

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA VALIDAÇÃO DO ATP PARA  
ANÁLISE DE PROBLEMAS RELACIONADOS À  
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**ORIENTADOR: ANÉSIO DE LELES FERREIRA FILHO**

**PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BRASÍLIA/DF: AGOSTO-2006**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**UMA CONTRIBUIÇÃO PARA VALIDAÇÃO DO ATP PARA  
ANÁLISE DE PROBLEMAS RELACIONADOS À  
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**CARLOS ALBERTO DE MIRANDA NASCIMENTO  
TIAGO MACHADO DE SIQUEIRA**

**PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO  
ELETRICISTA.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Anésio de Leles Ferreira Filho, Mestre (ENE-UnB) (Orientador)**

---

**Prof. Francisco Damasceno Freitas, Doutor (ENE-UnB)**

---

**Prof. Fernando Monteiro de Figueiredo, Doutor (ENE-UnB)**

**BRASÍLIA/DF, 04 DE AGOSTO DE 2006**

## **DEDICATÓRIA**

Dedicamos este trabalho a todos aqueles que tiveram participação nas atividades aqui desenvolvidas, em particular ao nosso orientador, professor Anésio de Leles Ferreira Filho.

Reservamos um agradecimento especial à equipe da Universidade Federal de Uberlândia que contribuiu, e muito, para que este projeto fosse possível, através de compartilhamento de dados experimentais e auxílio na utilização do ATP.

Um muito obrigado à nossa família que nos apoiou durante todo o curso de graduação e especialmente durante o esforço para a conclusão deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 – OBJETIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>2</b>
<b>2 – CONCEITOS BÁSICOS.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 – QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.1 – Considerações Iniciais .....</b>	<b>5</b>
<b>2.1.2 – Principais Distúrbios .....</b>	<b>9</b>
2.1.2.1 – VTCD .....	10
2.1.2.2 – Harmônicas .....	12
2.1.2.3 – Flutuação de Tensão .....	13
2.1.2.4 – Transitórios.....	13
2.1.2.5 – Desequilíbrios de tensão .....	14
<b>2.2 – O ATP .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1 - ATPDraw .....</b>	<b>15</b>
2.2.1.1 – Utilização do ATPDraw .....	16
2.2.1.2 – Definição de Componentes.....	17
2.2.1.3 – Executando a Simulação.....	19
2.2.1.4 – Representação Gráfica.....	21
2.2.1.5 – Análise Gráfica .....	23
2.2.1.6 – Considerações Finais .....	27
<b>3 – DESCRIÇÃO DOS APARELHOS E PROPOSTA DE TOPOLOGIA PARA SIMULAÇÃO NO ATP .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 – CARREGADOR DE <i>NOTEBOOK</i> .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.1 – Motivação .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1.2 – Escolha do Circuito Elétrico Equivalente .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1.3 – Estratégia para Simulação.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.4 – Modelagem Computacional.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.5 – Características do Equipamento Utilizado .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2 – CARREGADOR DE CELULAR.....</b>	<b>32</b>
<b>3.2.1 – Motivação .....</b>	<b>32</b>

3.2.2 – Escolha do Circuito Elétrico Equivalente .....	33
3.2.3 – Estratégia para Simulação.....	33
3.2.4 – Modelagem Computacional.....	34
3.2.5 – Características do Equipamento Utilizado .....	35
<b>4 – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL SOB CONDIÇÃO IDEAL</b>	
<b>DE SUPRIMENTO .....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 – FONTE DE CARREGADOR DE <i>NOTEBOOK</i> .....</b>	<b>36</b>
4.1.1 – Metodologia para Modelagem do Circuito .....	36
4.1.2 – Resultados Experimentais e Computacionais .....	37
<b>4.2 – CARREGADOR DE CELULAR.....</b>	<b>43</b>
4.2.1 – Metodologia para Modelagem do Circuito .....	43
4.2.2 – Resultados Experimentais e Computacionais .....	44
<b>5 – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL SOB CONDIÇÕES NÃO</b>	
<b>IDEAIS DE SUPRIMENTO.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1 – FONTE DE CARREGADOR DE <i>NOTEBOOK</i> .....</b>	<b>51</b>
5.1.1 – Tensões Harmônicas.....	51
5.1.2 – Flutuações de Tensão (“ <i>Flicker</i> ”).....	54
5.1.3 – Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD’s) .....	57
5.1.3.1 - Afundamento de Tensão de Curta Duração .....	57
5.1.3.2 - Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica .....	60
5.1.3.3 - Elevação de Tensão de Curta Duração.....	63
5.1.4 – Transitórios .....	66
<b>5.2 – FONTE DE CARREGADOR DE CELULAR.....</b>	<b>68</b>
5.2.1 – Tensões Harmônicas.....	69
5.2.2 – Flutuações de Tensão (“ <i>Flicker</i> ”).....	72
5.2.3 – Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD’s) .....	75
5.2.3.1 - Afundamento de Tensão de Curta Duração .....	75
5.2.3.2 - Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica .....	78
5.2.3.3 - Elevação de Tensão de Curta Duração.....	81
5.2.4 – Transitórios .....	85
<b>5.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>88</b>
<b>6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – As origens dos problemas de qualidade segundo consumidores (a) e concessionários (b).....	7
Figura 2.2 – Custos estimados para interrupção de processo por um intervalo inferior a um minuto.....	8
Figura 2.3 – Distúrbios de tensão relacionados à qualidade.....	9
Figura 2.4 – Afundamento temporário de tensão.....	10
Figura 2.5 – Elevação temporária de tensão.....	11
Figura 2.6 – Interrupção de fornecimento de tensão.....	11
Figura 2.7 – Distorção harmônica.....	12
Figura 2.8 – Flutuação de tensão.....	13
Figura 2.9 – Transitório.....	14
Figura 2.10 – Representação de circuito no ATPDraw.....	16
Figura 2.11 – Tela principal do ATPDraw.....	17
Figura 2.12 – Menu de seleção de componente.....	18
Figura 2.13 – Caixa de diálogo de um dispositivo RLC monofásico.....	18
Figura 2.14 – Caixa de diálogo de definição de parâmetros de simulação.....	19
Figura 2.15 – Menu: “ATP”.....	20
Figura 2.16 – ATP executando linhas de comando.....	20
Figura 2.17 – Comando “PLOTXY”.....	21
Figura 2.18 – Janela de seleção de nós para representação gráfica.....	22
Figura 2.19 – Representação de forma de onda de tensão.....	23
Figura 2.20 – Cursor localizando valor de pico.....	24
Figura 2.21 – Definição da frequência fundamental.....	25
Figura 2.22 – Seleção da opção de plotagem das componentes harmônicas de uma grandeza.....	25
Figura 2.23 – Forma de onda de tensão (à direita) e sua decomposição em componentes harmônicas (à esquerda).....	26
Figura 2.24 – Configurações do espectro de frequência.....	26
Figura 2.25 – Configuração utilizada para análise.....	27
Figura 3.1 – Diagrama de blocos funcional da fonte chaveada.....	29
Figura 3.2 – Esquema elétrico da fonte chaveada usada nas simulações.....	30
Figura 3.3 – Modelo computacional da fonte de carregador de notebook.....	31

Figura 3.4 – Foto da fonte de carregador de <i>notebook</i> disponibilizada para os estudos. ....	31
Figura 3.5 – Diagrama de blocos funcional da fonte chaveada.....	33
Figura 3.6 – Esquema elétrico da fonte chaveada usada nas simulações.....	34
Figura 3.7 – Modelo computacional da fonte de carregador de celular .....	34
Figura 3.8 – Foto da fonte de carregador de celular disponibilizada para os estudos.....	35
Figura 4.1 – Diagrama de blocos do arranjo utilizado em ensaios laboratoriais para análise de desempenho do carregador de <i>notebook</i> .....	37
Figura 4.2 – Formas de onda da tensão na entrada do carregador de <i>notebook</i> .....	39
Figura 4.3 – Formas de onda da corrente na entrada do carregador de <i>notebook</i> .....	40
Figura 4.4 – Espectros harmônicos da corrente na entrada do carregador de <i>notebook</i> .....	41
Figura 4.5 – Formas de onda da tensão contínua no elo CC .....	42
Figura 4.6 – Diagrama de blocos do arranjo utilizado em ensaios laboratoriais para análise de desempenho do carregador de celular.....	44
Figura 4.7 – Formas de onda da tensão na entrada do carregador de celular.....	46
Figura 4.8 – Formas de onda da corrente na entrada do carregador de celular. ....	47
Figura 4.9 – Espectros harmônicos da corrente na entrada do carregador de celular. ....	48
Figura 4.10 – Formas de onda da tensão contínua no elo CC. ....	49
Figura 5.1 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.....	52
Figura 5.2 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental.....	52
Figura 5.3 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimenta uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional. ....	53
Figura 5.4 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimenta uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental. ....	53
Figura 5.5 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Computacional.....	55
Figura 5.6 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Experimental.....	55
Figura 5.7 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Computacional. ....	56
Figura 5.8 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Experimental. ....	56
Figura 5.9 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.....	58

Figura 5.10 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.....	58
Figura 5.11 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.....	59
Figura 5.12 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação e sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.....	59
Figura 5.13 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 3 ciclos – Computacional.....	60
Figura 5.14 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 3 ciclos – Experimental.....	61
Figura 5.15 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Computacional.....	62
Figura 5.16 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Experimental.....	62
Figura 5.17 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 10 ciclos – Computacional.....	63
Figura 5.18 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 10 ciclos – Experimental.....	64
Figura 5.19 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.....	65
Figura 5.20 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.....	65
Figura 5.21 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional.....	66
Figura 5.22 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental.....	67
Figura 5.23 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional.....	67
Figura 5.24 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental.....	68
Figura 5.25 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.....	69
Figura 5.26 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental.....	70
Figura 5.27 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimenta uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.....	70

Figura 5.28 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimenta uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental. ....	71
Figura 5.29 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Computacional. ....	73
Figura 5.30 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Experimental. ....	73
Figura 5.31 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST=5 – Computacional. ....	74
Figura 5.32 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST=5 – Experimental. ....	74
Figura 5.33 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional. ....	76
Figura 5.34 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental. ....	76
Figura 5.35 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional. ....	77
Figura 5.36 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação e sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental. ....	78
Figura 5.37 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 10 ciclos – Computacional. ....	79
Figura 5.38 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 10 ciclos – Experimental. ....	79
Figura 5.39 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Computacional. ....	80
Figura 5.40 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Experimental. ....	81
Figura 5.41 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 10 ciclos – Computacional. ....	82
Figura 5.42 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 10 ciclos – Experimental. ....	83
Figura 5.43 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional. ....	84
Figura 5.44 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental. ....	84

Figura 5.45 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional. ....	85
Figura 5.46 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental. ....	86
Figura 5.47 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional. ....	87
Figura 5.48 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental. ....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais características do carregador de notebook.....	32
Tabela 3.2 – Principais características do carregador de celular.....	35
Tabela 4.1 – Síntese dos resultados obtidos do carregador de <i>notebook</i> – condições ideais e nominais de suprimento.....	38
Tabela 4.2 – Quadro comparativo entre os resultados computacionais e experimentais – condições ideais e nominais de suprimento.....	43
Tabela 4.3 – Síntese dos resultados obtidos do carregador de celular – condições ideais e nominais de suprimento.....	45
Tabela 4.4 – Quadro comparativo entre os resultados computacionais e experimentais – condições ideais e nominais de suprimento.....	50
Tabela 5.1 – Síntese das grandezas observadas – distorções harmônicas de tensão.....	54
Tabela 5.2 – Síntese das principais grandezas observadas para uma oscilação de tensão – PST = 5.....	57
Tabela 5.3 – Síntese das grandezas observadas – distorções harmônicas de tensão.....	72
Tabela 5.4 – Síntese das principais grandezas observadas para uma oscilação de tensão – PST = 5.....	75

# **1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A energia elétrica é indispensável ao ser humano na modernidade. No princípio de sua utilização, os aparelhos eram simples e quase sempre representados por cargas lineares. Deste fato, adquiria-se algumas vantagens considerando-se que estes dispositivos não afetavam, de forma significativa, a qualidade da energia elétrica da rede. Porém, a sociedade moderna demandou novos mecanismos para que se pudesse ter uma maior eficiência no processo produtivo. Foram criados equipamentos elétricos que usualmente empregam sistemas de controle e comando baseados em microprocessadores e componentes de eletrônica de potência.

A partir daí, o uso eficiente e racional da energia elétrica e a eletrônica de potência desenvolveram-se rapidamente. Aliado a isto, tais cargas passaram a ocupar uma parcela substancial de toda potência instalada em uma instalação típica, abrangendo os setores de âmbito residencial, comercial e industrial. [OLIVEIRA, 2005]

Ademais, este tipo de carga possui características intrínsecas ao seu princípio de funcionamento que caracterizam-se como motivos de grande preocupação por parte de todos os agentes do setor elétrico. Elas são causadoras de deterioração da energia elétrica suprida, principalmente pela geração de harmônicas de diversas ordens, com efeitos tanto sobre a forma de onda de tensão como da amplitude desta. Há ainda de se considerar que estas mesmas cargas não-lineares são também altamente sensíveis a alterações da qualidade do suprimento, demandando uma qualidade de onda de tensão cada vez mais elevada. [OLIVEIRA, 2005]

Percebe-se, então, a necessidade de estudar os distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica e seus efeitos sobre a rede e sobre os equipamentos elétricos. Alterações que possam ocorrer tanto na frequência como na amplitude da onda de tensão e de corrente devem ser observadas e diagnosticadas para que se possa saber onde agir para se corrigir o erro. Cabe ressaltar que fatores econômicos relacionados à qualidade da energia também merecem atenção. As perdas referentes às interrupções de processos, perdas de produção, perdas de insumos e custos relacionados à mão-de-obra e reparo de equipamentos geram grandes prejuízos aos consumidores.

Em uma outra frente, muito se discute acerca da atribuição de responsabilidade por danos causados pela má qualidade de energia elétrica. Entretanto, não há uma legislação que seja específica deste assunto. Órgãos reguladores e de controle do sistema elétrico já vêm buscando solução para esta questão por meio de pesquisas em conjunto com Universidades e Institutos de Pesquisas do país. Desta forma, poder-se-á estabelecer uma maneira de avaliar a quem cabe ressarcir os danos elétricos causados pela perturbação do sistema elétrico.

Como ferramenta de auxílio para análise técnica de pedidos de ressarcimento a consumidores, a simulação computacional tem sido bastante usada. Através da correta modelagem de sistemas físicos reais pode-se prever qual será sua reação a determinadas perturbações na rede. Com isto, torna-se possível reduzir custos e aperfeiçoar análises sempre que necessário.

A escolha correta do programa de simulação dos modelos é muito importante. Ele deve ter uma interface gráfica amigável para facilitar a interação com o usuário e ser bastante confiável.

O ATP (Alternative Transient Program) é o principal *software* utilizado para simulação de transitórios em meio acadêmico e de empresas. Ele será utilizado como base computacional nesse trabalho. Através dele serão modelados e simulados aparelhos eletrodomésticos com o fim de se obter a melhor correspondência possível à realidade.

## **1.2 – OBJETIVOS E ESTRUTURA DO TRABALHO**

Por meio deste trabalho, objetiva-se analisar a viabilidade do uso do ATP para aplicação em problemas envolvendo distúrbios que afetam a qualidade da energia. Caso as respostas encontradas sejam legitimadas como uma boa aproximação do que ocorre na realidade, o projeto ajudará na construção de uma forma simples e segura de analisar efeitos provindos de distúrbios na rede elétrica em aparelhos eletro-eletrônicos usados no dia-a-dia. As simulações computacionais aliadas a ensaios experimentais destes dispositivos podem assegurar que este estudo seja confiável do ponto de vista dos resultados elétricos que se espera encontrar.

Em vista disto, faz-se necessária a validação de modelos para serem utilizados em ambiente computacional, para que se tenha certeza de que as respostas dos circuitos sejam as mesmas neste caso, se comparadas àquelas encontradas em ensaios laboratoriais.

Diante destes fatos, optou-se pela escolha de dois dispositivos a serem estudados e cujos modelos computacionais serão validados para simulação via ATP. Os aparelhos contemplados são o carregador de *notebook* e o carregador de celular, ambos amplamente utilizados na atualidade.

A validação computacional dos modelos extraídos dos circuitos reais destes equipamentos levará em conta o suprimento ideal e o não-ideal, que contará com a presença dos seguintes distúrbios:

- Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's), que inclui:
  - Afundamento de tensão;
  - Interrupção de fornecimento;
  - Elevação de tensão;
- Flutuação de tensão;
- Harmônicas e;
- Transitórios.

Para melhor entendimento da metodologia utilizada na elaboração do presente estudo, apresenta-se, a seguir, a estrutura em que este trabalho foi realizado.

No Capítulo 2, serão abordados alguns tópicos relacionados à qualidade de energia como: definições de distúrbios, causas e conseqüências de alguns fenômenos. Trata-se, também, do funcionamento do ATP e de como essa ferramenta computacional ajuda na modelagem de aparelhos e desenvolvimento de técnicas de análise. No Capítulo 3, há uma descrição dos aparelhos pesquisados e da topologia utilizada para simulação no ATP. O Capítulo 4 apresenta a validação dos modelos utilizados a partir de uma alimentação senoidal. Comparando-se resultados obtidos experimentalmente e resultados de simulações, pode-se comprovar se o modelo é realmente eficaz para tal aplicação. O Capítulo 5 também mostra validação de modelos, porém para entradas de tensão que apresentam distúrbios de qualidade de energia. Este capítulo representa grande parte do esforço deste trabalho. Ele contém resultados que podem ajudar a elaborar uma futura metodologia de análise com

vistas à necessidade de se ressarcir ou não o consumidor cujos aparelhos foram danificados pela presença de distúrbios na rede elétrica. E finalmente, no Capítulo 6, o documento apresenta considerações finais e conclusões do trabalho desenvolvido.

## **2 – CONCEITOS BÁSICOS**

Para compreensão dos objetivos que envolvem este trabalho, é necessária uma apresentação dos fenômenos que constituem a qualidade da energia e o *software* de simulação ATP. O presente capítulo abordará os principais conceitos concernentes à supracitada área da engenharia elétrica, bem como ao programa computacional mencionado.

Através de alguns exemplos, serão ilustrados, conteúdos que subsidiarão as análises previstas para os capítulos posteriores.

### **2.1 – QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

#### **2.1.1 – Considerações Iniciais**

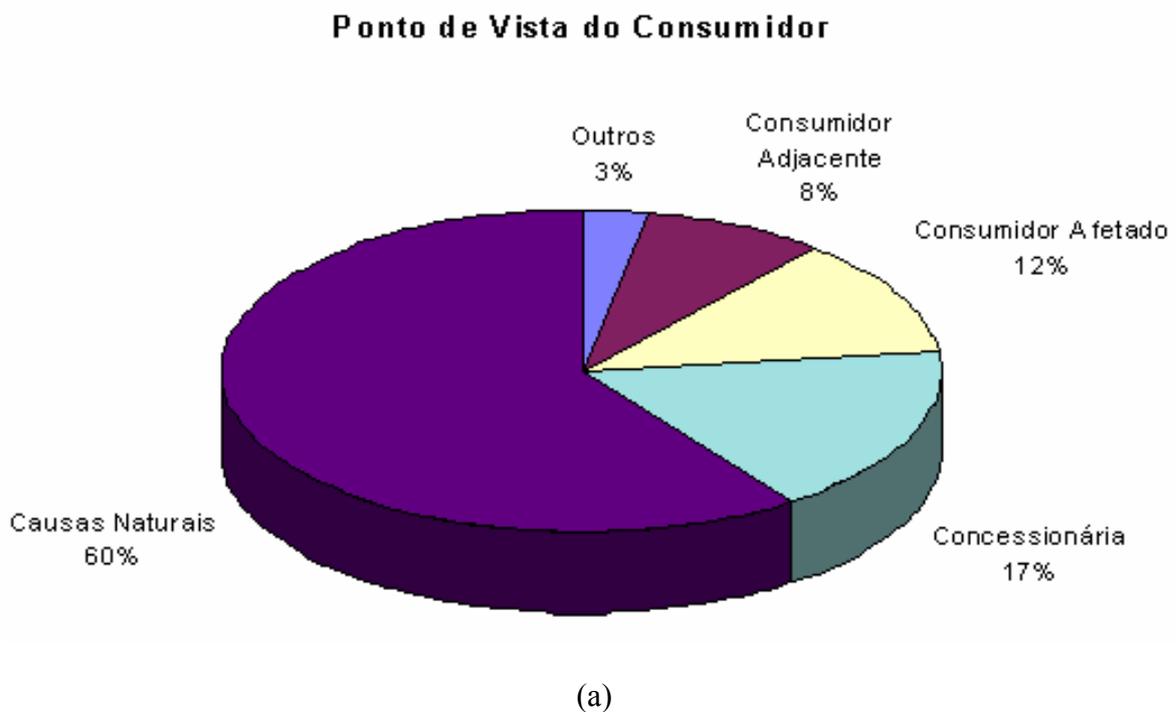
A qualidade de energia elétrica, apesar de representar um conceito amplamente utilizado, pode ser considerada uma nova área de pesquisa da energia elétrica. Esta nova área engloba a análise, o diagnóstico e a solução, assim como o impacto econômico de toda e qualquer anomalia no sistema. Caracterizam-se como anomalias as alterações na tensão, na corrente ou na frequência que resultam em falha ou má operação de equipamentos industriais, comerciais e residenciais. [OLIVEIRA, 2005]

Entretanto, quase sempre, na análise de um sistema elétrico baseado na qualidade consideram-se duas grandezas elétricas: a frequência e a tensão. A frequência por ser um parâmetro praticamente constante, somente é acometida a desvios na presença de grandes distúrbios como descargas elétricas, perdas de linhas de transmissão ou perdas de carga ou de geração. Já quanto à análise de tensão, três aspectos devem ser observados: distorções na forma de onda senoidal; existência de simetria no sistema elétrico trifásico; e magnitude das tensões, verificando-se os limites toleráveis.

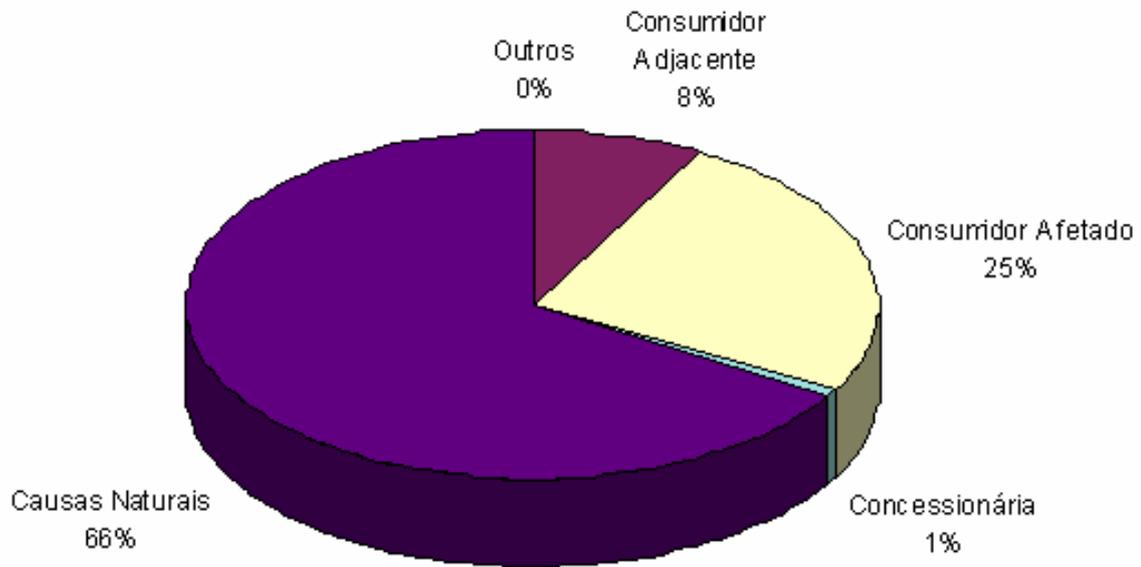
Hoje, o interesse crescente em estudar e aprimorar a qualidade da energia está ligado ao desejo de ganhos cada vez maiores na produtividade, tanto por parte das concessionárias como dos consumidores. Para que isso seja possível, equipamentos cada vez mais sofisticados são desenvolvidos. Curiosamente, o equipamento instalado para trazer maior

produtividade é exatamente o mesmo que se mostra mais sensível aos distúrbios presentes no sistema elétrico. [OLIVEIRA, 2005]

Os prejuízos econômicos resultantes destes e de outros problemas dos sistemas elétricos são muito elevados, e por isso a questão da qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais é, mais do que nunca, objeto de grande preocupação. Porém, não existe uma legislação clara e específica acerca da atribuição de culpa por falhas na qualidade da tensão fornecida. Por isso, concessionárias e consumidores muitas vezes se esbarram em um impasse sobre quem deve ser o responsável pelo ressarcimento pelas perdas de produtividade. As figuras 2.1 (a) e (b) mostram a opinião de concessionárias e consumidores quanto à origem de problemas de qualidade.



