimental)	3.49	91	• $V_{RMS} = 151,0 \text{ mA}$ • DHT = 70,5%
• Corrente na entrada (computacional)	3.50	92	• $V_{RMS} = 155,3 \text{ mA}$ • DHT = 96,2%
• Tensão no elo CC (experimental)	3.51	93	• $V_{RMS} = 28,7 \text{ V}$ • DHT = 1,73%
• Tensão no elo CC (computacional)	3.52	94	• $V_{RMS} = 30,48 \text{ V}$ • DHT = 1,82%
• Tensão na saída regulada (experimental)	3.53	95	• $V_{RMS} = 9,94 \text{ V}$
• Tensão na saída regulada (computacional)	3.54	95	• $V_{RMS} = 9,57 \text{ V}$
• Tensão na saída não regulada (experimental)	3.55	96	• $V_{RMS} = 19,4 \text{ V}$ • DHT = 20,6%
• Tensão na saída não regulada (computacional)	3.56	97	• $V_{RMS} = 19,11 \text{ V}$ • DHT = 22,58%

Anexo A-6 – Tabela Resumo – Suprimento Com Oscilação de Tensão

Caso 6 – Suprimento Com Oscilação de Tensão			
Grandeza	Figura	Página	Magnitude da Oscilação
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	3.57	99	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	3.58	99	
• Tensão de alimentação e tensão no elo de corrente contínua (experimental)	3.59	100	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão de alimentação e tensão no elo de corrente contínua (computacional)	3.60	100	
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (experimental)	3.61	101	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão de alimentação e tensão na saída regulada (computacional)	3.62	101	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída não regulada (experimental)	3.63	102	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída não regulada (computacional)	3.64	103	

ANEXO B
CASOS ESTUDADOS –
FONTE CHAVEADA

Anexo B-1 – Tabela Resumo – Condição Ideal de Suprimento

Caso 1 – Condição Ideal de Suprimento			
Grandeza	Figura	Página	Principais Observações
• Tensão de alimentação (experimental)	4.5	117	• $V_{RMS} = 113,0 \text{ V}$ • DHT = 1,2%
• Tensão de alimentação (computacional)	4.6	117	• $V_{RMS} = 114,5 \text{ V}$ • DHT = 0,0 %
• Corrente na entrada (experimental)	4.7	118	• $V_{RMS} = 586 \text{ mA}$ • DHT = 117,9%
• Corrente na entrada (computacional)	4.8	119	• $V_{RMS} = 516,4 \text{ mA}$ • DHT = 169,5%
• Tensão no elo CC (experimental)	4.9	120	• $V_{RMS} = 297 \text{ V}$ • DHT = 1,04%
• Tensão no elo CC (computacional)	4.10	121	• $V_{RMS} = 311,5 \text{ V}$ • DHT = 0,8%
• Tensão na saída de 5 V (experimental)	4.11	122	• $V_{RMS} = 4,8 \text{ V}$
• Tensão na saída de 5 V (computacional)	4.12	122	• $V_{RMS} = 4,85 \text{ V}$

Anexo B-2 – Tabela Resumo – Suprimento com Elevação de Tensão de Curta Duração

Caso 2 – Supridor Contendo Elevação de Tensão de Curta Duração			
Grandeza	Figura	Página	Magnitude da Elevação
• Tensão de alimentação e tensão no elo de corrente contínua (experimental)	4.13	124	• Elevação de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão no elo de corrente contínua (computacional)	4.14	124	
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.15	125	• Elevação de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.16	126	
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.17	126	• Elevação de tensão de 20% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	4.18	127	

Anexo B-3 – Tabela Resumo – Suprimento com Afundamentos de Tensão de Curta Duração