### Ponto de Vista do Concessionário



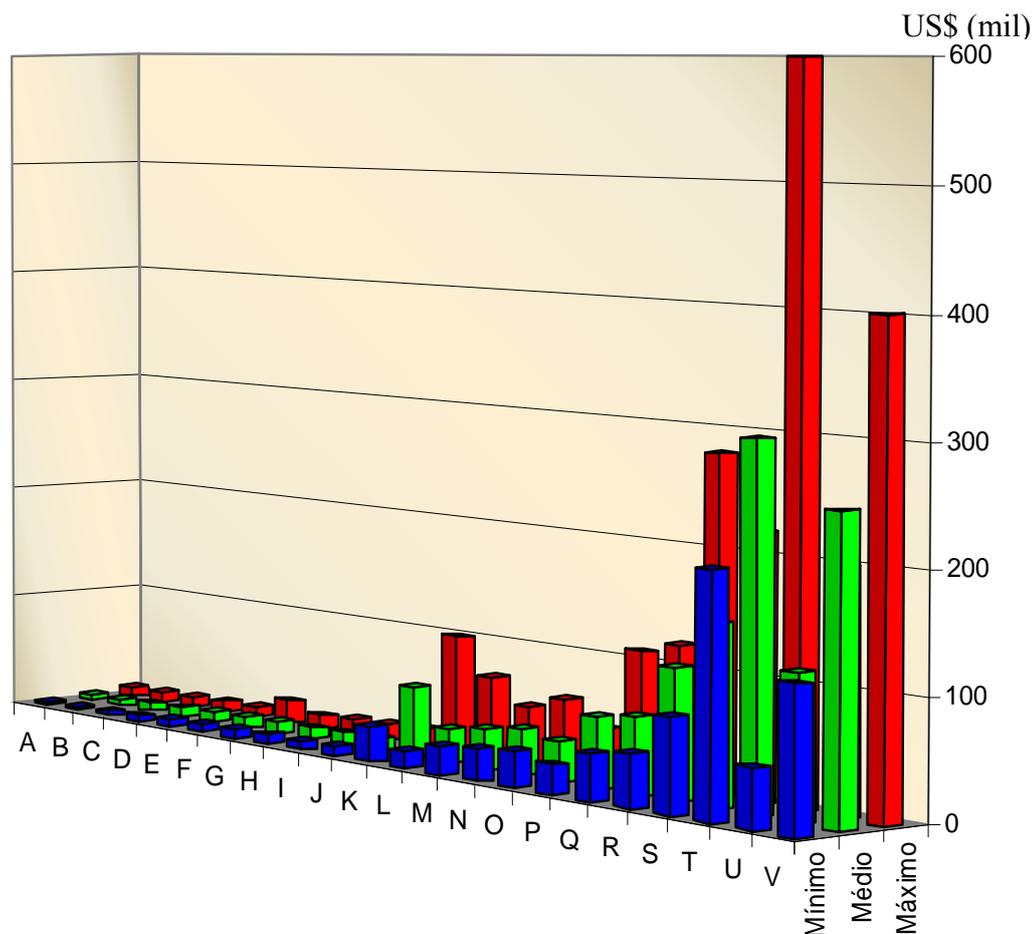
(b)

Figura 2.1 – As origens dos problemas de qualidade segundo consumidores (a) e concessionários (b).

Fonte: José Carlos de Oliveira – Qualidade de Energia Elétrica: “Uma Visão e o Contexto do Tema”

Da figura 2.1, percebe-se que tanto o consumidor como a concessionária consideram que a principal fonte de problemas relacionados à qualidade é oriunda de causas naturais. Contudo, pode-se constatar que ao atribuir a culpa a algo ou alguém que seja passível de ressarcimento, tanto consumidores quanto concessionárias culpam uns aos outros.

De fato, os problemas causados pela má qualidade da energia podem causar grandes prejuízos aos consumidores. Na figura 2.2, pode-se observar a magnitude dos custos relacionados à interrupção de um processo inferior ao intervalo de um minuto.



- |                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| A – Saúde                 | L – Computadores                   |
| B – Gás                   | M – Engenharia                     |
| C – Papel                 | N – Equipamentos de transporte     |
| D – Órgão públicos        | O – Órgãos de financiamento        |
| E – Transportadoras       | P – Centros de Negócios            |
| F – Comércio atacadista   | Q – Mineração                      |
| G – Madeireiras           | R – Equipamentos eletrônicos       |
| H – Químicas              | S – Equipamentos de instrumentação |
| I – Plástico/Borracha     | T – Refinarias de petróleo         |
| J – Extração de petróleo  | U – Siderúrgicas                   |
| K – Produtos alimentícios | V – Têxtil                         |

Figura 2.2 – Custos estimados para interrupção de processo por um intervalo inferior a um minuto.

Fonte: José Carlos de Oliveira – Qualidade de Energia Elétrica: “Uma Visão e o Contexto do Tema”

Observando a figura 2.2, nota-se que uma pequena interrupção no processo produtivo de um determinado local pode causar grandes prejuízos. Diante deste potencial de danos possíveis, fica evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia

elétrica, no intuito de se determinar as causas e as conseqüências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnicas e economicamente viáveis para solucionar o problema.

### 2.1.2 – Principais Distúrbios

Qualquer desvio da tensão ou da corrente de sua forma de onda ideal é considerado um distúrbio da qualidade da energia. Dentre as principais perturbações, podem se destacar as seguintes:

- ◆ VTCD's (Variações de Tensão de Curta Duração);
  - Afundamentos;
  - Interrupções;
  - Elevações;
- ◆ Harmônicas;
- ◆ Flutuação de tensão;
- ◆ Transitórios;
- ◆ Desequilíbrios de tensão.

A Figura 2.3 ilustra alguns destes distúrbios.

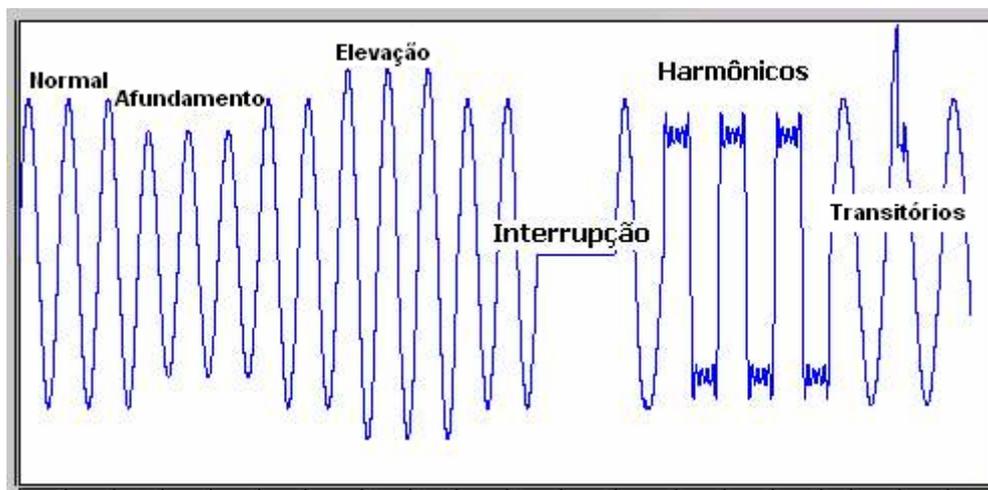


Figura 2.3 – Distúrbios de tensão relacionados à qualidade.

Fonte: [http://www.engecomp.com.br/pow\\_qual.htm](http://www.engecomp.com.br/pow_qual.htm)

Para entender como cada distúrbio desses pode ser causa ou consequência de situações prejudiciais ao consumidor e às concessionárias, os próximos itens explicam alguns fenômenos importantes para o estudo da qualidade de energia.

### 2.1.2.1 – VTCD

As variações de tensão de curta duração são geralmente causadas por faltas no sistema elétrico e por energização de cargas que absorvem grandes correntes iniciais. Dependendo da localização da falta e das características de aterramento do sistema, a falta poderá causar afundamento, elevação ou interrupção de tensão. [OLIVEIRA, 2005]

O afundamento de tensão é caracterizado pelo decréscimo do valor eficaz da tensão para um valor entre 0,1 e 0,9 pu por um tempo de 0,5 ciclo a um minuto. Ele está, normalmente, associado a curtos-circuitos no sistema, mas pode ser causado, também, pela energização de grandes blocos de carga, o que inclui a partida de grandes motores [OLIVEIRA, 2005]. A figura 2.4 mostra uma ilustração deste distúrbio.

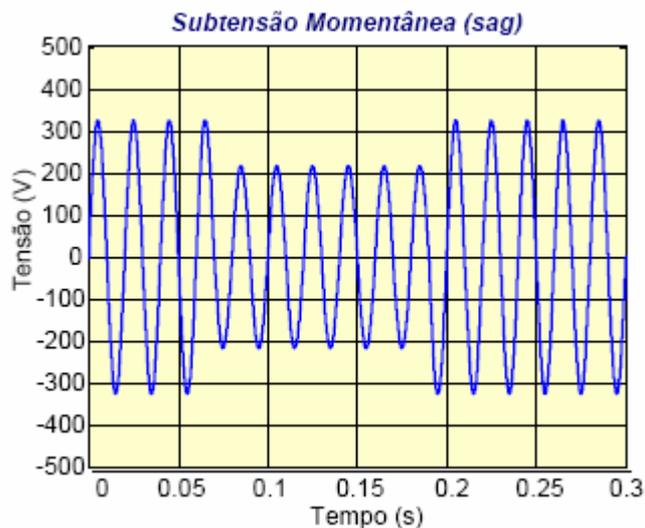


Figura 2.4 – Afundamento temporário de tensão.

Fonte: AFONSO, 2004.

A elevação de tensão é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto, conforme esboçado na figura 2.5. As elevações estão geralmente associadas com as condições de falta no sistema. A severidade de uma elevação durante uma condição de falta é função do local da falta, da impedância do sistema e do

aterramento. Sua duração está intimamente ligada aos ajustes dos dispositivos de proteção, à natureza da falta (permanente ou temporária) e à sua localização na rede elétrica.

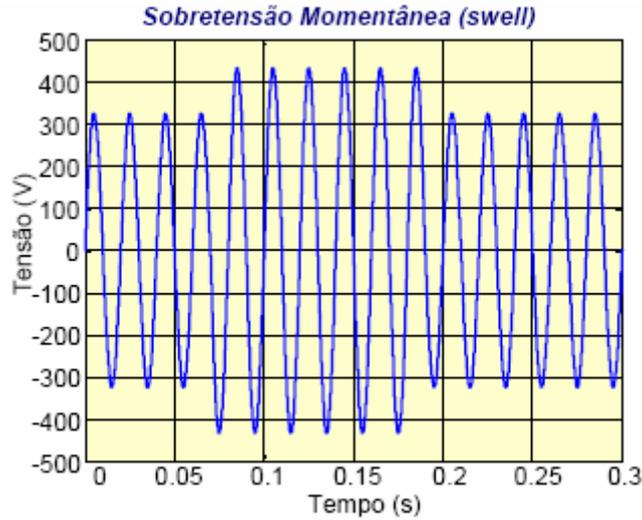


Figura 2.5 – Elevação temporária de tensão.

Fonte: AFONSO, 2004.

Considera-se interrupção de curta duração quando a tensão de suprimento decresce a um valor menor do que 0,1 pu por um período de tempo que não exceda à duração máxima de um minuto. Este distúrbio geralmente ocorre por faltas no sistema de energia, falhas de equipamentos e mau funcionamento de sistemas de controle. A figura 2.6 mostra um exemplo desta perturbação.

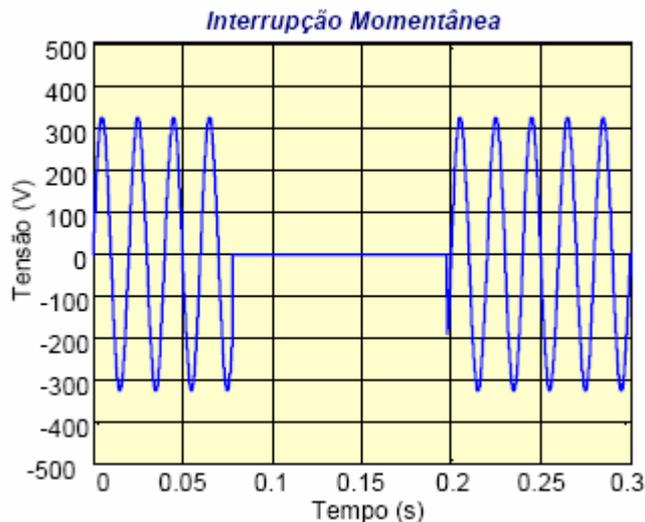


Figura 2.6 – Interrupção de fornecimento de tensão.

Fonte: AFONSO, 2004.

### 2.1.2.2 – Harmônicas

As harmônicas são tensões ou correntes senoidais que têm frequências múltiplas da frequência fundamental. Elas se somam aos componentes de frequência fundamental, causando distorções na forma de onda. A figura 2.7 ilustra a forma de onda da tensão submetida a distorção harmônica.

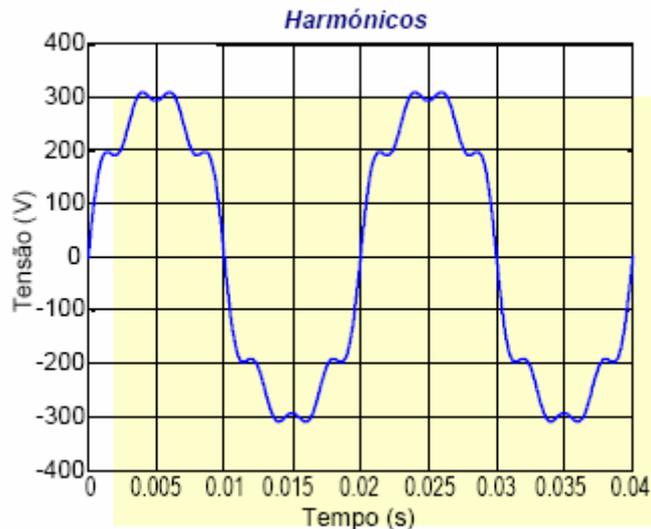


Figura 2.7 – Distorção harmônica.

Fonte: AFONSO, 2004.

As distorções harmônicas ocorrem devido à operação de cargas não-lineares no sistema elétrico e têm aumentado nos sistemas elétricos devido à aplicação crescente da eletrônica de potência. [OLIVEIRA, 2005]

Estas distorções vêm contra os objetivos da qualidade do suprimento promovido por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor, prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

Os principais problemas causados por harmônicos se dão junto a bancos de capacitores, que podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas.

### 2.1.2.3 – Flutuação de Tensão

As flutuações de tensão são variações regulares ou aleatórias de baixa frequência no valor eficaz da tensão. Qualquer carga que apresentar variações rápidas de demanda de corrente, principalmente na componente reativa, pode causar flutuação de tensão. O gráfico da figura 2.8 exibe um exemplo da flutuação de tensão. Seu principal efeito é a cintilação luminosa (também, chamada de *flicker*). [OLIVEIRA, 2005]

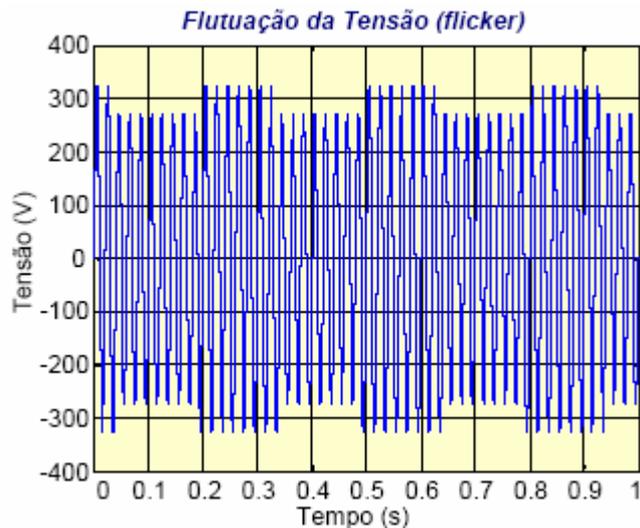


Figura 2.8 – Flutuação de tensão.

Fonte: AFONSO, 2004.

Este distúrbio corresponde a variações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento dentro da faixa compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Tais flutuações são geralmente causadas por cargas industriais.

### 2.1.2.4 – Transitórios

O termo transitório tem sido utilizado na análise de fenômenos em sistemas de potência há um longo tempo, caracterizando aqueles eventos indesejáveis no sistema elétrico que são de natureza momentânea [OLIVEIRA, 2005].

Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um

transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão. A figura 2.9 mostra como um transitório pode se comportar.

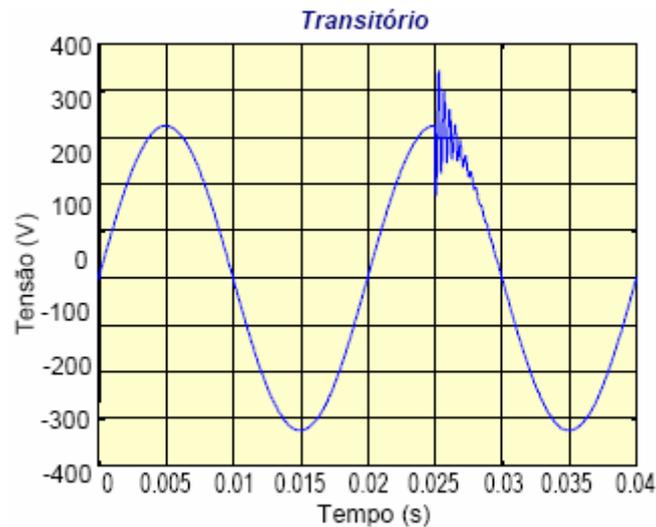


Figura 2.9 – Transitório.

Fonte: AFONSO, 2004.

Podem ser causados por surtos atmosféricos ou manobras de equipamentos de subestação, entre outros.

#### 2.1.2.5 – Desequilíbrios de tensão

Em sistemas trifásicos, a condição ideal de funcionamento corresponde à condição na qual as tensões nas três fases possuem a mesma amplitude (ou valor eficaz) e estão defasadas entre si de  $120^\circ$ .

Os desequilíbrios de tensão correspondem à situação onde os módulos da tensão das fases são diferentes entre si. As origens destes desequilíbrios estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de seqüência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

## 2.2 – O ATP

O ATP (*Alternative Transients Program*) é um poderoso *software* de simulação digital de fenômenos transitórios em redes polifásicas, sendo considerado, nesta classe, o programa mais amplamente difundido no meio acadêmico. Ele vem sendo continuamente desenvolvido através de contribuições de todas as partes do globo terrestre.

O ATP calcula variáveis de interesse de sistemas elétricos de potência, como funções do tempo, normalmente alimentadas com alguma perturbação. Fundamentalmente, usa-se a regra da integração trapezoidal para solucionar equações diferenciais de componentes do sistema no domínio do tempo. Condições iniciais não-nulas podem ser determinadas tanto automaticamente, como podem ser introduzidas pelo usuário para alguns componentes. O ATP possui vários modelos pré-definidos, incluindo máquinas rotativas, transformadores, pára-raios, linhas de transmissão e cabos. Com este *software*, redes complexas com a mais vasta variedade de estruturas podem ser simuladas. Análises de sistemas de controle, equipamentos de eletrônica de potência e componentes com características não-lineares também são possíveis. Distúrbios simétricos ou assimétricos são permitidos, tais como faltas, descargas atmosféricas, ou qualquer tipo de chaveamento ou manobra de equipamentos. O programa ainda disponibiliza o cálculo de respostas em frequência do circuito simulado.

Apesar de todas as qualidades citadas acima, o ATP não fornece uma interface amigável para interação com o usuário por utilizar apenas linhas de comando. No entanto, é possível valer-se da ferramenta ATPDraw, que disponibiliza recursos gráficos complementares ao ATP.

### 2.2.1 - ATPDraw

O ATPDraw é um pré-processador gráfico desenvolvido para criar e editar arquivos que representam circuitos elétricos que serão simulados no ATP. Esta ferramenta auxilia na criação e edição de modelos dos circuitos elétricos que o usuário pretende simular interativamente. Tanto circuitos monofásicos quanto trifásicos podem ser construídos através dele. No programa, o usuário pode construir um circuito elétrico selecionando

componentes pré-definidos em uma extensa biblioteca. Em seguida, o pré-processador automaticamente cria o arquivo de entrada correspondente no formato correto para o ATP.

Um modelo de circuito reproduzido no ATPDraw é apresentado na figura 2.10.

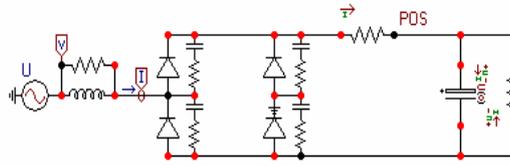


Figura 2.10 – Representação de circuito no ATPDraw.

Fonte: FONSECA, 2003

A representação gráfica dos componentes do circuito facilita o entendimento do funcionamento e da topologia do mesmo. Esta característica motiva a utilização do ATPDraw para simulações. Em complemento às funções do ATPDraw, tem-se ainda uma série de comandos que realizam análises gráficas das simulações efetuadas, entre os quais destaca-se o PLOTXY, que será posteriormente explicado.

#### 2.2.1.1 – Utilização do ATPDraw

No presente trabalho, utiliza-se modelos computacionais desenvolvidos previamente. Em tais modelos, recursos importantes do ATPDraw são empregados para simular e obter resultados de entrada e saída. Dado isto, serão apresentadas algumas informações básicas sobre como proceder para se criar, simular e analisar um circuito.

O ATPDraw utiliza a interface padrão do *Windows*®. A figura 2.11 mostra a janela principal contendo um circuito como exemplo.

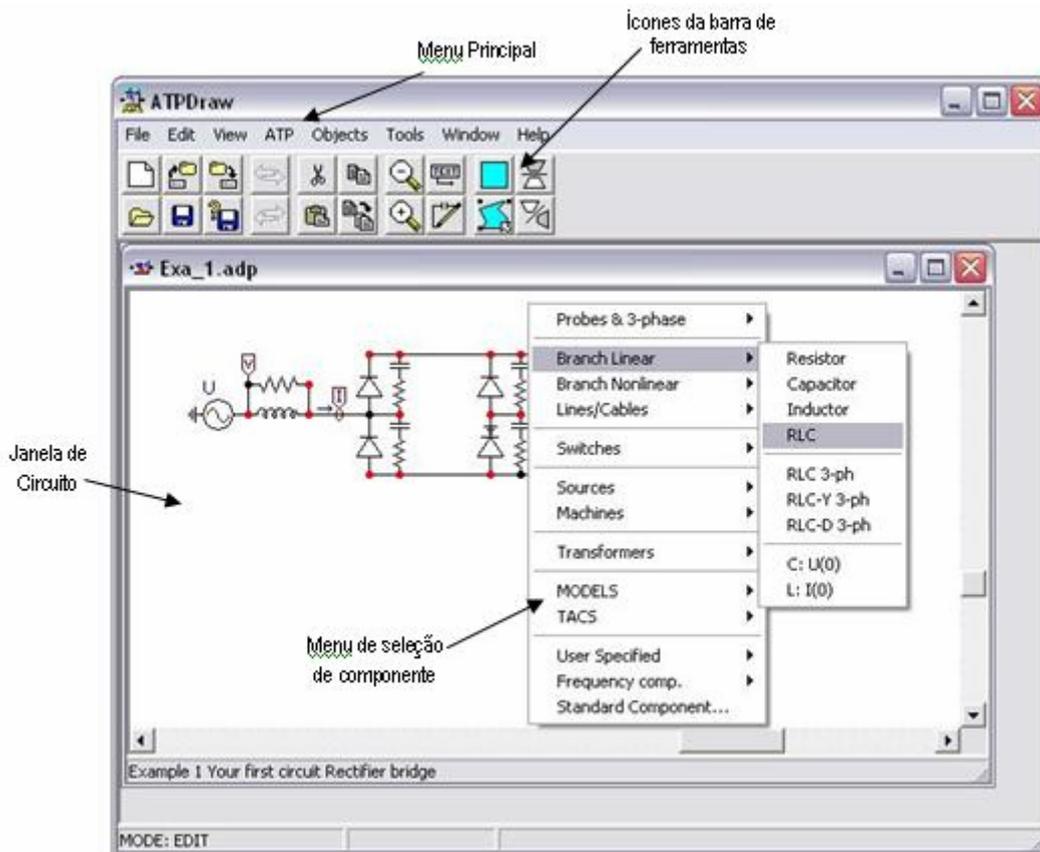


Figura 2.11 – Tela principal do ATPDraw.

### 2.2.1.2 – Definição de Componentes

O primeiro passo a ser executado para a criação de um circuito no ATPDraw é a inserção de componentes elétricos. Um elemento pode ser implantado selecionando uma das opções exibidas no menu de seleção de componentes, que aparece ao se clicar com o botão direito do *mouse* sobre a área em branco da janela de circuito. A figura 2.12 mostra algumas das opções de elementos de circuito.

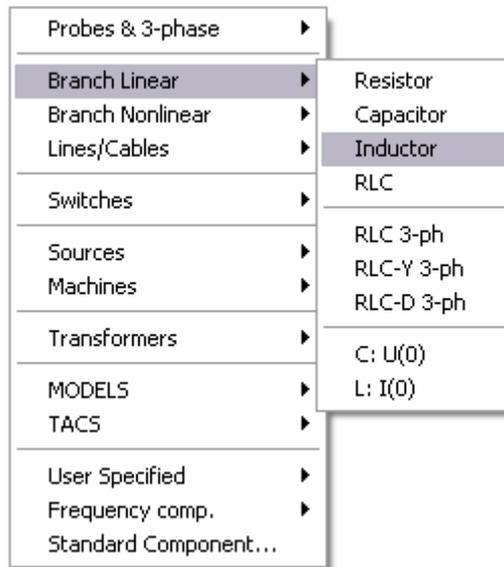


Figura 2.12 – Menu de seleção de componente.

Após a escolha dos componentes, definem-se parâmetros ao se clicar duplamente com o botão esquerdo do mouse em cima do componente que se deseja alterar. Uma caixa de diálogo se abrirá com a opção de se alterar alguns valores. A figura 2.13 refere-se a caixa de configurações de um circuito RLC monofásico. O usuário tem a opção de escolher os valores de resistência, indutância e capacitância ( $R = 1\Omega$ ,  $L = 0,001\text{mH}$  e  $C = 0\text{ F}$ , no exemplo).

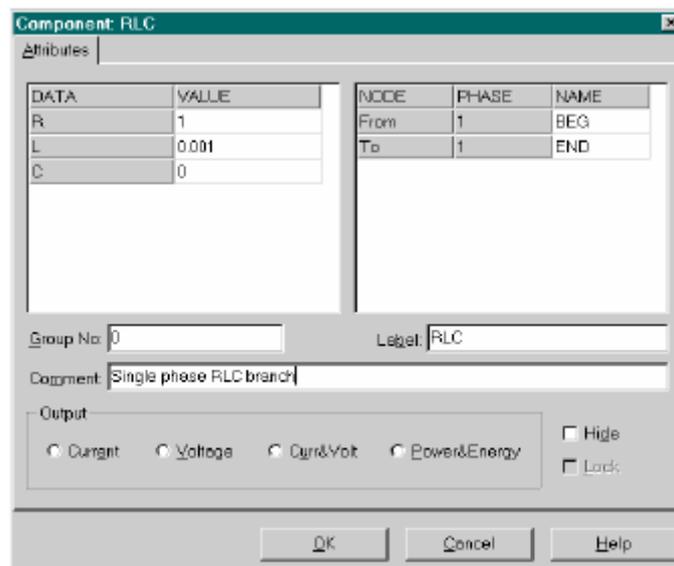


Figura 2.13 – Caixa de diálogo de um dispositivo RLC monofásico.

Fonte: FONSECA, 2003

O procedimento se repete quando da necessidade de definição ou alteração de valores de qualquer elemento do circuito.

### 2.2.1.3 – Executando a Simulação

Em seguida, define-se a configuração de parâmetros para a simulação. Deve-se definir basicamente o passo de integração da simulação e o tempo máximo de duração da mesma. A figura 2.14 mostra a janela onde estas alterações são feitas.

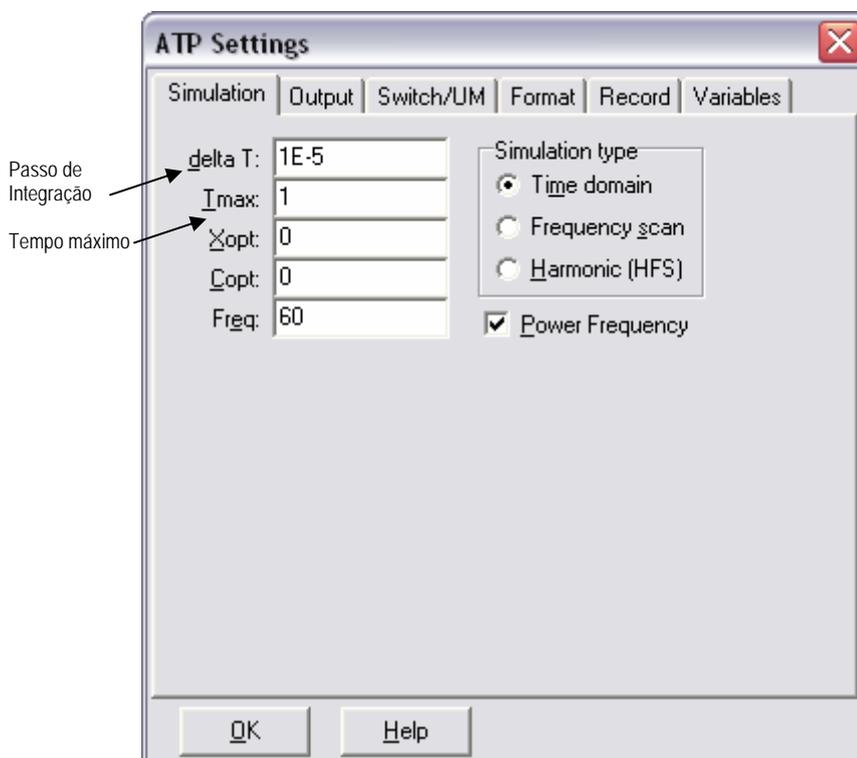


Figura 2.14 – Caixa de diálogo de definição de parâmetros de simulação.

Após escolher os valores dos componentes e os parâmetros de simulação, o circuito está pronto para ser executado. Para rodar o programa basta selecionar no menu “ATP” a opção “run ATP” para que o circuito seja simulado. A figura 2.15 ilustra esta etapa.

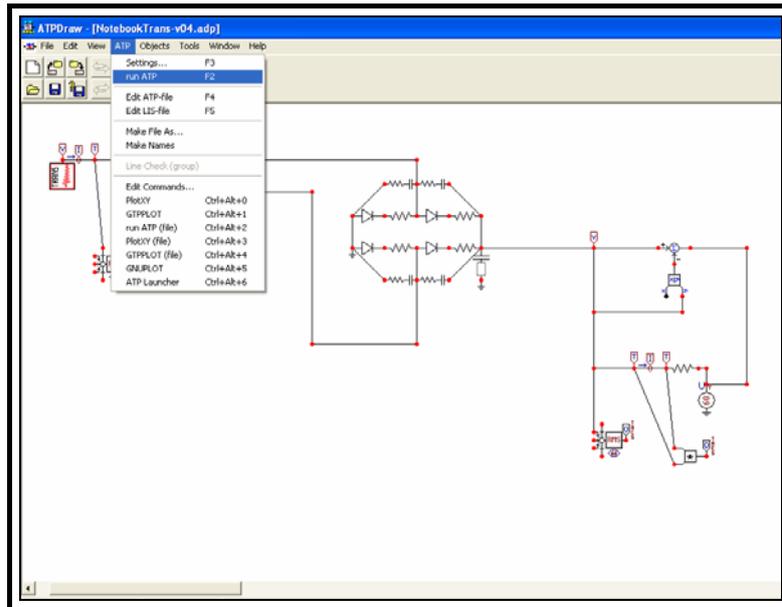


Figura 2.15 – Menu: “ATP”.

O programa irá ler o arquivo de entrada do ATP e executará a simulação. Se alguma falha for encontrada durante o processo, o *software* cessará e exibirá uma mensagem de erro. A figura 2.16 exibe a janela contendo a execução das linhas de comando.

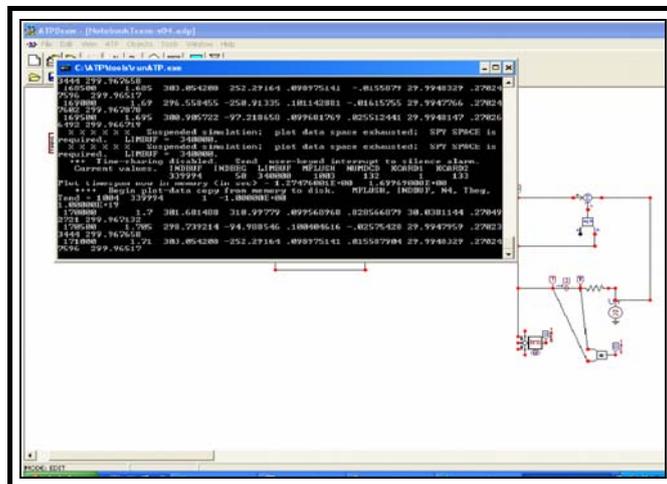


Figura 2.16 – ATP executando linhas de comando.

Após a simulação ocorrer com sucesso, um arquivo será criado com o mesmo nome do arquivo do circuito, porém com uma extensão diferente (.p14). Este arquivo será usado na plotagem dos gráficos das grandezas elétricas nos nós do circuito.

A maneira mais prática para assimilar as grandezas de um circuito é examinando-as em um gráfico. Desta forma, pode-se observar as respectivas formas de onda e extrair delas

valores importantes, como, por exemplo, valor de pico. O item a seguir explica como obter gráficos que representem as saídas do circuito previamente simulado.

#### 2.2.1.4 – Representação Gráfica

Os resultados computacionais mostram comportamentos de ondas elétricas no domínio do tempo e frequência. O ATPDraw disponibiliza uma ferramenta de auxílio – o “PLOTXY” – que projeta as formas de onda de tensão e corrente ao longo do tempo em determinados pontos do circuito. Ele também pode exibir as componentes harmônicas das mesmas. Para utilizar o comando, seleciona-se no menu “ATP” a opção: “PLOTXY”. Esta ação é ilustrada pela figura 2.17.

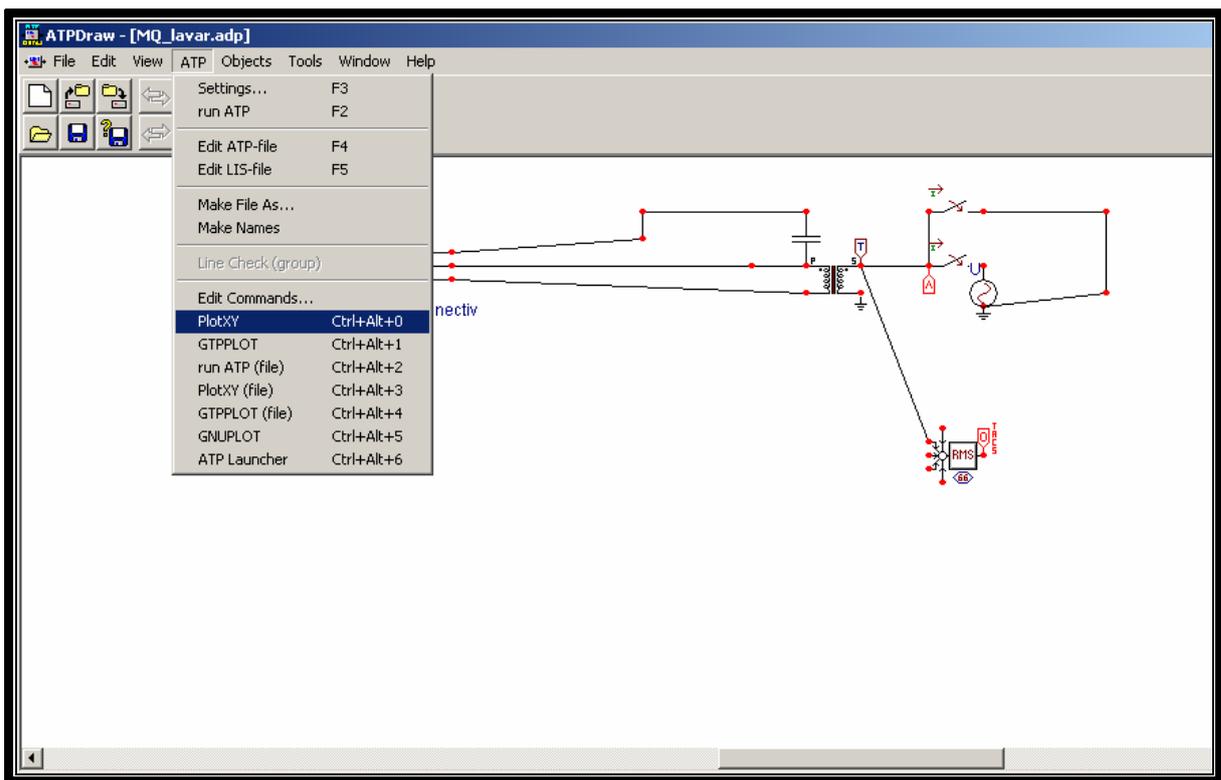


Figura 2.17 – Comando “PLOTXY”.

Em seguida, abre-se uma caixa com opções de nós que podem ter suas tensões ou correntes apresentadas graficamente. A figura 2.18 ilustra a escolha de um nó de tensão para ser representado.

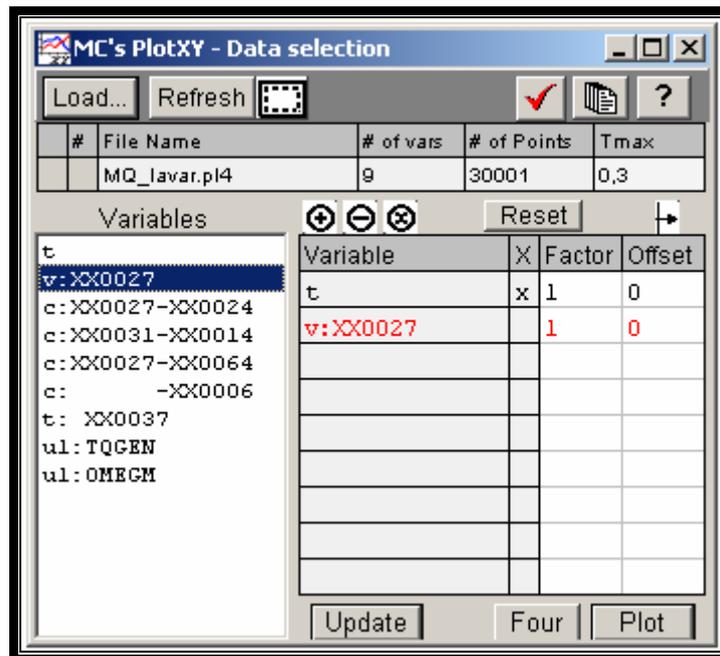


Figura 2.18 – Janela de seleção de nós para representação gráfica.

Acionando o botão “Plot”, a reprodução gráfica correspondente aparecerá em outra caixa de diálogo, onde é possível verificar a forma de onda e utilizar comandos proveitosos para análises. Os botões: “Grid”, “Show Cursor” e “Copy” são exemplos de funções muito utilizadas para construção de relatórios. A título de esclarecimento, a figura 2.19 demonstra uma forma de onda de tensão simulada em um dos aparelhos que serão posteriormente explicados. Na figura em questão pode-se ver na parte de baixo os botões utilizados para ações de análise.

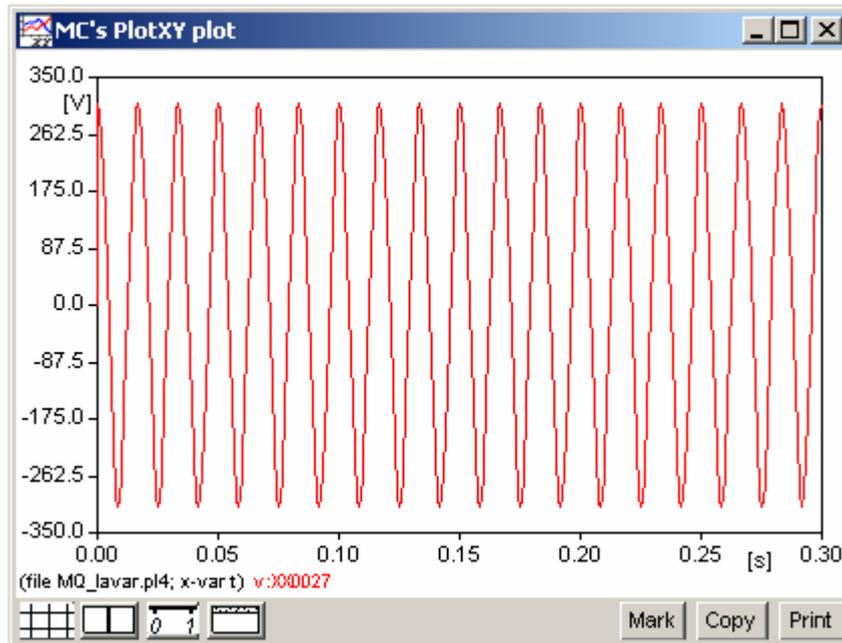


Figura 2.19 – Representação de forma de onda de tensão.

#### 2.2.1.5 – Análise Gráfica

Para entender o comportamento de uma onda pode-se comparar alguns parâmetros entre si. Dentre os principais estão: forma de onda, valor de pico e harmônicas. A seguir, estão listados os procedimentos para se obter as grandezas supracitadas.

##### - Valor de pico

Na janela que apresenta a forma de onda, como já citado anteriormente, há a possibilidade de se utilizar alguns recursos. Dentre eles está o cursor que indica qual a posição no eixo X e o valor no eixo Y. Para se determinar uma medida clica-se no segundo botão da esquerda para direita. Em seguida, posiciona-se o cursor na medida requerida, por exemplo, valor de pico. A figura 2.20 mostra a idéia explanada acima. O cursor está fixado no valor de pico que é visualizado na cor vermelha na parte de baixo da tela.

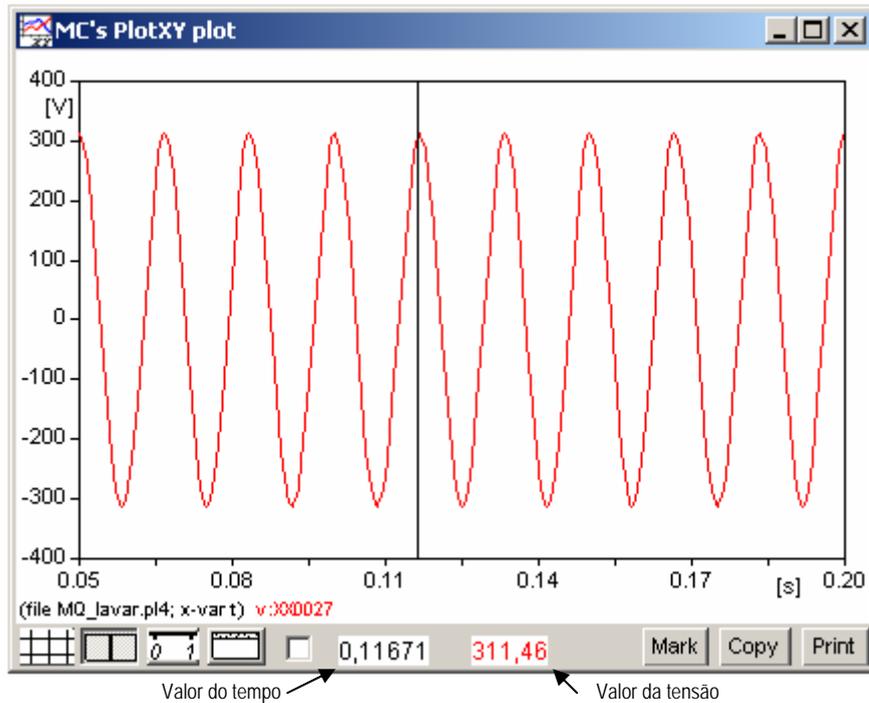


Figura 2.20 – Cursor localizando valor de pico.

Este procedimento foi utilizado várias vezes para a validação dos modelos, pois trata-se de um parâmetro de comparação entre os valores experimentais e computacionais.

### **-Harmônicas**

O “PLOTXY” é capaz de plotar o espectro harmônico de uma dada forma de onda. Para isso, alguns parâmetros devem ser definidos. Primeiramente, determina-se a frequência da harmônica fundamental na caixa de diálogo que surge ao se pressionar o botão  na janela de seleção de dados para projeção em gráfico. O campo “*Default frequency for DFT*” indica a frequência em hertz a ser adotada como padrão. Na figura 2.21 é mostrada a área onde se define a frequência fundamental.

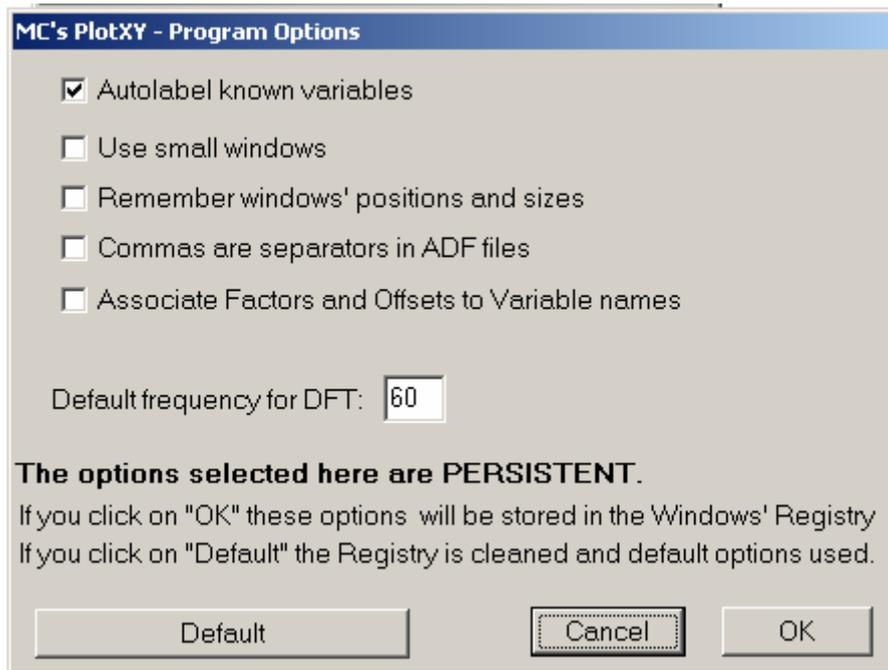


Figura 2.21 – Definição da frequência fundamental.

Feita esta alteração, clica-se no botão “*Four*” localizado na parte de baixo da janela que aparece na figura 2.22. Duas janelas se abrirão após o comando. A primeira representa a forma de onda da grandeza selecionada. A segunda ilustra um gráfico das componentes de frequência da onda. Um exemplo da exibição destas janelas está mostrado na figura 2.23.