Caso 3 – Supridor Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração			
Grandeza	Figura	Página	Magnitude do Afundamento
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.19	128	• Afundamento de tensão de 40% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.20	129	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V(experimental)	4.21	130	• Afundamento de tensão de 40% com duração de 100 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.22	131	
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.23	131	• Afundamento de tensão de 40% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	4.24	132	
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.25	134	• Afundamento de tensão de 48% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.26	135	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V(experimental)	4.27	136	• Afundamento de tensão de 48% com duração de 100 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.28	136	
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.29	137	• Afundamento de tensão de 48% com duração de 100 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	4.30	138	
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.31	139	• Afundamento de tensão de 50% com duração de 10 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.32	140	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V(experimental)	4.33	141	• Afundamento de tensão de 50% com duração de 10 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.34	141	
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.35	142	• Afundamento de tensão de 50% com duração de 10 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	4.36	142	
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.37	144	• Afundamento de tensão de 50% com duração de 11 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V(experimental)	4.38	145	• Afundamento de tensão de 50% com duração de 11 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.39	146	• Afundamento de tensão de 50% com duração de 11 ciclos.

Anexo B-3 – Tabela Resumo – Suprimento com Afundamentos de Tensão de Curta Duração – Continuação

Caso 3 – Supridor Contendo Afundamento de Tensão de Curta Duração – Continuação			
Grandeza	Figura	Página	Magnitude do Afundamento
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.40	147	• Afundamento de tensão de 55% com duração de 7 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V(experimental)	4.41	148	• Afundamento de tensão de 55% com duração de 7 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.42	149	• Afundamento de tensão de 55% com duração de 7 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.43	150	• Afundamento de tensão de 55% com duração de 8 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V(experimental)	4.44	151	• Afundamento de tensão de 55% com duração de 8 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.45	152	• Afundamento de tensão de 55% com duração de 8 ciclos.

Anexo B-4 – Tabela Resumo –Interrupção do Fornecimento de Energia

Caso 4 – Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica			
Grandeza	Figura	Página	Duração da Interrupção
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.46	153	• Interrupção com duração de 7 ciclos.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.47	154	
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.48	155	• Interrupção com duração de 7 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.49	155	
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.50	156	• Interrupção com duração de 7 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	4.51	156	
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.52	158	• Interrupção com duração de 8 ciclos.
• Tensão no elo de corrente contínua e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.53	159	• Interrupção com duração de 8 ciclos.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.54	160	• Interrupção com duração de 8 ciclos.

Anexo B-5 – Tabela Resumo – Suprimento Com Distorção Harmônica de Tensão

Caso 5 – Suprimento Contendo Distorção Harmônica de Tensão			
Grandeza	Figura	Página	Principais Observações
• Tensão de alimentação (experimental)	4.55	161	• $V_{RMS} = 113,0 \text{ V}$ • DHT = 19,74%
• Tensão de alimentação (computacional)	4.56	161	• $V_{RMS} = 116,8 \text{ V}$ • DHT = 20,0 %
• Corrente na entrada (experimental)	4.57	162	• $V_{RMS} = 552,0 \text{ mA}$ • DHT = 114,5%
• Corrente na entrada (computacional)	4.58	163	• $V_{RMS} = 465,0 \text{ mA}$ • DHT = 161,6%
• Tensão no elo CC (experimental)	4.59	164	• $V_{RMS} = 304 \text{ V}$ • DHT = 0,91%
• Tensão no elo CC (computacional)	4.60	164	• $V_{RMS} = 328,6 \text{ V}$ • DHT = 0,66%
• Tensão na saída de 5 V (experimental)	4.61	165	• $V_{RMS} = 4,75 \text{ V}$
• Tensão na saída de 5 V (computacional)	4.62	166	• $V_{RMS} = 4,87 \text{ V}$

Anexo B-6 – Tabela Resumo – Suprimento Com Oscilação de Tensão

Caso 6 – Suprimento Com Oscilações de Tensão			
Grandeza	Figura	Página	Magnitude da Oscilação
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (experimental)	4.63	168	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão de alimentação e corrente na entrada (computacional)	4.64	168	
• Tensão de alimentação e tensão no elo de corrente contínua (experimental)	4.65	169	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão de alimentação e tensão no elo de corrente contínua (computacional)	4.66	169	
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (experimental)	4.67	170	• Oscilação de 10% com frequência de 10 Hz.
• Tensão de alimentação e tensão na saída de 5 V (computacional)	4.68	171	