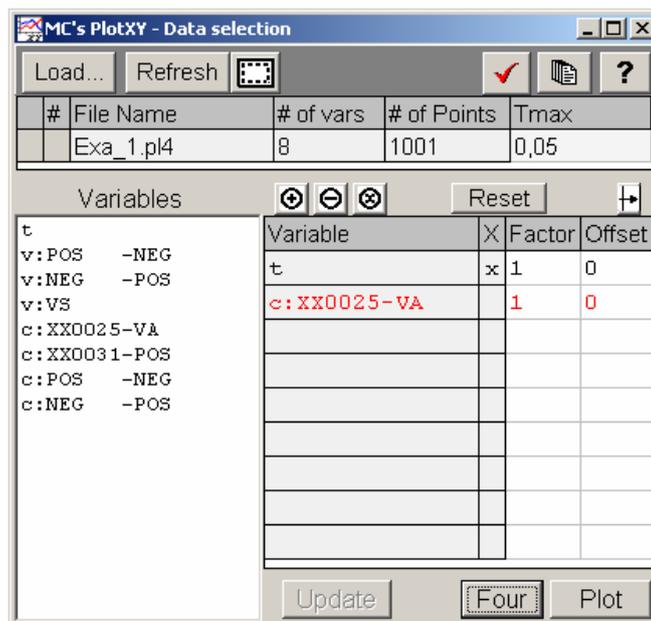


Figura 2.22 – Seleção da opção de plotagem das componentes harmônicas de uma grandeza.

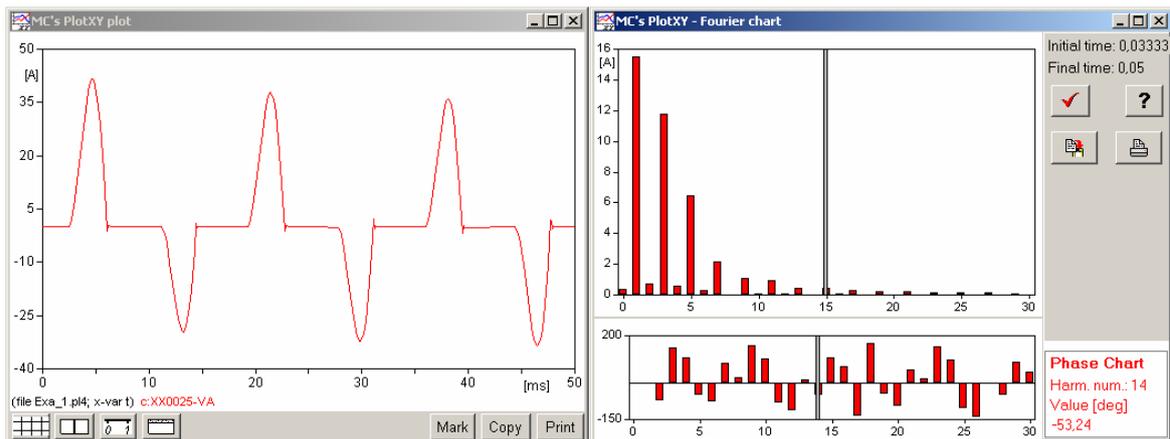


Figura 2.23 – Forma de onda de tensão (à esquerda) e sua decomposição em componentes harmônicas (à direita).

Contudo, para melhor visualização e entendimento dos dados exibidos, algumas configurações devem ser alteradas. Na janela denominada “MC’s PlotXY – Fourier chart” deve-se pressionar o botão . Em seguida, o campo “Unit of amplitude chart” deve ser alterado para a opção: “pu of harm.1”. No item: “Relative size of a Amplitude chart” escolha “100%” e clique no botão “OK”. A figura 2.24 esclarece onde alterar os campos referidos.

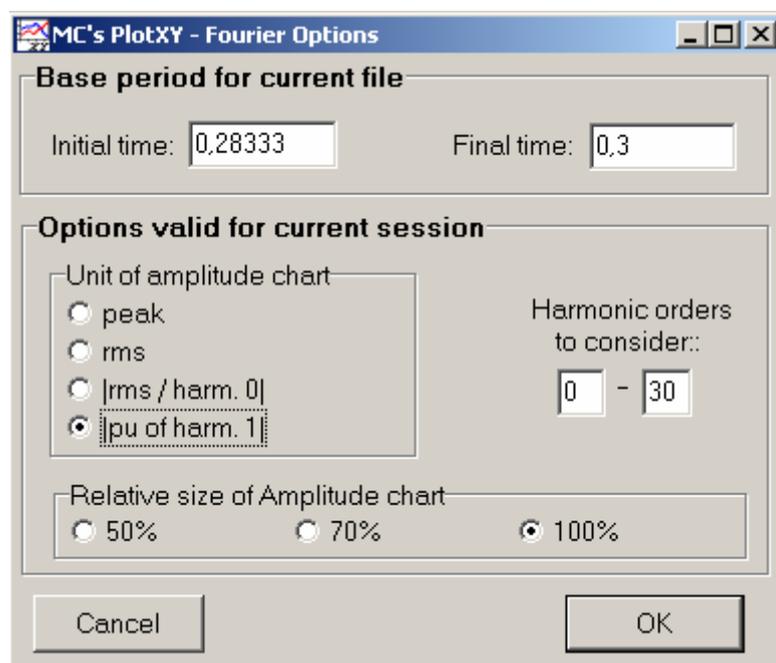


Figura 2.24 – Configurações do espectro de frequência.

Depois deste procedimento, o ATPDraw ilustrará apenas o gráfico de magnitude das componentes de frequências. Tais magnitudes são exibidas com base na harmônica fundamental, em pu. A figura 2.25 esclarece esta nova situação.

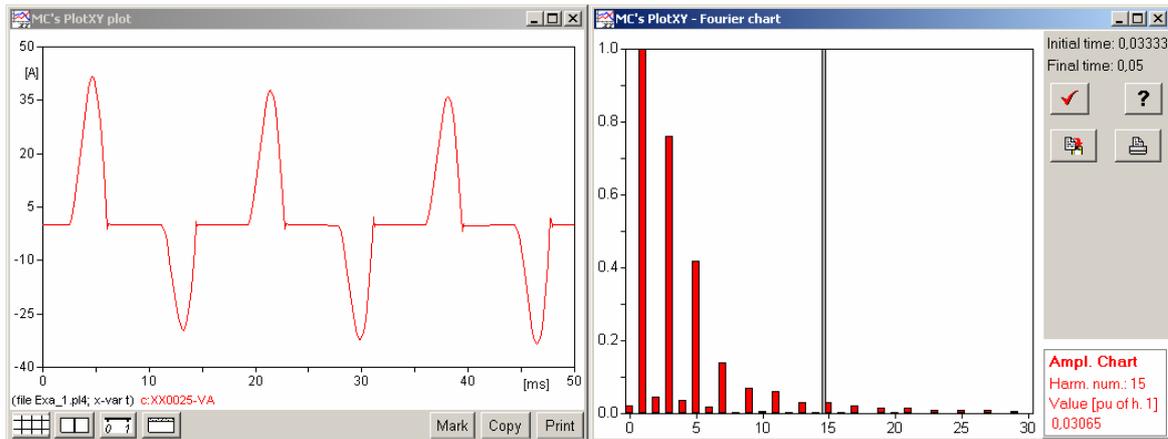


Figura 2.25 – Configuração utilizada para análise.

#### 2.2.1.6 – Considerações Finais

A adoção desta rotina de procedimentos para obtenção dos dados dos circuitos modelados permite ao usuário extrair informações de maneira objetiva. Cabe ressaltar que esta metodologia foi tomada como padrão para execução do presente estudo, contribuindo para que mais de uma pessoa pudesse trabalhar simultaneamente na busca por resultados e mantendo a coesão da forma de exibição dos dados adquiridos.

### **3 – DESCRIÇÃO DOS APARELHOS E PROPOSTA DE TOPOLOGIA PARA SIMULAÇÃO NO ATP**

Este capítulo tem como finalidade descrever brevemente os aparelhos eletrodomésticos a serem estudados e avaliados e discutir a escolha da topologia a ser adotada para simulação computacional.

A modelagem dos circuitos é feita por meio de um equivalente elétrico com algumas simplificações. Esta escolha é justificada pelo fato das anormalidades de natureza elétrica não serem sentidas, na maior parte dos casos, nos circuitos mais internos dos dispositivos eletrônicos. [CEB/UFU, 2005]

São usadas, por exemplo, impedâncias para representar circuitos de saídas específicos. No entanto, a opção de construir arranjos mais simples a partir de circuitos mais complexos não invalida nem limita os estudos considerados neste trabalho.

#### **3.1 – CARREGADOR DE *NOTEBOOK***

##### **3.1.1 – Motivação**

Aparelhos como *notebooks* possuem baterias à base de lítio com autonomia para durar aproximadamente três horas. Porém, independentemente do modelo da bateria, o seu carregamento se faz imprescindível. Para essa função, faz-se uso de carregadores que são formados, na maioria dos casos, por uma fonte chaveada.

A preferência na utilização de fontes chaveadas às lineares reside no desejo de redução de peso e tamanho. São compostas por unidades retificadoras, dispositivos de chaveamento, transformadores de acoplamento e circuitos de controle. Este conjunto fornece tensões contínuas reguladas na saída. Cabe ainda ressaltar que, devido ao transformador de acoplamento, a fonte chaveada opera em alta frequência, o que resulta no seu tamanho reduzido.

### 3.1.2 – Escolha do Circuito Elétrico Equivalente

A principal meta deste trabalho está direcionada à verificação do comportamento da corrente solicitada e das tensões de saída da fonte chaveada sob o impacto dos problemas de qualidade já mencionados.

Para a execução dos ensaios experimentais e das simulações computacionais, fez-se necessária a identificação dos componentes da fonte chaveada em questão. Para isto, procedeu-se de forma a abrir o dispositivo para identificar a topologia e os componentes que compunham o circuito real do equipamento. Assim, obteve-se o diagrama de blocos funcional da fonte, mostrado na figura 3.1.

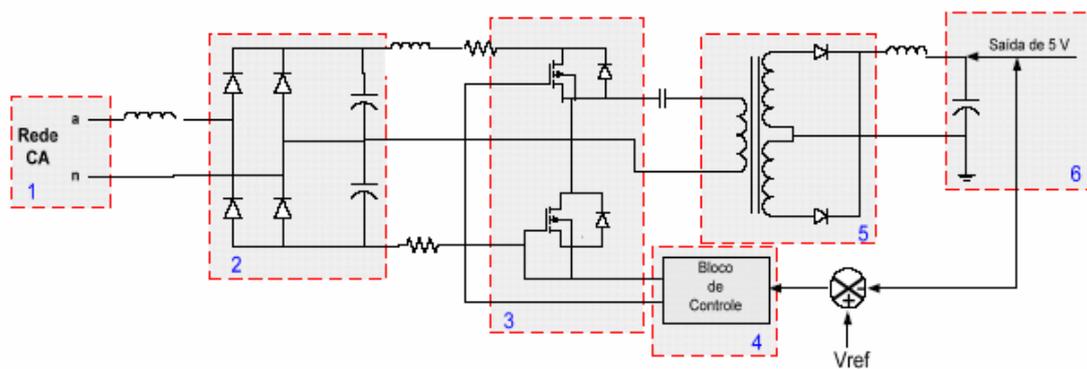


Figura 3.1 – Diagrama de blocos funcional da fonte chaveada.

A figura se divide em seis blocos. O primeiro representa a entrada da tensão CA monofásica da rede para a fonte chaveada. O bloco seguinte contém o retificador responsável pela conversão de tensão e correntes alternadas em grandezas contínuas e filtragem da tensão de entrada. O bloco 3 contém as chaves que recortam a tensão CC em uma onda quadrada de alta frequência. No bloco 4 é feito o controle do tempo de condução das chaves. Isto é feito para compensar uma ocasional alteração na tensão de alimentação para que a mesma se mantenha constante. Logo em seguida, no bloco 5, encontram-se o transformador e o retificador da tensão de saída da fonte chaveada. Finalmente, no bloco 6, está a saída de tensão de 5V. Apesar das fontes chaveadas fornecerem diversos níveis de tensão de saída, apenas um deles foi representado neste diagrama funcional no intuito de simplificar e facilitar o entendimento do mesmo.

### 3.1.3 – Estratégia para Simulação

Como estratégia de modelagem para simulação, optou-se por ter como base o circuito simplificado apresentado na figura 3.2 devido à complexidade do circuito equivalente da fonte chaveada.

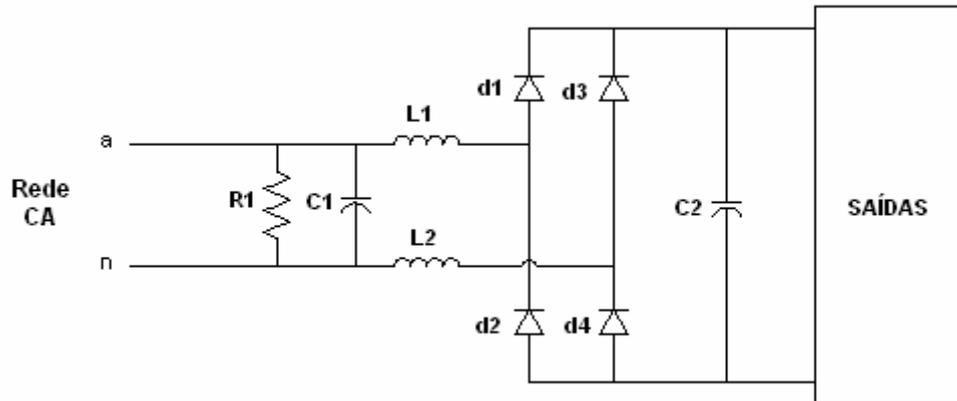


Figura 3.2 – Esquema elétrico da fonte chaveada usada nas simulações.

O emprego deste modelo deve-se ao fato que os componentes eletrônicos subsequentes e supridos pelo barramento CC variam enormemente de equipamento para equipamento, são extremamente complexos para sua incorporação aos modelos e, via de regra, os danos decorrentes de anormalidades na rede de alimentação ocorrem nas unidades retificadoras ou nos capacitores [CEB/UFU, 2005]. Ademais, o bloco que resume os arranjos eletrônicos de regulação e alimentação é tratado na forma de uma impedância equivalente para a qual se atribuirá um nível de suportabilidade determinado pelos dispositivos mais sensíveis.

### 3.1.4 – Modelagem Computacional

O modelo computacional do equipamento focado neste capítulo inclui: unidade de retificação, conexão CC, unidade equivalente a reguladores e alimentadores. A figura 3.3 sintetiza o modelo da fonte de carregador de *notebook*.

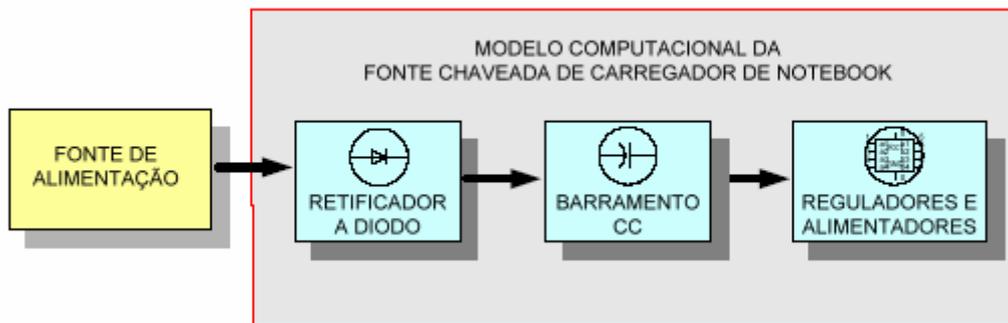


Figura 3.3 – Modelo computacional da fonte de carregador de notebook.

A modelagem computacional do carregador de notebook deve tratar a sua fonte como o elemento de maior importância. Assim sendo, gerou-se um modelo que pudesse representar tal fonte.

Tal modelo tem como objetivo avaliar o desempenho do carregador de *notebook* em questão sob a ação das mais distintas situações para a rede elétrica de suprimento utilizando uma modelagem computacional que emprega técnicas do domínio do tempo.

### 3.1.5 – Características do Equipamento Utilizado

O equipamento submetido aos estudos propostos neste trabalho é uma fonte do carregador de *notebook*, atualmente encontrada no comércio, mostrada na figura 3.4, cujas principais características estão descritas na tabela 3.1.



Figura 3.4 – Foto da fonte de carregador de *notebook* disponibilizada para os estudos.

Tabela 3.1 – Principais características do carregador de notebook.

<i>Tensão de Alimentação</i>	<i>Potência RMS da fonte chaveada</i>
[V]	[W]
100 ~ 220	40

## 3.2 – CARREGADOR DE CELULAR

### 3.2.1 – Motivação

O Brasil vive um momento de grande crescimento na área de telefonia celular. Nenhuma outra área de infra-estrutura experimentou crescimento tão expressivo na história recente do Brasil [CEB/UFU, 2005].

Cada celular necessita de um carregador de bateria. Com isso, tem-se uma enorme diversidade de marcas e modelos, que apresentam tecnologias fundamentadas nas fontes lineares e chaveadas. As segundas representam a maioria, e ainda a atual tendência.

As fontes chaveadas, como descritas anteriormente, têm como função principal fornecer tensões contínuas reguladas na sua saída. Deve-se ressaltar que o transformador de acoplamento empregado nas fontes chaveadas opera em alta frequência, fato este responsável pelo tamanho reduzido deste dispositivo [CEB/UFU, 2005].

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 em se tratando de fontes de carregadores de celular.

### 3.2.2 – Escolha do Circuito Elétrico Equivalente

Como no caso do carregador de *notebook*, o foco de estudo no carregador de celular está direcionado para a observação da corrente solicitada e das tensões de saída da fonte chaveada sob ação das perturbações já referidas.

Para a execução dos ensaios experimentais e das simulações computacionais, fez-se necessária a identificação dos componentes da fonte chaveada em questão, adquirindo-se um circuito similar ao encontrado para o carregador de *notebook*. Assim, obteve-se o diagrama de blocos funcional da fonte, mostrado na figura 3.5.

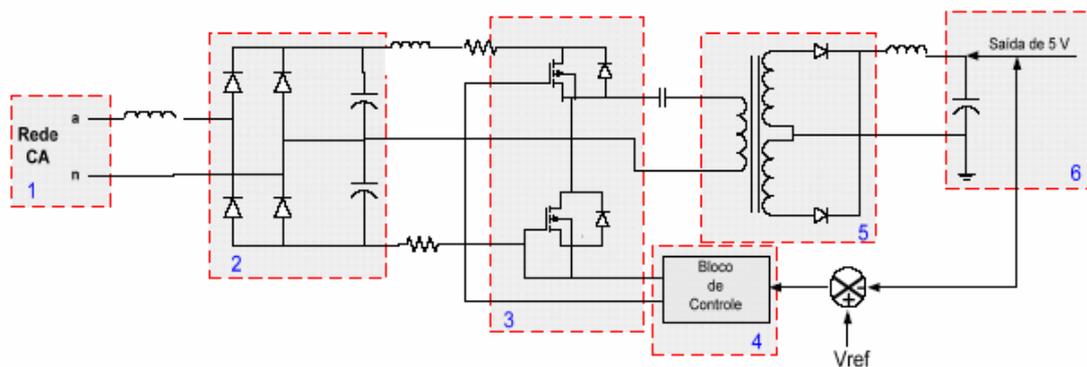


Figura 3.5 – Diagrama de blocos funcional da fonte chaveada.

A forma como os blocos se dividem já foi explicada anteriormente, não sendo necessária a repetição desta descrição.

### 3.2.3 – Estratégia para Simulação

Como estratégia de modelagem para simulação, optou-se por ter como base o circuito simplificado apresentado na figura 3.6 devido à complexidade do circuito equivalente da fonte chaveada.

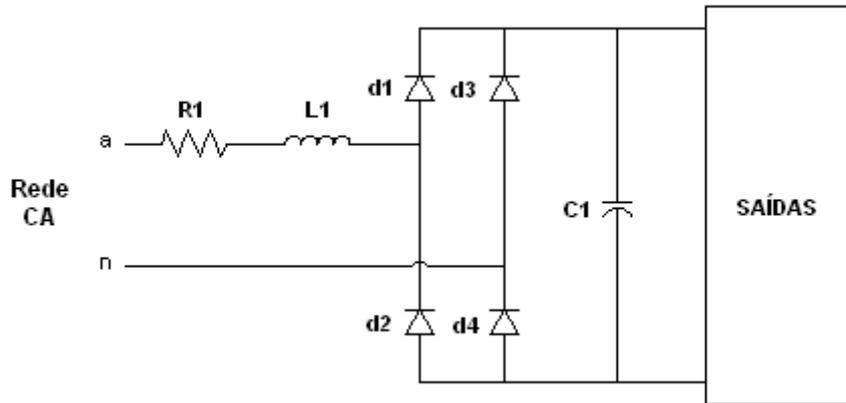


Figura 3.6 – Esquema elétrico da fonte chaveada usada nas simulações.

O modelo resume a topologia do circuito real da fonte do carregador de celular. A simplificação é necessária pelos mesmos motivos apresentados para o carregador de *notebook*.

Apesar de se assemelhar muito com a topologia do carregador de *notebook*, este modelo possui algumas diferenças nos componentes, assim como no valor dos mesmos.

### 3.2.4 – Modelagem Computacional

O modelo computacional do equipamento focado neste capítulo inclui: unidade de retificação, conexão CC, unidade equivalente a reguladores e alimentadores. A figura 3.7 sintetiza o modelo da fonte de carregador de celular.

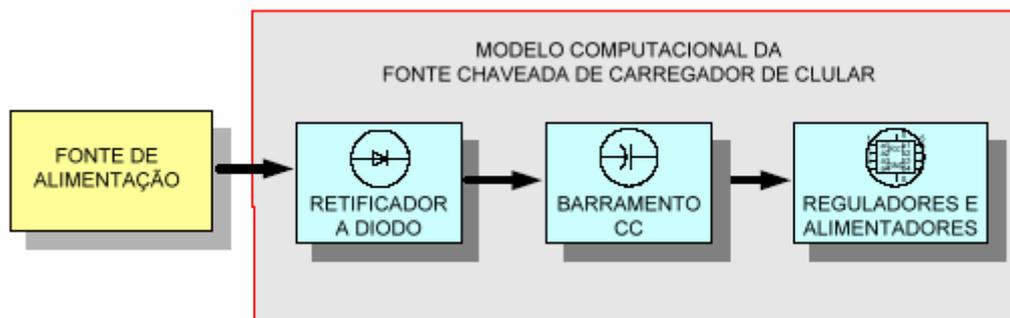


Figura 3.7 – Modelo computacional da fonte de carregador de celular.

A modelagem computacional do carregador de celular deve tratar a sua fonte como o elemento de maior importância. Assim sendo, gerou-se um modelo que pudesse representar tal fonte.

O objetivo deste modelo é avaliar o desempenho do carregador de celular quando submetido a perturbações da rede elétrica de suprimento.

### 3.2.5 – Características do Equipamento Utilizado

O equipamento submetido aos estudos propostos neste trabalho é uma fonte do carregador de celular, atualmente encontrada no comércio, mostrada na figura 3.8, cujas principais características estão descritas na tabela 3.2.



Figura 3.8 – Foto da fonte de carregador de celular disponibilizada para os estudos.

Tabela 3.2 – Principais características do carregador de celular.

<i>Tensão de Alimentação</i>	<i>Potência RMS da fonte chaveada</i>
[V]	[W]
100 ~ 220	40

## **4 – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL SOB CONDIÇÃO IDEAL DE SUPRIMENTO**

Este capítulo aborda a validação dos modelos construídos computacionalmente para o caso em que o circuito é alimentado por uma fonte puramente senoidal. Isto será feito comparando-se valores medidos em laboratório com aqueles obtidos através de simulação.

Cada aparelho será validado separadamente, como mostrado a seguir.

### **4.1 – FONTE DE CARREGADOR DE *NOTEBOOK***

#### **4.1.1 – Metodologia para Modelagem do Circuito**

Este trabalho tem como objetivo principal verificar o comportamento da corrente solicitada e das tensões de saída da fonte chaveada. Desta forma, as grandezas que foram monitoradas para se obter a validação deste modelo são a tensão de entrada do equipamento, a tensão no elo CC – onde a tensão de alimentação encontra-se na forma contínua – e a corrente de entrada. Nenhuma outra corrente foi levada em conta devido à complexidade do circuito interno, aliada às limitações de ordem técnica quanto a sua aquisição.

A figura 4.1 mostra o arranjo físico utilizado, no qual se observa o carregador de *notebook* alimentado sob condições nominais de operação. As tensões de suprimento são providas pela fonte de alimentação programável.

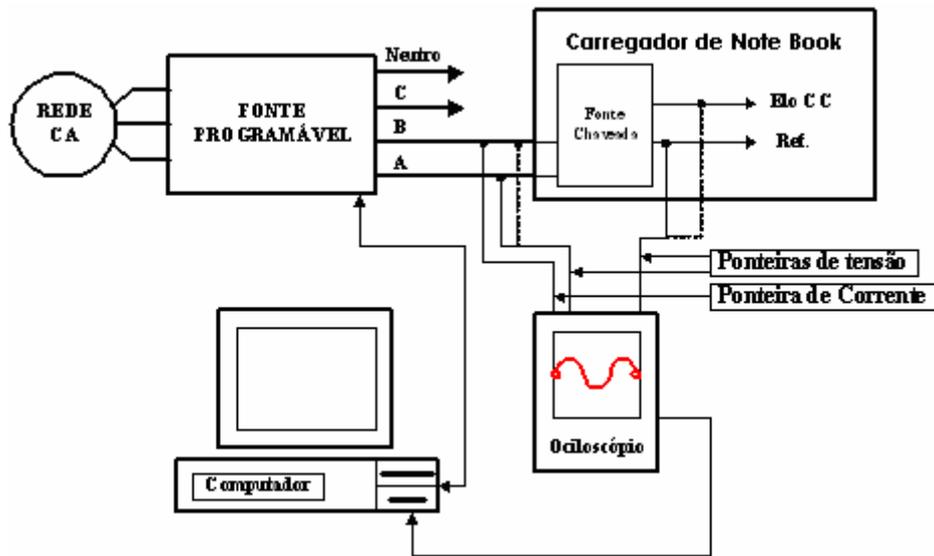


Figura 4.1 – Diagrama de blocos do arranjo utilizado em ensaios laboratoriais para análise de desempenho do carregador de *notebook*.

Na montagem acima, foi utilizada uma fonte programável como fonte de tensão. Esta fonte é controlada por meio de um computador. Como se desejava uma tensão monofásica, apenas duas fases da saída da fonte foram usadas para alimentar o carregador de *notebook*. Um osciloscópio ligado à entrada e à saída encarregou-se de medir as tensões e as correntes aspiradas.

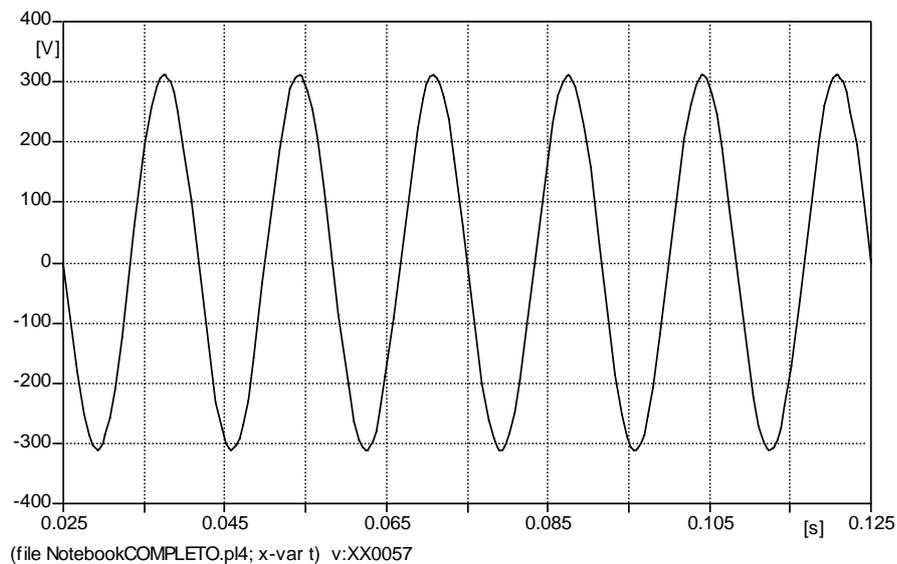
#### 4.1.2 – Resultados Experimentais e Computacionais

Para facilitar a interpretação dos resultados, a tabela 4.1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos e selecionados para análise.

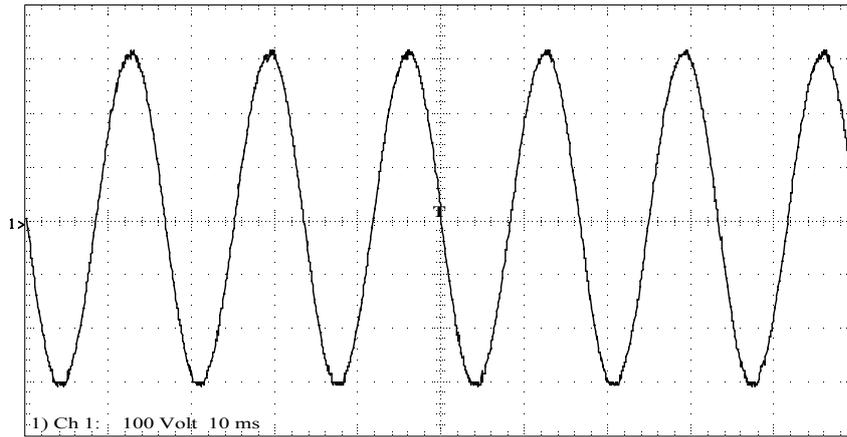
Tabela 4.1 – Síntese dos resultados obtidos do carregador de *notebook* – condições ideais e nominais de suprimento

Local	Grandeza e tipo de resultado	Modo de obtenção	Figura
Entrada	Tensão Forma de onda	Computacional	4.2 (a)
		Experimental	4.2 (b)
	Corrente Forma de onda	Computacional	4.3 (a)
		Experimental	4.3 (b)
	Corrente Espectro harmônico	Computacional	4.4 (a)
		Experimental	4.4 (b)
Elo CC	Tensão Forma de onda	Computacional	4.5 (a)
		Experimental	4.5 (b)

As figuras 4.2 (a) e (b) apresentam, respectivamente, as formas de onda da tensão empregadas para os estudos computacionais e experimentais.



a) Forma de onda da tensão na entrada do carregador de *notebook* – computacional

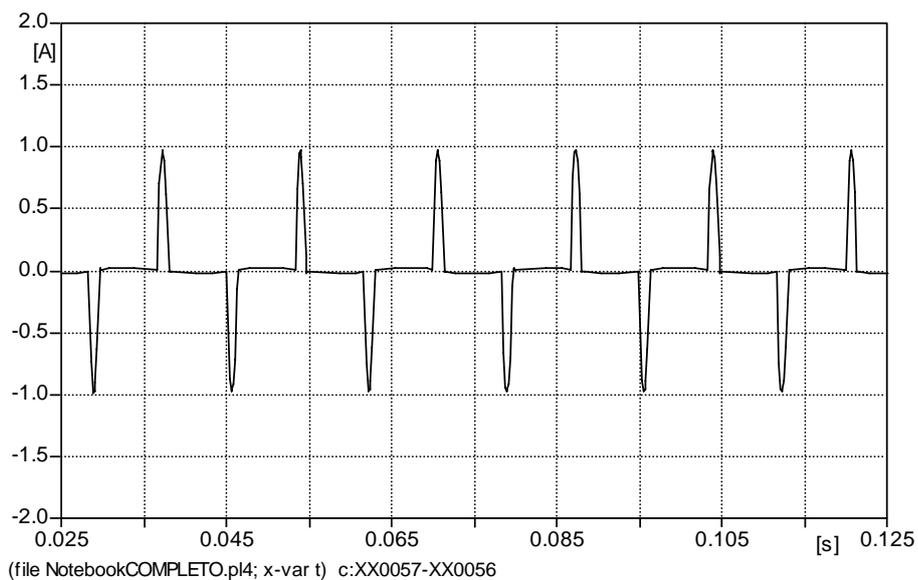


b) Forma de onda da tensão na entrada do carregador de *notebook* – experimental

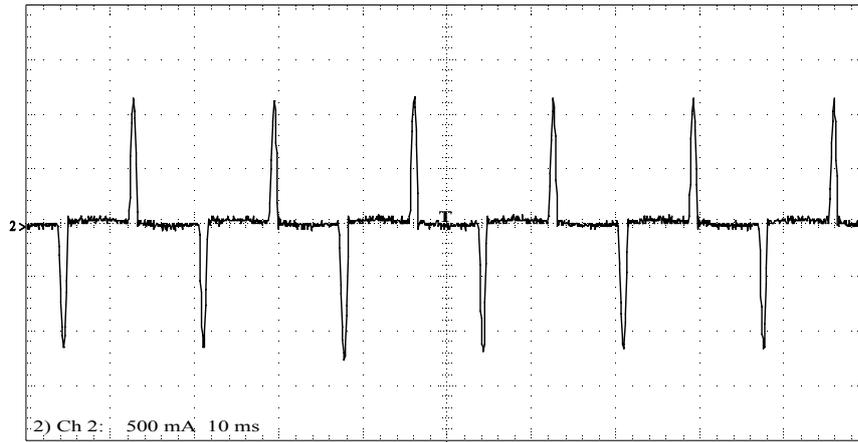
Figura 4.2 – Formas de onda da tensão na entrada do carregador de *notebook*.

Nota-se, pela semelhança entre os gráficos, que a alimentação dos circuitos experimental e computacional foi equivalente. As próximas figuras irão mostrar como as correntes dos circuitos se comportam mediante a essa excitação senoidal.

As figuras 4.3 (a) e (b) mostram as correspondentes formas de onda da corrente na entrada do equipamento. Os seus respectivos espectros harmônicos são indicados nas figuras 4.4 (a) e (b).

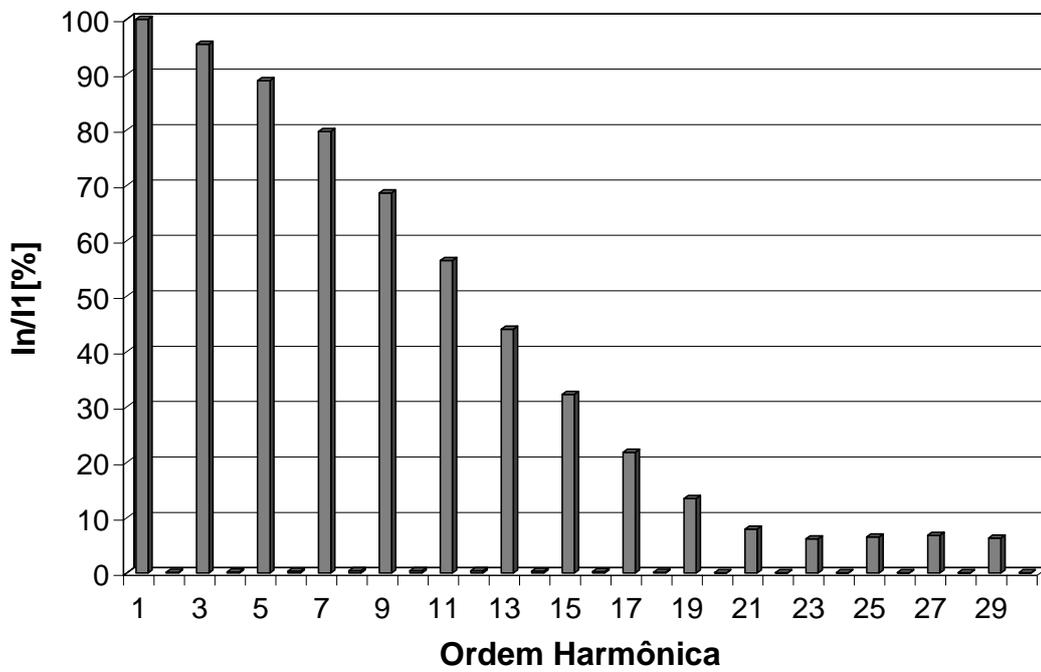


a) Forma de onda da corrente na entrada do carregador de *notebook* – computacional

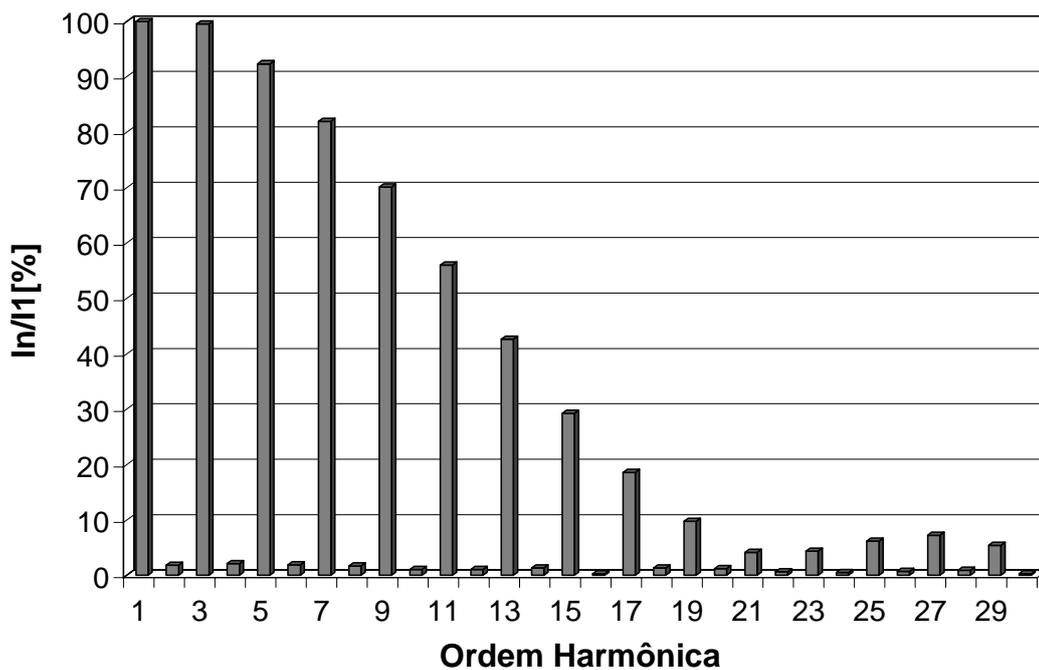


b) Forma de onda da corrente na entrada do carregador de *notebook* – experimental

Figura 4.3 – Formas de onda da corrente na entrada do carregador de *notebook*.



a) Espectro harmônico da corrente de entrada – computacional

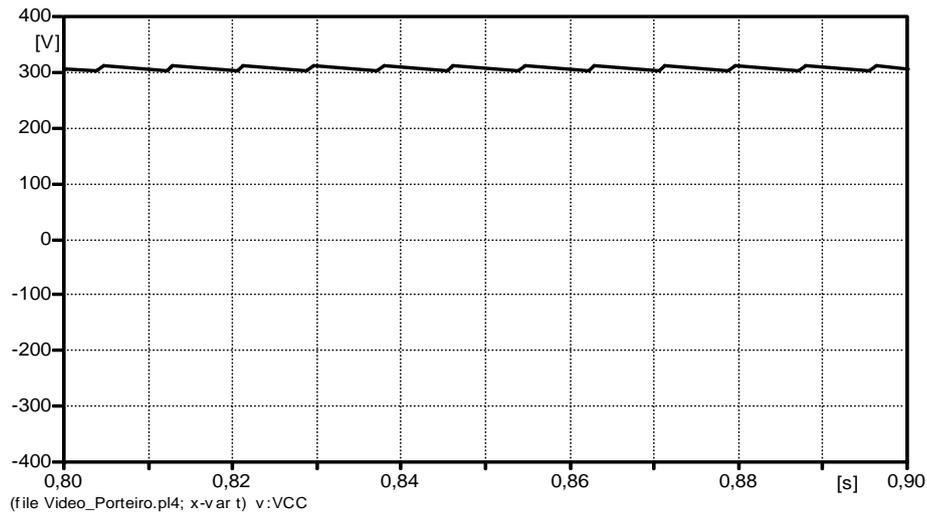


b) Espectro harmônico da corrente de entrada – experimental

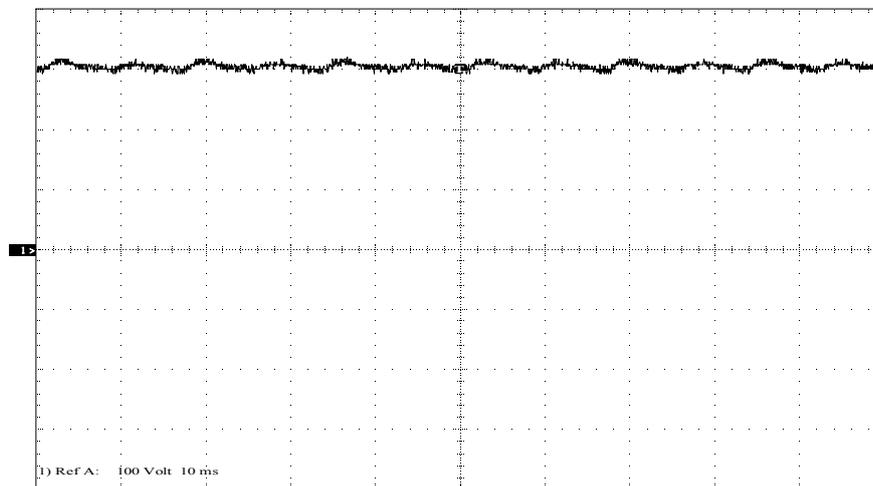
Figura 4.4 – Espectros harmônicos da corrente na entrada do carregador de *notebook*.

A partir das figuras apresentadas acima é possível perceber que a corrente na entrada do carregador de *notebook* se comporta de forma semelhante em ambos os circuitos, principalmente se deixarmos de lado o ruído captado pelo osciloscópio no resultado experimental. Esta análise visual é importante para a validação do modelo computacional já que mostra se a corrente do circuito montado no ATP está se comportando de maneira coerente ao circuito real.

As formas de onda da tensão contínua no elo CC são apresentadas nas figuras 4.5 (a) e (b) associadas, respectivamente, aos estudos computacionais e experimentais.



(a) Forma de onda da tensão no elo CC – computacional



b) Forma de onda da tensão no elo CC – experimental

Figura 4.5 – Formas de onda da tensão contínua no elo CC.

Após a análise das figuras 4.2, 4.3 e 4.5 pode-se verificar que as formas de onda tanto experimentais como computacionais são suficientemente análogas. Para comprovar esta constatação foi construída uma tabela com valores retirados destes gráficos.

A tabela 4.2 resume as principais grandezas monitoradas no circuito do carregador de *notebook*. Os resultados obtidos na forma computacional podem ser facilmente comparados com os experimentais.

Tabela 4.2 – Quadro comparativo entre os resultados computacionais e experimentais – condições ideais e nominais de suprimento.

Local	Grandeza		Simulação	Experimental	Diferença	
Entrada	Corrente	Valor eficaz (A)	0,27	0,244	10,65%	
		Harmônicas mais significativas (%)	3 <sup>a</sup>	92,88	99,56	6,7 %
			5 <sup>a</sup>	82,97	92,23	10%
		THD (%)		160,28	191,28	16 %
		Valor de Pico (A)		0,91	0,960	5,2 %
Elo CC	Tensão	Valor Médio (V)	308,48	298,00	3,5 %	

Finalmente, constata-se que os resultados apresentados no quadro comparativo da tabela 4.2 evidenciam que o modelo computacional proposto e implementado possui boa correlação qualitativa e quantitativa com as características elétricas reais de operação do produto. Isto, numa primeira instância, ratifica o modelo computacional desenvolvido para representar o carregador de *notebook*.

## 4.2 – CARREGADOR DE CELULAR

### 4.2.1 – Metodologia para Modelagem do Circuito

Da mesma forma que se procedeu no caso do carregador de *notebook*, foi empregada uma fonte chaveada na modelagem do carregador de celular. Assim sendo, foram observadas as mesmas grandezas para se obter a validação deste modelo. Estas grandezas são a tensão de entrada do equipamento, a tensão no elo CC – onde a tensão de alimentação encontra-se na forma contínua – e a corrente de entrada. Novamente nenhuma outra corrente foi monitorada uma vez que seu circuito interno é apresentado de forma muito complexa, concomitantemente às dificuldades em se adquiri-las.

A figura 4.6 indica como foi feita a montagem experimental onde se observa o carregador de celular alimentado sob condições nominais de operação. As tensões de suprimento são providas pela fonte de alimentação programável.

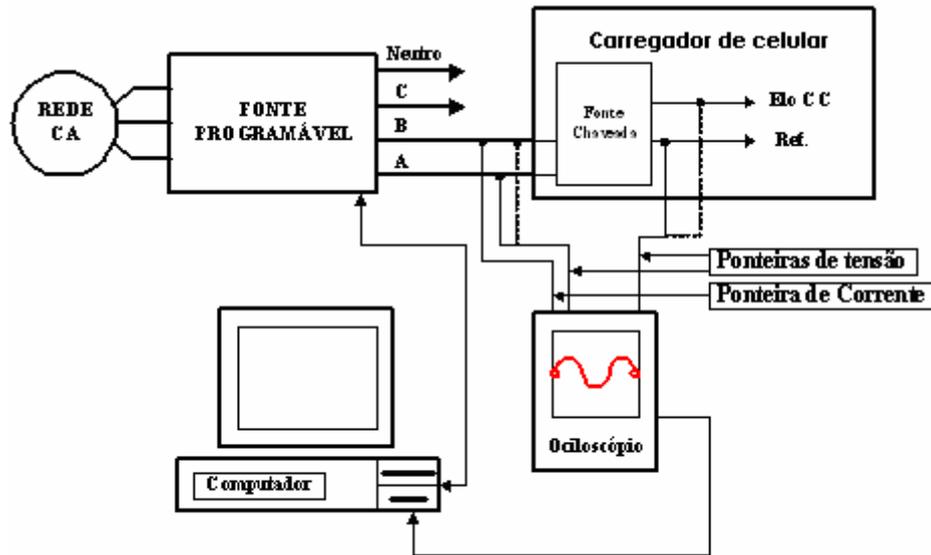


Figura 4.6 – Diagrama de blocos do arranjo utilizado em ensaios laboratoriais para análise de desempenho do carregador de celular.

A fonte programada pelo computador é alimentada pela rede elétrica. Utiliza-se a tensão fase-fase a fim de se obter uma excitação monofásica para o circuito do carregador de celular. O osciloscópio encarrega-se de colher as formas de ondas e os valores das grandezas a serem analisadas.

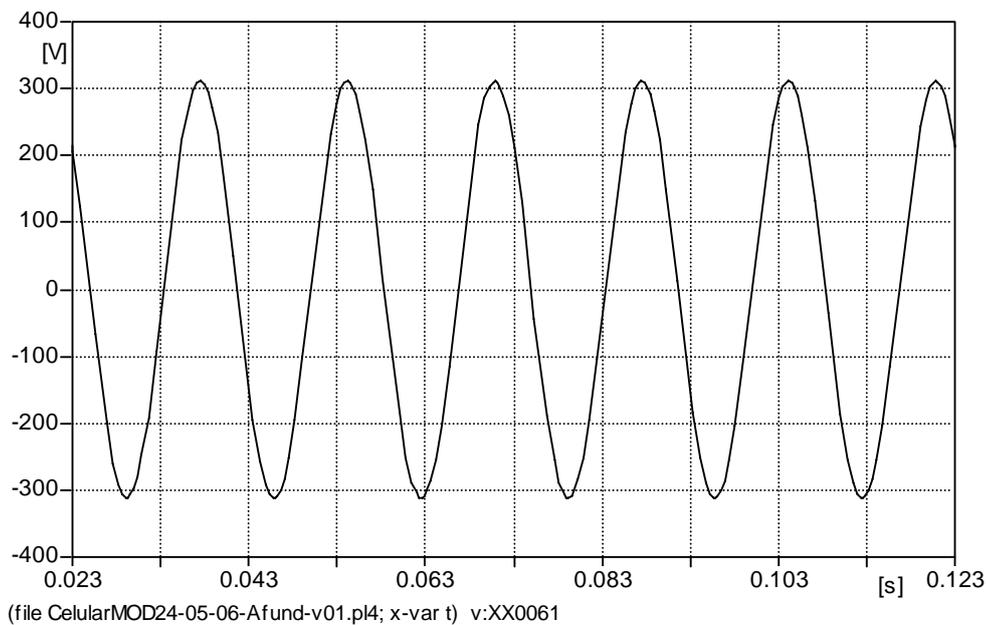
#### 4.2.2 – Resultados Experimentais e Computacionais

De modo a facilitar a interpretação dos resultados, a tabela 4.3 apresenta uma síntese dos resultados obtidos e selecionados para análise.

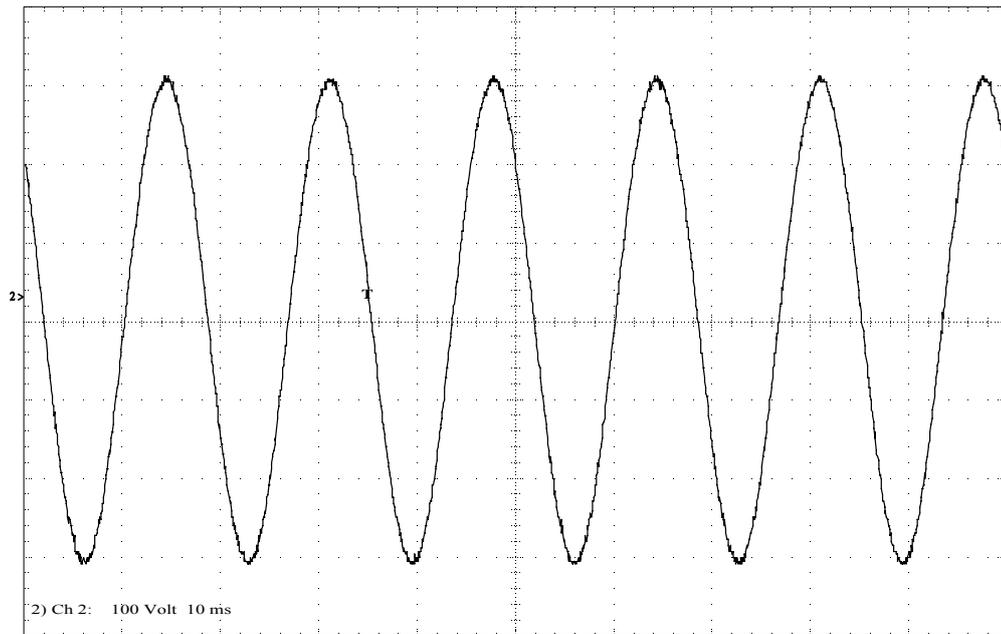
Tabela 4.3 – Síntese dos resultados obtidos do carregador de celular – condições ideais e nominais de suprimento.

<i>Local</i>	<i>Grandeza e tipo de resultado</i>	<i>Modo de obtenção</i>	<i>Figura</i>
<i>Entrada</i>	Tensão Forma de onda	Computacional	4.7 (a)
		Experimental	4.7 (b)
	Corrente Forma de onda	Computacional	4.8 (a)
		Experimental	4.8 (b)
	Corrente Espectro harmônico	Computacional	4.9 (a)
		Experimental	4.9 (b)
<i>Elo CC</i>	Tensão Forma de onda	Computacional	4.10 (a)
		Experimental	4.10 (b)

As figuras 4.7 (a) e (b) apresentam, respectivamente, as formas de onda da tensão empregadas para os estudos computacionais e experimentais.



a) Forma de onda da tensão na entrada do carregador de celular – computacional

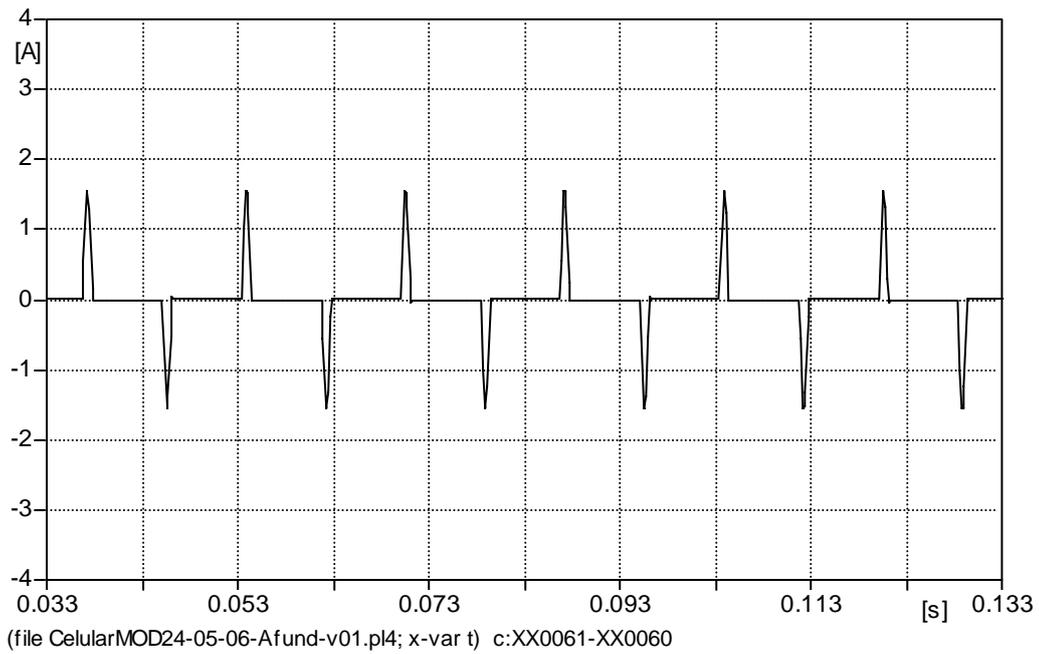


b) Forma de onda da tensão na entrada do carregador de celular – experimental

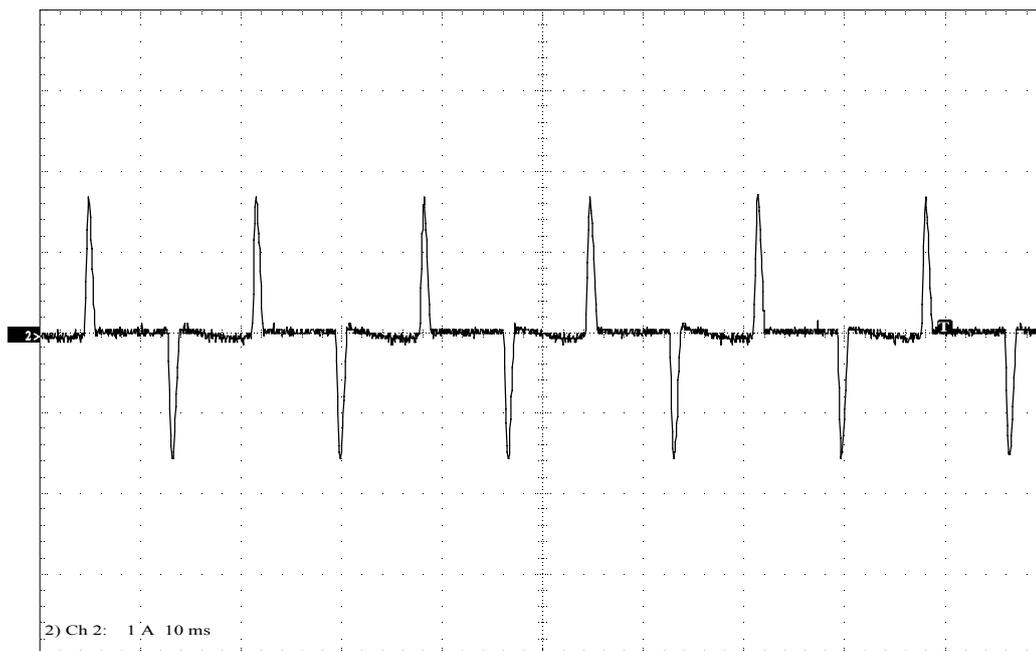
Figura 4.7 – Formas de onda da tensão na entrada do carregador de celular.

Observa-se uma grande semelhança entre as formas de onda apresentadas nas figuras acima. Este fato contribui para a validade dos resultados que serão mostrados a seguir.

As figuras 4.8 (a) e (b) mostram as correspondentes formas de onda da corrente na entrada do equipamento. Os seus respectivos espectros harmônicos são indicados nas figuras 4.9 (a) e (b).

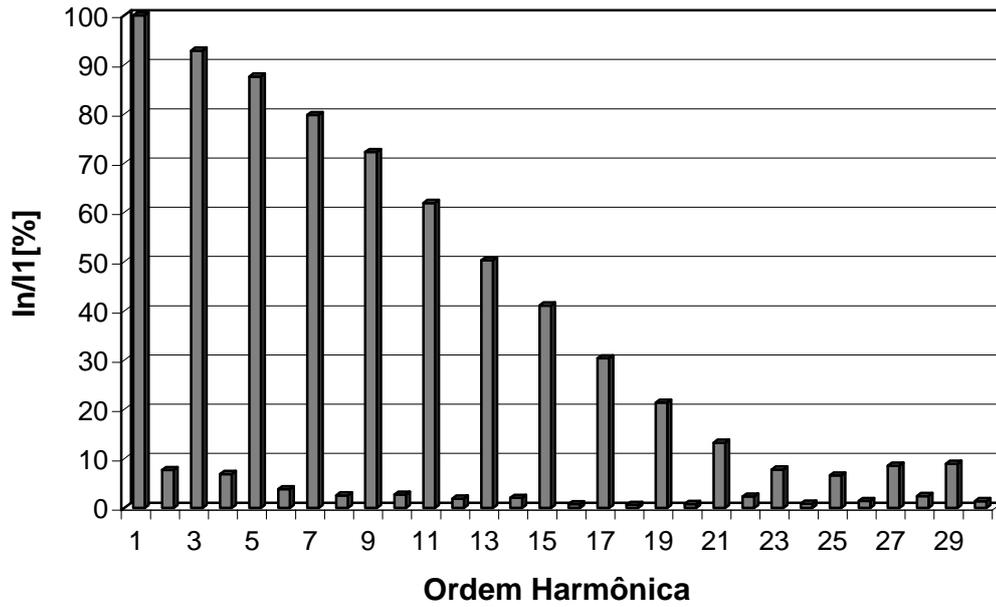


a) Forma de onda da corrente na entrada do carregador de celular – computacional

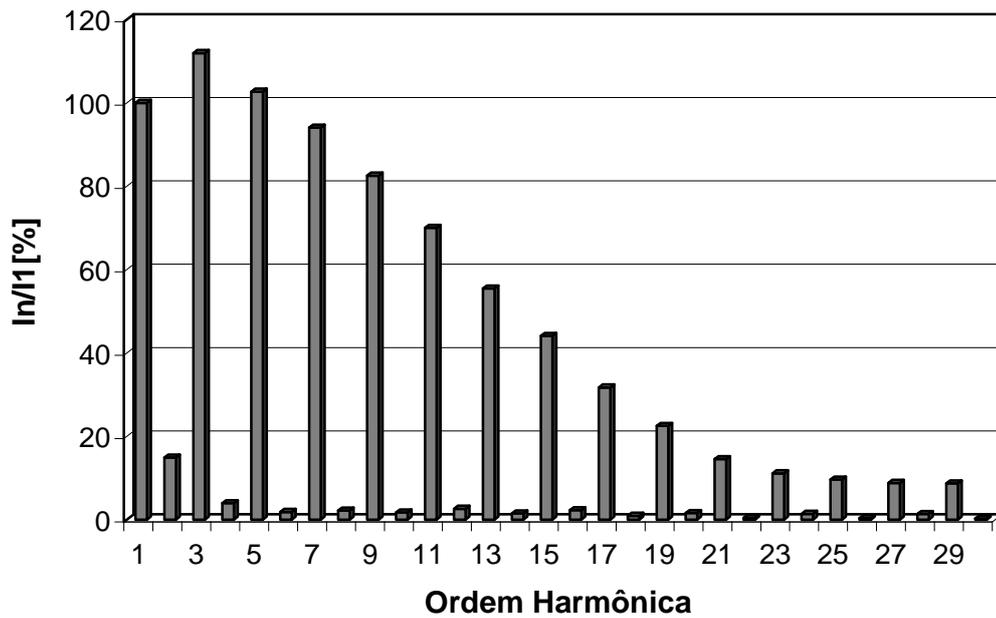


b) Forma de onda da corrente na entrada do carregador de celular – experimental

Figura 4.8 – Formas de onda da corrente na entrada do carregador de celular.



a) Espectro harmônico da corrente de entrada – computacional

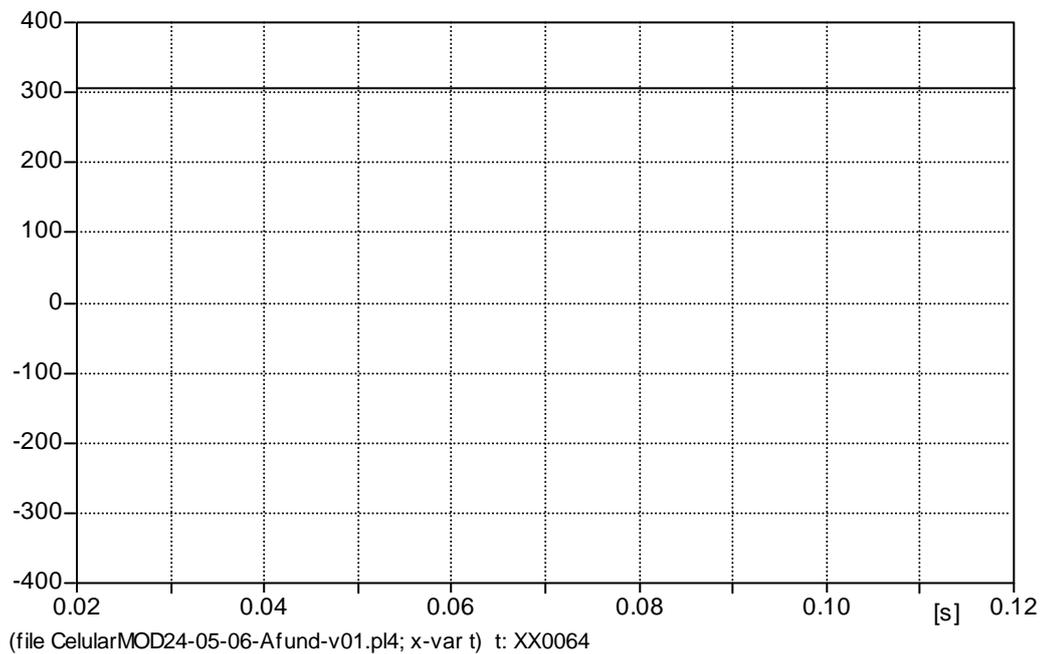


b) Espectro harmônico da corrente de entrada – experimental

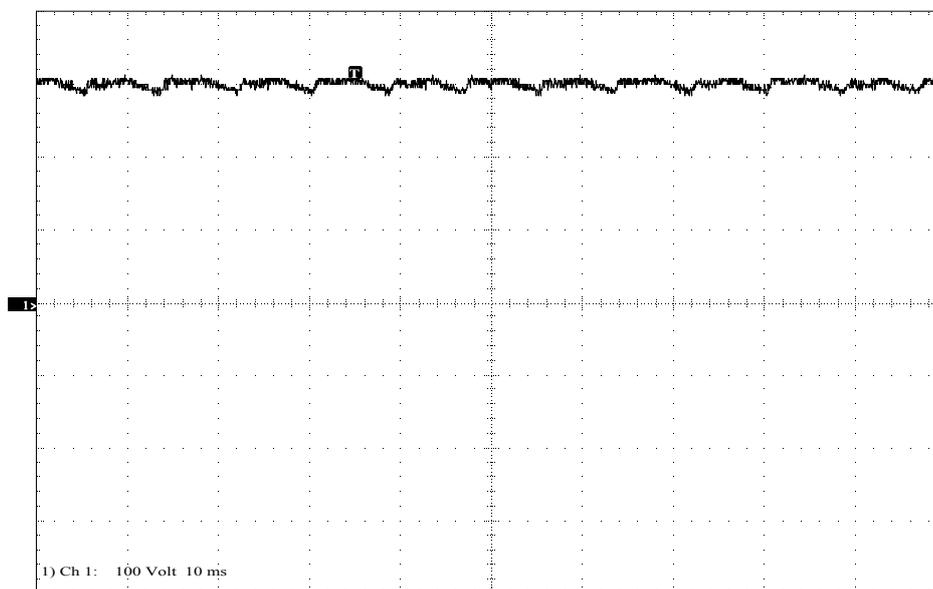
Figura 4.9 – Espectros harmônicos da corrente na entrada do carregador de celular.

Os gráficos das correntes de entrada mostram que há suficiente equivalência entre o que se obteve experimentalmente e o que se esperava na simulação computacional.

As formas de onda da tensão contínua no elo CC são apresentadas nas figuras 4.10 (a) e (b) associadas, respectivamente, aos estudos computacionais e experimentais.



(a) Forma de onda da tensão no elo CC – computacional



b) Forma de onda da tensão no elo CC – experimental

Figura 4.10 – Formas de onda da tensão contínua no elo CC.

Pode-se notar que os valores da tensão contínua na saída do carregador de celular se aproximam de forma satisfatória.

Para corroborar a validação do modelo obtida através da análise visual dos resultados obtidos, uma tabela com os valores das grandezas medidas foi construída.

A tabela 4.4 resume as principais grandezas monitoradas no circuito do carregador de celular. Os resultados obtidos na forma computacional podem ser facilmente comparados com os experimentais.

Tabela 4.4 – Quadro comparativo entre os resultados computacionais e experimentais – condições ideais e nominais de suprimento

<i>Local</i>	<i>Grandeza</i>		<i>Simulação</i>	<i>Experimental</i>	<i>Diferença</i>	
<i>Entrada</i>	Corrente	Valor eficaz (A)	0,371	0,385	3,64 %	
		Harmônicas mais significativas (%)	3 <sup>a</sup>	96,81	111,96	13,53 %
			5 <sup>a</sup>	91,8	102,68	10,6 %
		THD (%)	205,17	226,21	9,3 %	
		Valor de Pico (A)	1,57	1,72	8,72 %	
<i>Elo CC</i>	Tensão	Valor Médio (V)	304,89	300	1,63 %	

Finalmente, constata-se que os resultados apresentados no quadro comparativo da tabela 4.4 evidenciam que o modelo computacional proposto e implementado possui boa correlação qualitativa e quantitativa com as características elétricas reais de operação do produto. Isto, numa primeira instância, ratifica o modelo computacional desenvolvido para representar o carregador de celular.

## **5 – VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL SOB CONDIÇÕES NÃO IDEAIS DE SUPRIMENTO**

O presente capítulo tem por objetivo validar os modelos construídos computacionalmente para o caso em que o circuito é submetido a distúrbios relacionados à qualidade da energia. Isto será feito comparando-se valores medidos em laboratório com aqueles obtidos através de simulação. Os casos são apresentados separadamente no decorrer do capítulo, de acordo com a perturbação introduzida à alimentação.

Cada aparelho será validado separadamente, como se pode ver a seguir.

### **5.1 – FONTE DE CARREGADOR DE *NOTEBOOK***

No capítulo anterior foi esclarecido que por se tratar de uma fonte chaveada, as grandezas que foram monitoradas para se obter a validação deste modelo foram a tensão de entrada do equipamento, a tensão no elo CC e a corrente de entrada. Também foi citado que nenhuma outra corrente foi levada em conta devido à complexidade do circuito interno, aliado às limitações de ordem técnica quanto a sua aquisição. Neste capítulo as grandezas monitoradas são as mesmas com a diferença que, desta vez, a entrada do circuito não será puramente senoidal.

A figura 4.1 mostra o arranjo físico utilizado, no qual se observa o carregador de *notebook* alimentado sob condições não-nominais de operação. As tensões de suprimento providas pela fonte de alimentação programável foram alteradas com o intuito de simular os seguintes fenômenos: tensões harmônicas, flutuações de tensão, VTCD's e transitórios.

#### **5.1.1 – Tensões Harmônicas**

As figuras 5.1 e 5.2 mostram os resultados computacionais e experimentais obtidos pelo equipamento em estudo, quando este é alimentado por uma fonte supridora contendo distorções harmônicas de tensão. Neste sentido, são apresentados os oscilogramas das tensões e correntes para uma DHT de 20% da tensão fundamental.

Estes gráficos exibem as formas de onda da tensão aplicada juntamente com a corrente total consumida pela carga, para os casos computacional e experimental, respectivamente.

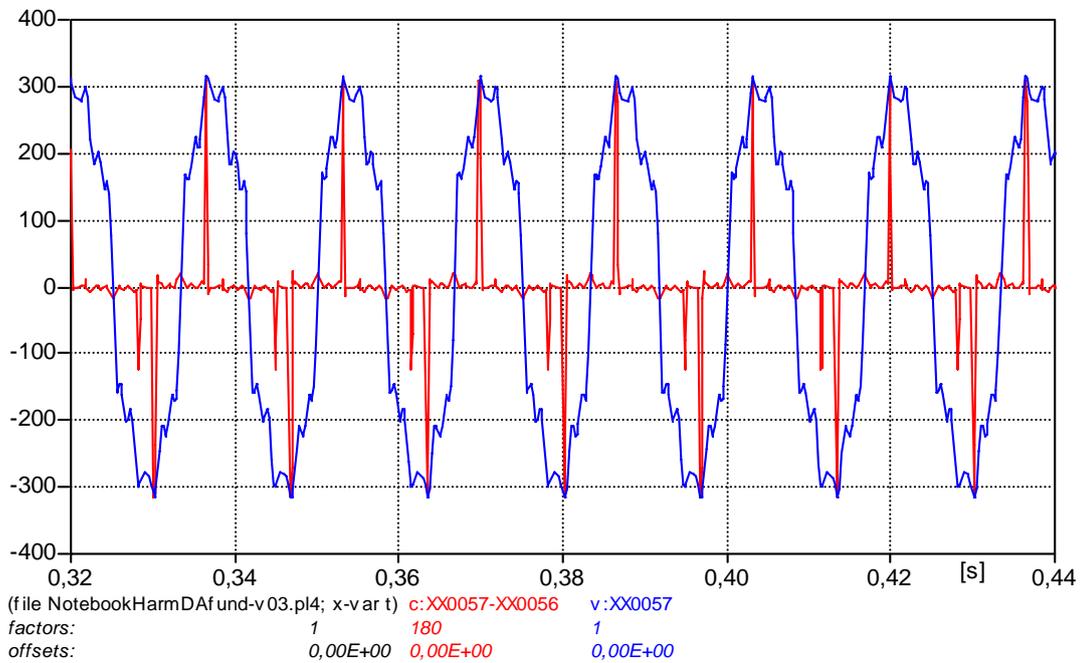


Figura 5.1 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.

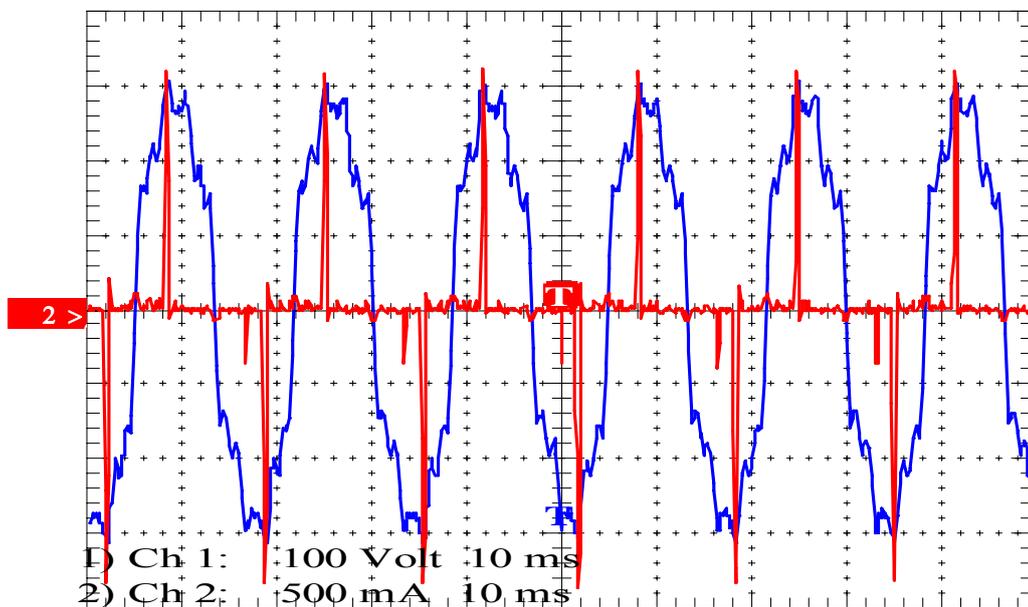


Figura 5.2 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental.

Das figuras acima, pode-se notar que a semelhança entre as respostas obtidas pelos dois métodos é bastante significativa, fato este que, mais uma vez, ratifica a adequação do modelo implementado computacionalmente.

Na seqüência são apresentadas as figuras 5.3 e 5.4. Estas mostram, respectivamente, os gráficos da tensão no elo CC para o ensaio computacional e o experimental.

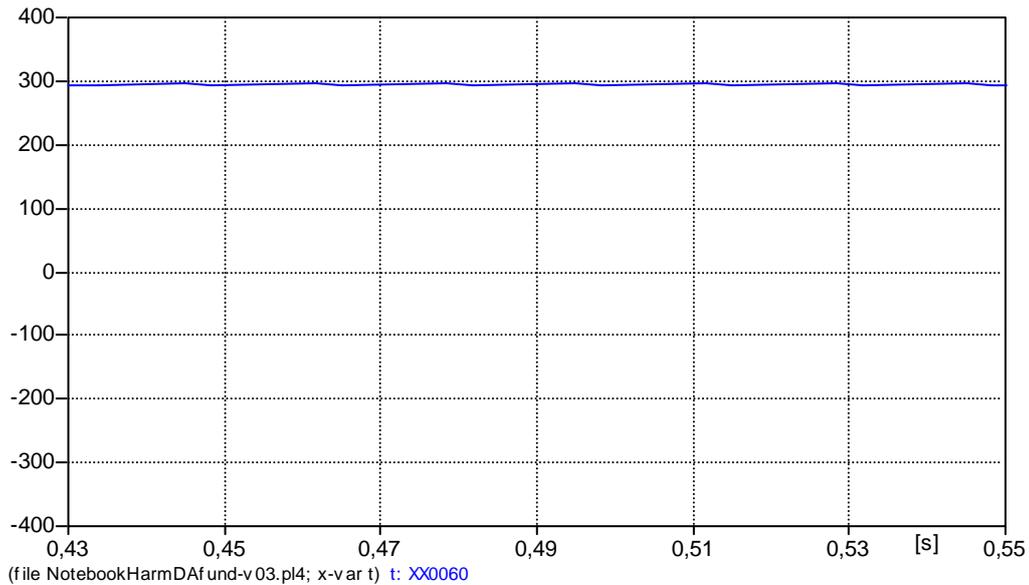


Figura 5.3 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimental sofre uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.

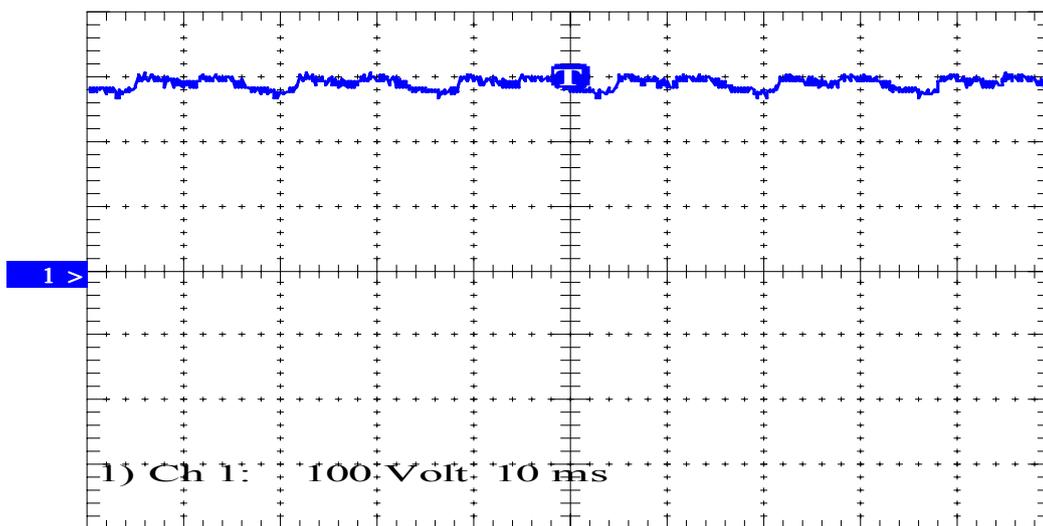


Figura 5.4 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimental sofre uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental.

Para esta grandeza, constata-se uma grande equivalência entre as formas de onda apresentadas.

A tabela 5.1 sintetiza os resultados obtidos das análises computacionais experimentais. Como esclarecido, estes refletem a operação do equipamento sob condições distorcidas para a tensão de alimentação. Os erros detectados entre as respostas computacionais e experimentais evidenciam uma boa correlação entre os valores, mostrando, assim, que o modelo proposto apresenta uma boa correlação com o funcionamento real do produto.

Tabela 5.1 – Síntese das grandezas observadas – distorções harmônicas de tensão.

Local	Grandeza		Computacional	Experimental	Diferença	
<b>Entrada</b>	Corrente	Valor eficaz (mA)	0,359	0,332	8,13 %	
		Valor de Pico (A)	-1,75	-1,86	5,91 %	
		Harmônicas mais significativas (%)	3 <sup>a</sup>	47,35	48,68	2,73 %
			5 <sup>a</sup>	28	23,77	17,79%
		THD (%)	243,88	264,99	7,97 %	
<b>Elo CC</b>	Tensão	Valor Médio (V)	304,02	308	1,29 %	

### 5.1.2 – Flutuações de Tensão (“Flicker”)

Complementarmente aos estudos anteriores, um outro item de distúrbio considerado nos trabalhos investigativos compreendeu a resposta do carregador de *notebook* perante um suprimento contendo flutuações de tensão.

As figuras 5.5 a 5.8 expressam os resultados obtidos para as simulações digitais e os ensaios experimentais realizados neste módulo. Para fins do presente ensaio, a fonte de suprimento disponibilizou uma excitação contendo uma flutuação de tensão responsável por um indicador de cintilação luminosa (Pst) da ordem de 5 pu.

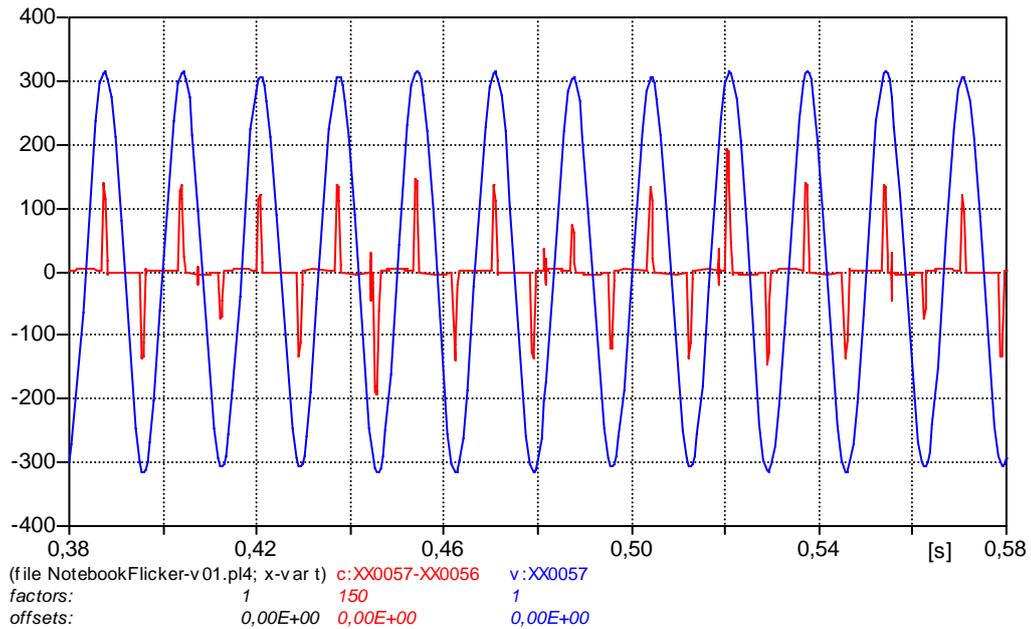


Figura 5.5 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Computacional.

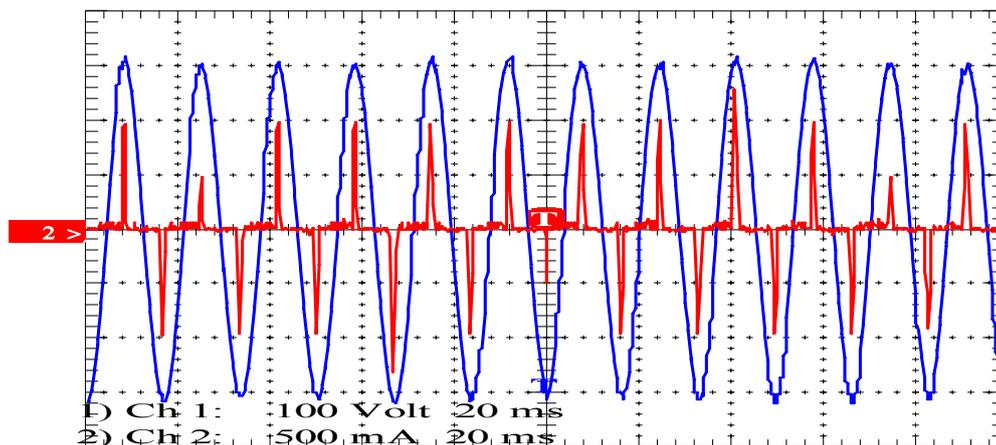


Figura 5.6 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Experimental.

Como pode ser observado nas figuras 5.5 e 5.6, a corrente na entrada do equipamento apresenta, como seria esperado, variações no seu valor de pico. Estas acompanham as oscilações das correspondentes tensões.

As figuras 5.7 e 5.8 apresentam os resultados para a tensão no elo CC do equipamento.

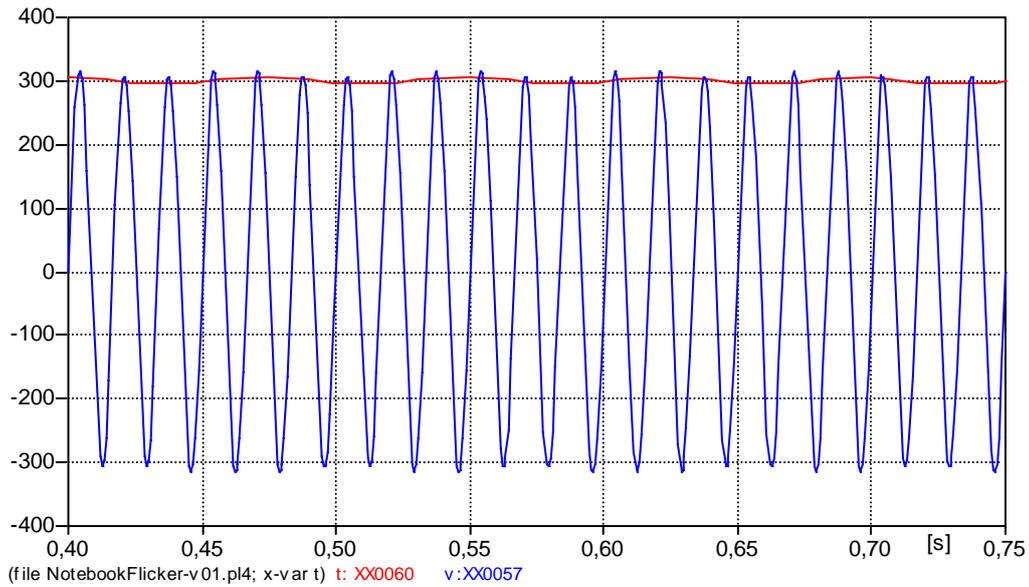


Figura 5.7 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Computacional.

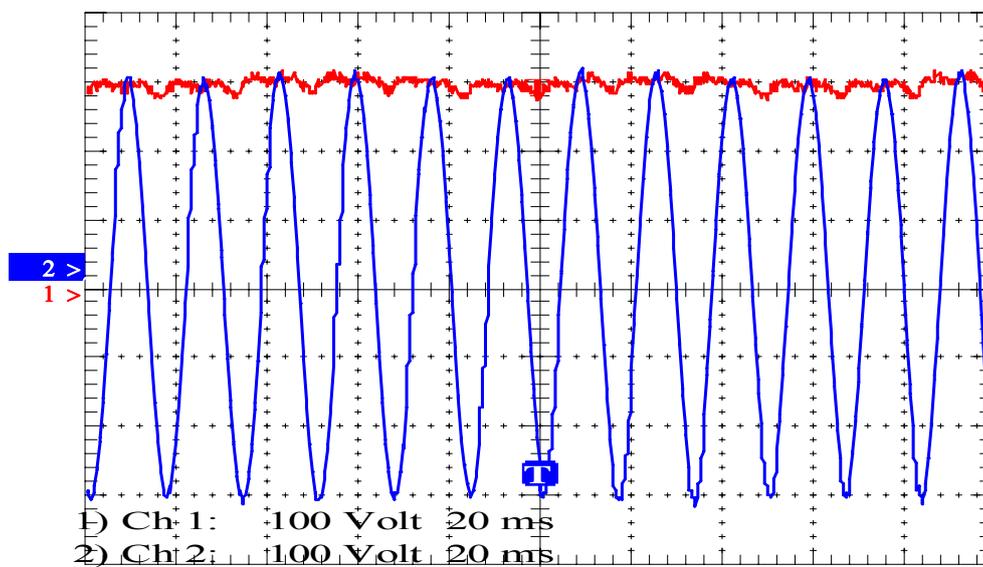


Figura 5.8 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Experimental.

Como pode ser visto, a forma de onda obtida através da simulação computacional apresenta as mesmas características que aquela advinda do ensaio experimental.

A tabela 5.2 sintetiza os principais resultados obtidos dos trabalhos de investigação computacional e experimental, para o caso de suprimento contendo oscilação de tensão nos níveis adotados no presente estudo.

Tabela 5.2 – Síntese das principais grandezas observadas para uma oscilação de tensão – PST = 5

Local	Grandeza		Computacional	Experimental	Diferença
Entrada	Corrente	Valor eficaz (mA)	270	250	8,0%
		Valor de Pico (A)	1,27	1,28	0,78%
Elo CC	Tensão	Valor Médio (V)	304,36	297	2,48%

### 5.1.3 – Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's)

Esta etapa compreende as variações de tensão de curta duração. Como estabelecido na proposta de testes, estes fenômenos se dividem em três categorias:

- Afundamento de tensão de curta duração;
- Interrupção de tensão e;
- Elevação de tensão.

Os resultados obtidos dos ensaios e correspondentes simulações, para cada um dos itens descritos, são analisados na seqüência.

#### 5.1.3.1 - Afundamento de Tensão de Curta Duração

As figuras 5.9 a 5.12 ilustram o comportamento computacional e experimental do carregador de *notebook*, contemplando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

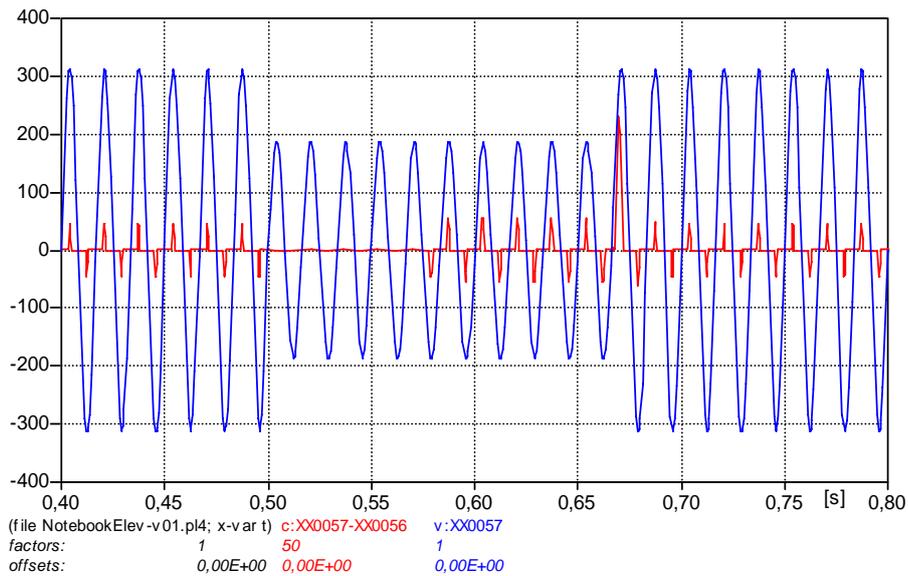


Figura 5.9 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.

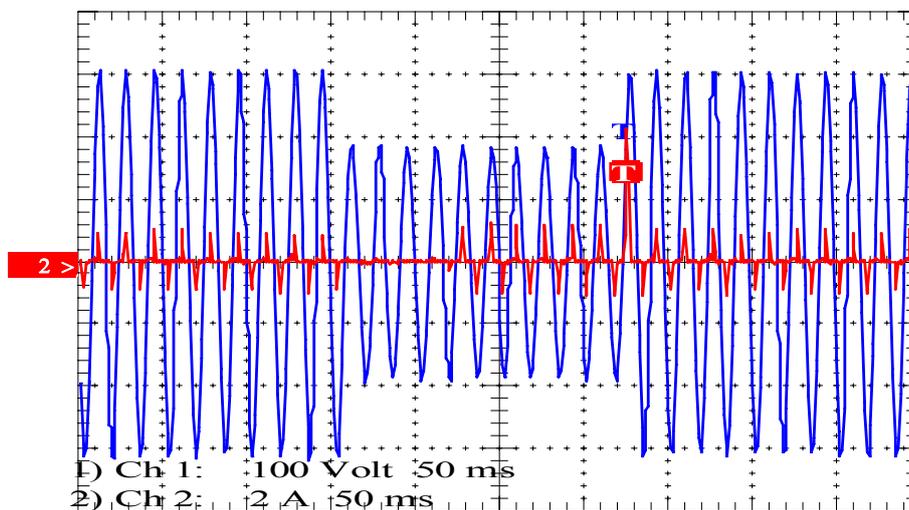


Figura 5.10 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.

Conforme apresentado, como resposta ao afundamento de tensão aplicado, a corrente solicitada pelo carregador de *notebook* se anula pela polarização reversa dos diodos da ponte retificadora, permanecendo nesta condição enquanto a tensão do capacitor for maior que a da rede. Uma vez restabelecida a tensão, como se constata nestas figuras, ocorre um pico de corrente (cerca de 4 vezes o valor nominal) devido à recarga do capacitor, restabelecendo a condição de regime permanente após alguns ciclos.

As figuras 5.11 e 5.12 ilustram as formas de onda da tensão de alimentação e da tensão no elo CC do aparelho, obtidas pelo método computacional e experimental, respectivamente, para o afundamento supra referido.

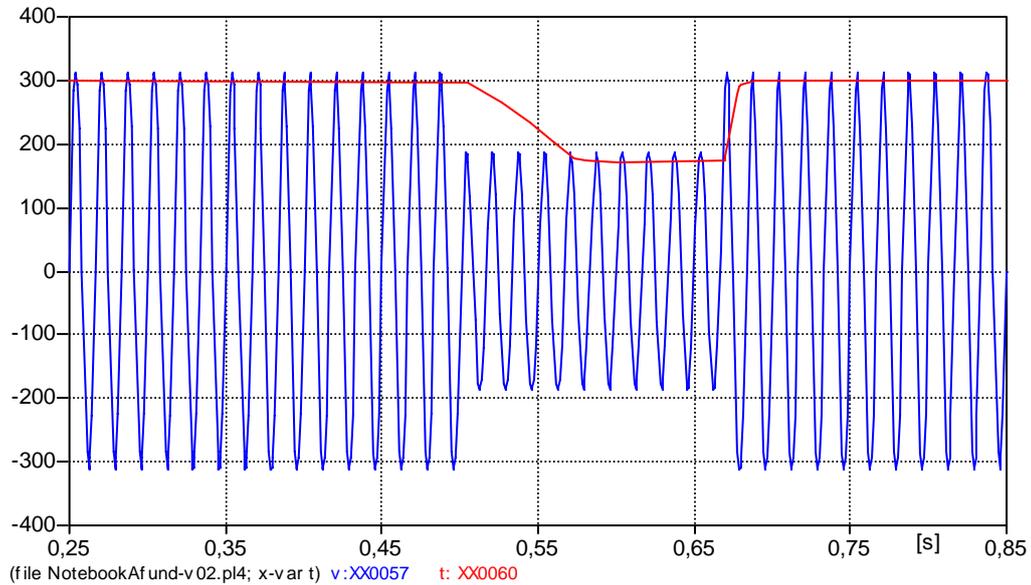


Figura 5.11 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.

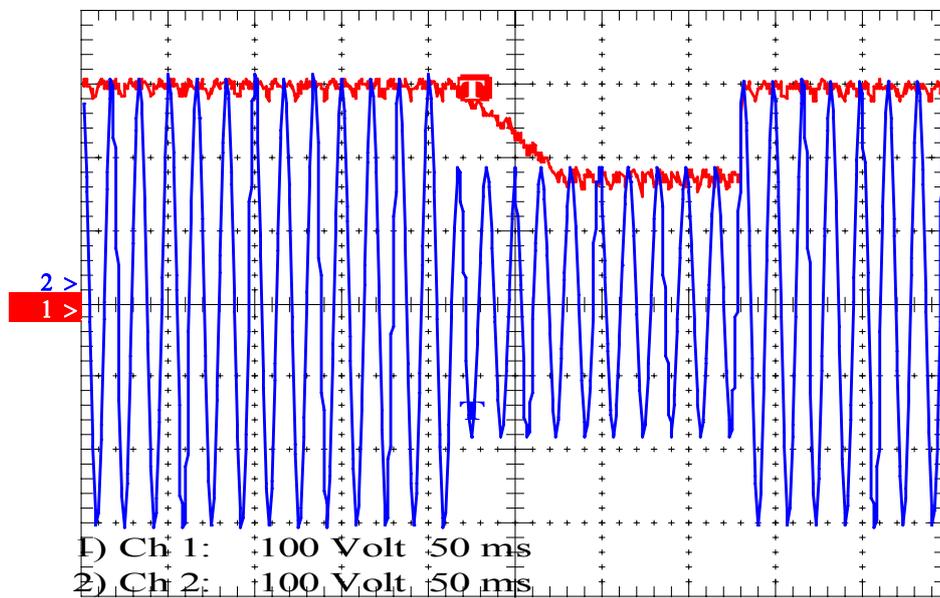


Figura 5.12 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação e sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.

Observa-se nas figuras que, a tensão no elo CC acusou um afundamento correspondente, apresentando um decréscimo em seu valor para um nível compatível com aquele

apresentado pela tensão de alimentação. Analogamente, a tensão retorna ao seu patamar inicial quando a tensão da rede assume seu valor nominal.

Da análise dos resultados anteriores observa-se, mais uma vez, uma boa concordância qualitativa e quantitativa entre os resultados.

### 5.1.3.2 - Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica

Os estudos computacional e experimental realizados nesta seção objetivam analisar o desempenho do modelo computacional do carregador de *notebook* sob condições de interrupção do fornecimento de energia elétrica.

As figuras 5.13 e 5.14 ilustram os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo dispositivo, obtidos pelos métodos computacional e experimental. Os resultados evidenciam uma interrupção por 10 ciclos, findo o qual a tensão é restaurada ao seu valor nominal.

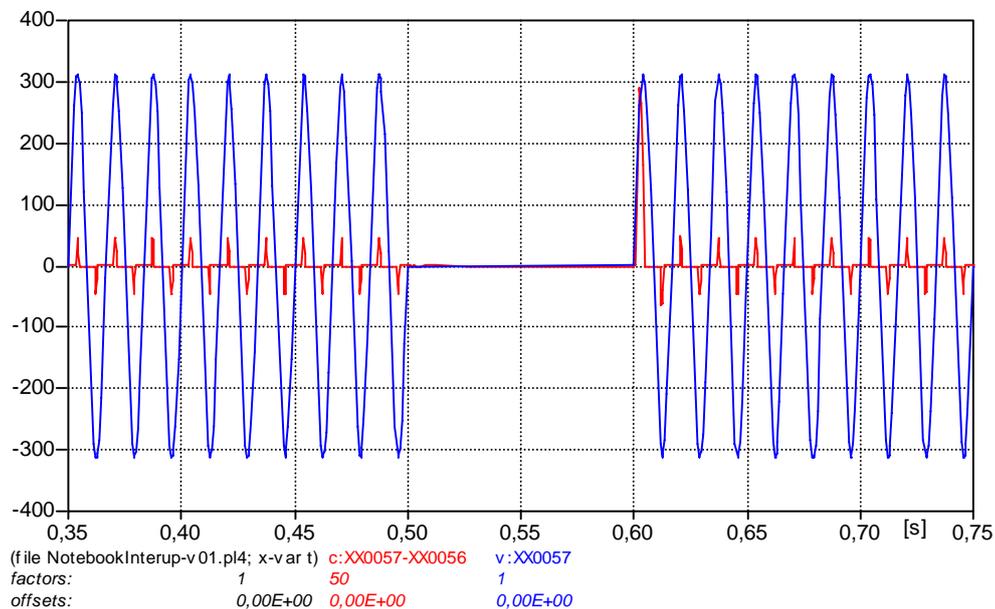


Figura 5.13 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 3 ciclos – Computacional.

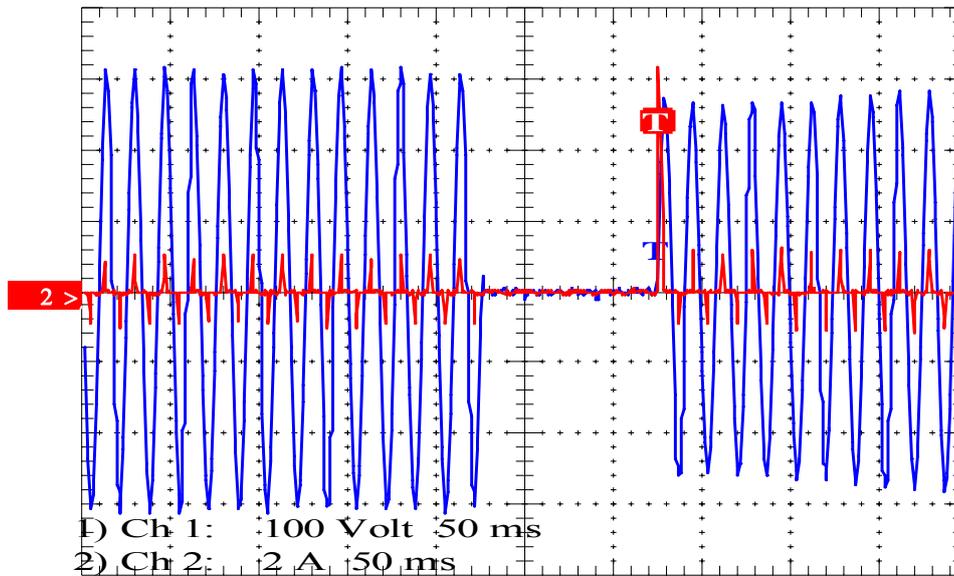


Figura 5.14 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 3 ciclos – Experimental.

Observa-se nas duas figuras anteriores que, novamente, no instante da aplicação da interrupção, a corrente na entrada do carregador de *notebook* se anula, permanecendo nesta situação enquanto perdura o distúrbio, de modo semelhante ao que foi apresentado anteriormente para o caso de afundamento de tensão. Esta constatação é atribuída à polarização reversa dos diodos da retificação. No instante do restabelecimento da tensão aos padrões de regime permanente, ocorre um pico de corrente bastante considerável, de 6 vezes o seu valor sob condições normais de operação.

As figuras 5.15 e 5.16 ilustram as formas de onda da tensão de alimentação e da tensão no elo CC do aparelho, obtidas pelo método computacional e experimental, respectivamente.

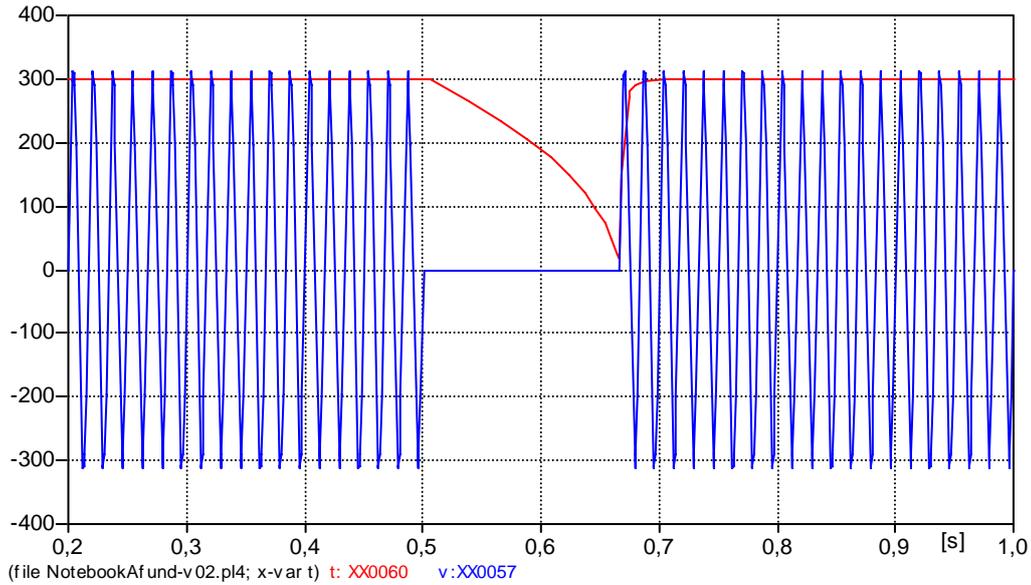


Figura 5.15 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Computacional.

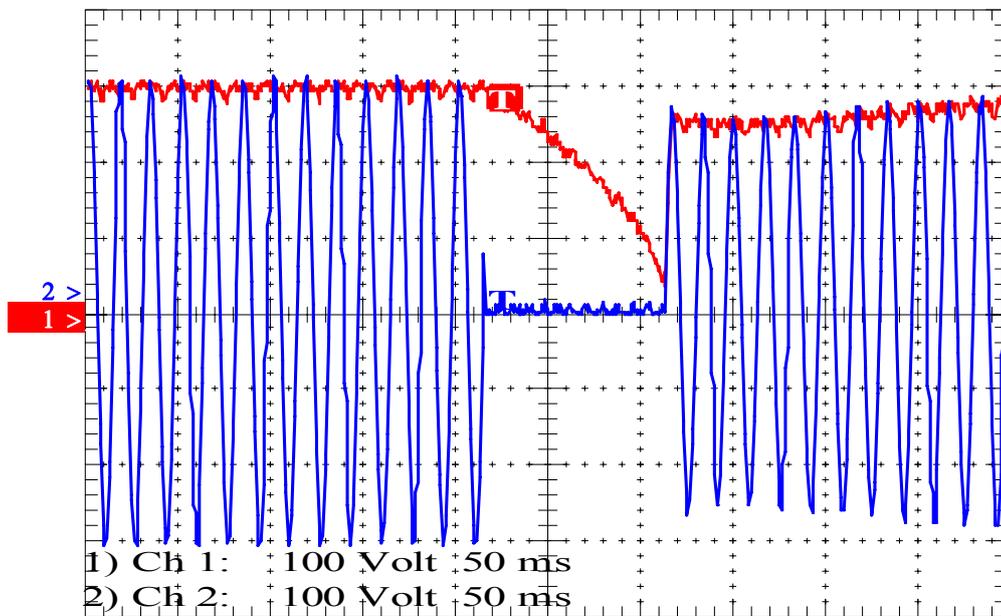


Figura 5.16 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Experimental.

Com relação às figuras que ilustram o comportamento da tensão no elo CC, verifica-se a repetição do que se observou no caso já apresentado de afundamento de tensão, ou seja, uma queda na tensão no elo CC. Entretanto, antes que esta grandeza atingisse o valor da tensão de alimentação, para o caso um valor nulo, a interrupção foi extinta devido à duração do evento. Conseqüentemente, o equipamento não sofreu nenhuma alteração em

seu funcionamento, pelo fato do capacitor situado na entrada do equipamento ter suprido a alimentação dos circuitos internos do aparelho durante a interrupção.

Constata-se que, novamente, é grande a semelhança dos resultados obtidos por ambos os métodos, fato este que ratifica, mais uma vez, o desempenho do modelo computacional implementado.

### 5.1.3.3 - Elevação de Tensão de Curta Duração

Este item tem por objetivo verificar o desempenho do carregador de *notebook*, pelos métodos computacional e experimental, quando o dispositivo experimenta uma elevação momentânea de tensão.

A figura 5.17 ilustra a forma de onda da tensão de suprimento, contendo uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 6 ciclos. A respectiva corrente solicitada pelo carregador de *notebook*, resultante da alimentação imposta, também é ilustrada.

A figura 5.18 ilustra as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente do dispositivo, para o caso computacional.

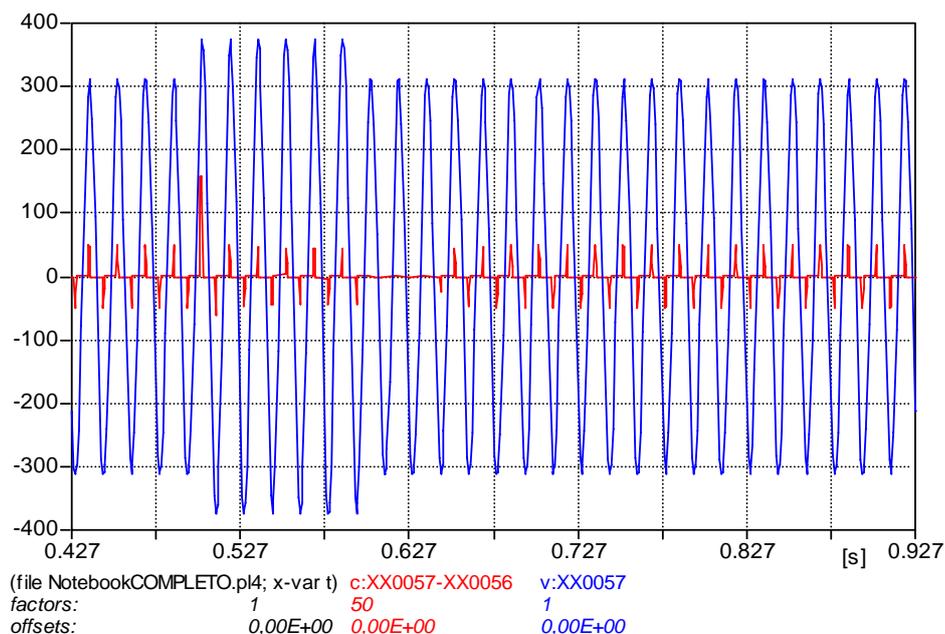


Figura 5.17 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 6 ciclos – Computacional.

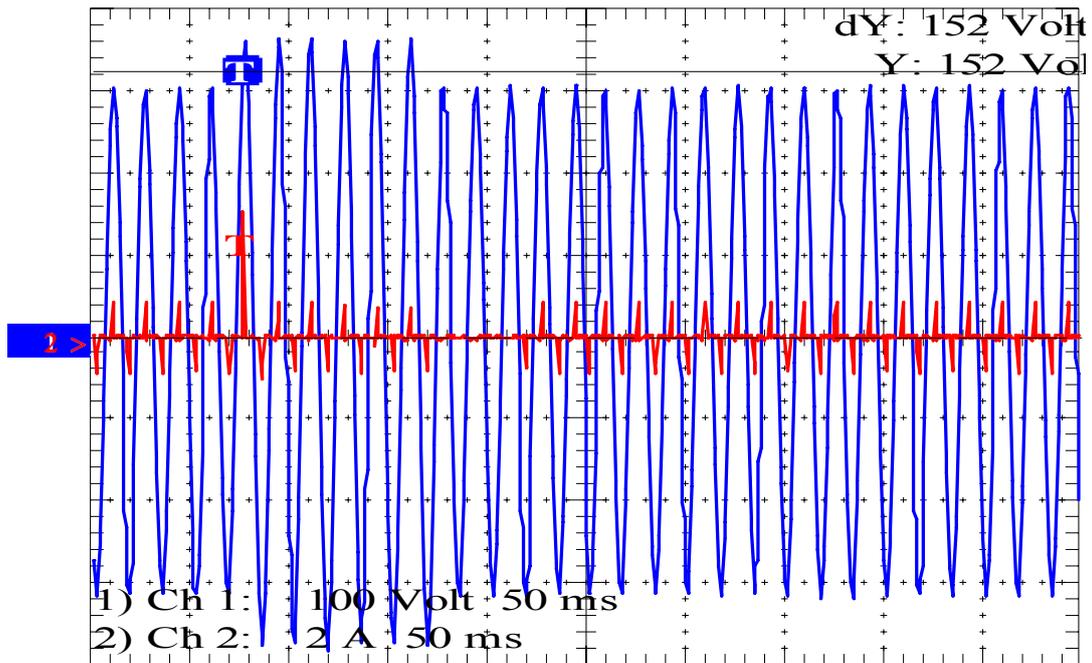


Figura 5.18 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 6 ciclos – Experimental.

Observa-se nas figuras 5.17 e 5.18, que no instante da elevação da tensão ocorre um pico de corrente (cerca de 8 vezes o valor nominal), associada com a operação do capacitor existente no elo CC do equipamento. No término da perturbação a corrente se anula por alguns ciclos, assumindo os valores de regime permanente em seguida.

As figuras 5.19 e 5.20 ilustram as formas de onda da tensão de alimentação e da tensão no elo CC do aparelho, obtidas pelo método computacional e experimental, respectivamente.

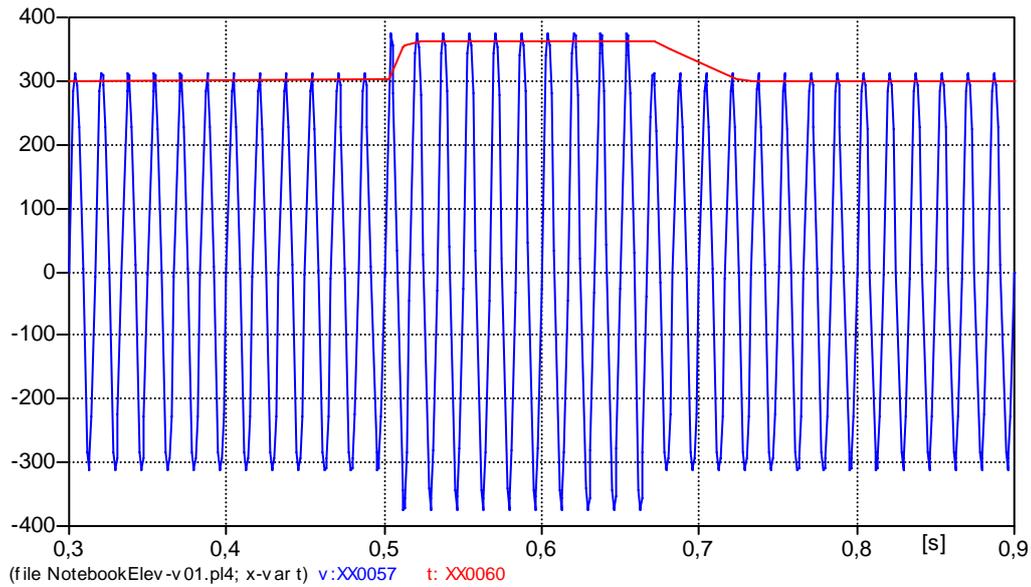


Figura 5.19 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.

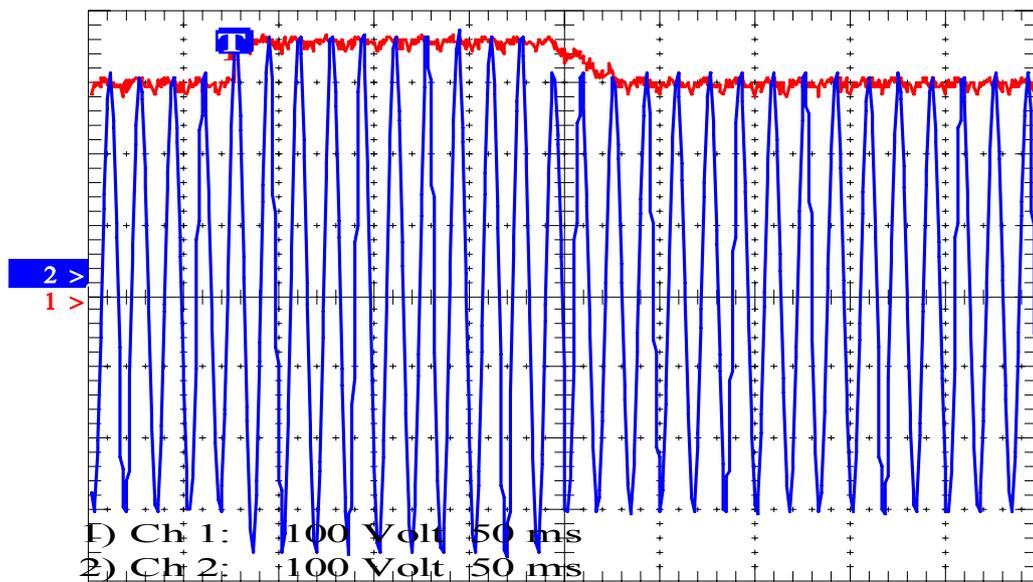


Figura 5.20 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.

Esse fenômeno, contrariamente ao afundamento de tensão analisado, se reflete na tensão do elo CC. Há um aumento significativo na tensão do elo CC que pode ocasionar problemas ao equipamento que não foi projetado para suportar maiores tensões por um tempo elevado. Este comportamento é ilustrado nas figuras 5.19 e 5.20 nas quais se percebe a semelhança dos resultados para ambos os métodos utilizados.

### 5.1.4 – Transitórios

Este item tem por objetivo analisar o desempenho do carregador de *notebook* quando o mesmo é subitamente exposto à distúrbios de natureza transitória, os quais são comuns nas tensões de suprimento.

As figuras 5.21 e 5.22 mostram, respectivamente, os oscilogramas da tensão aplicada juntamente com a corrente solicitada pela carga, para os casos computacional e experimental.

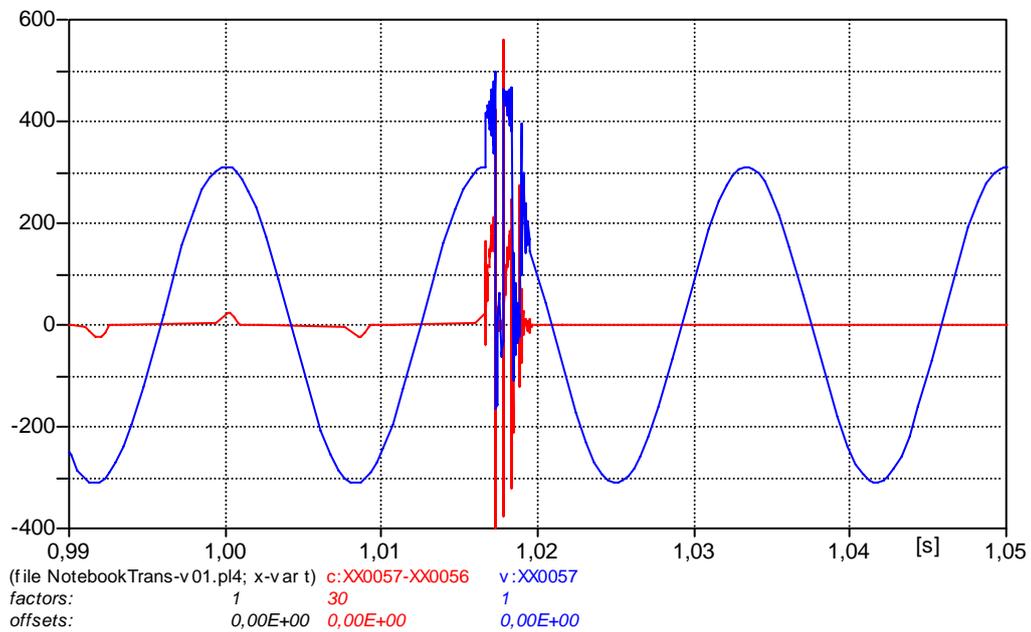


Figura 5.21 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional.

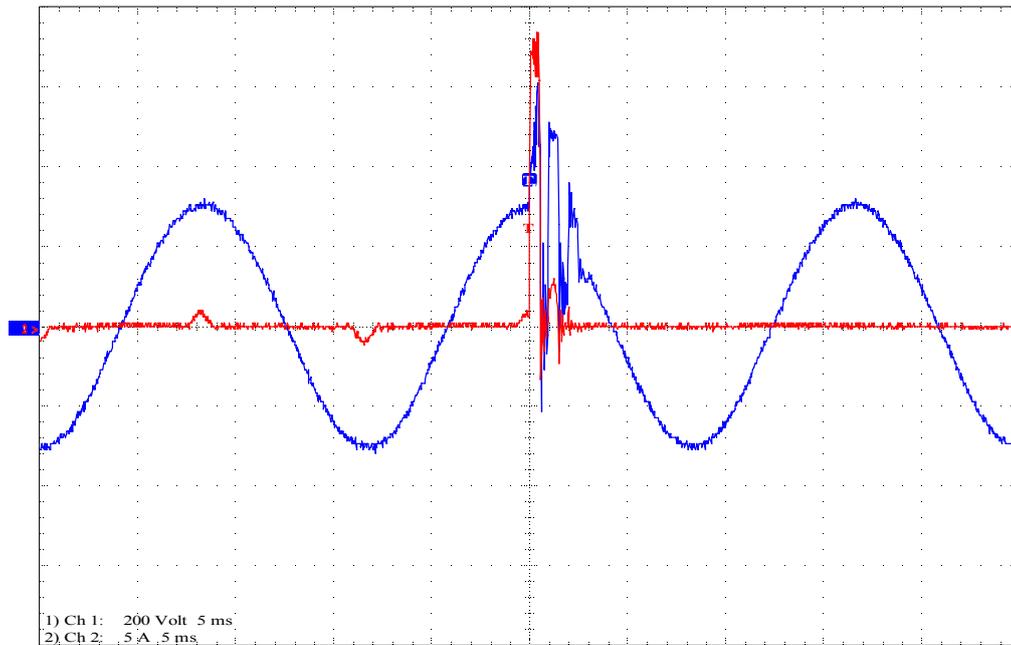


Figura 5.22 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental.

Observa-se, através das figuras, que o carregador de *notebook* solicita um elevado pico de corrente em resposta à elevação súbita na tensão de fornecimento. Não obstante esta corrente tenha alcançado valores elevados, cerca de 20 vezes o valor nominal, nenhuma anormalidade foi verificada quanto ao desempenho deste equipamento.

Na seqüência, as figuras 5.23 e 5.24 mostram, respectivamente, os oscilogramas da tensão no elo CC para o teste computacional e experimental.

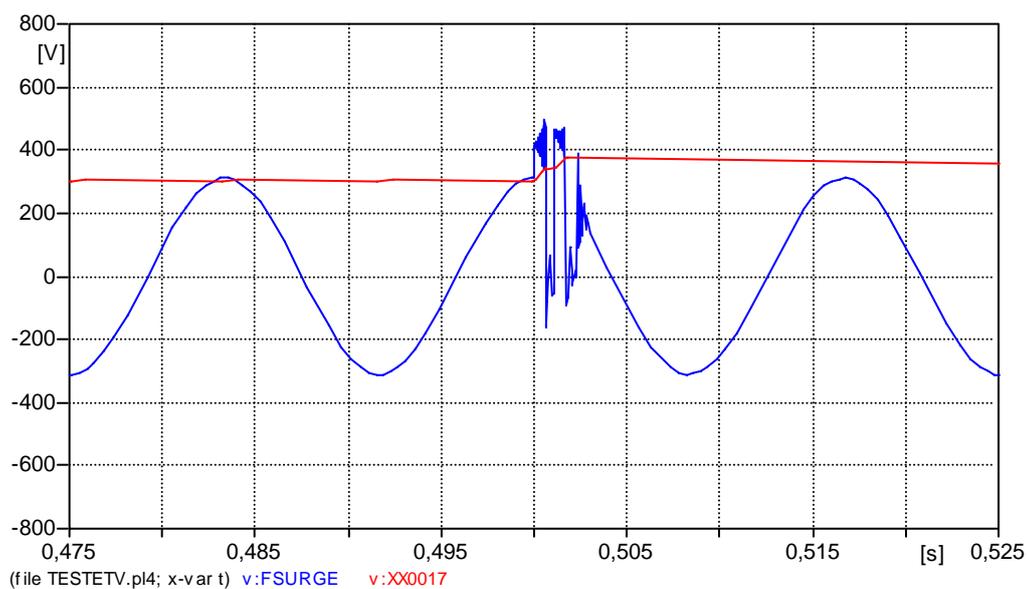


Figura 5.23 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional.

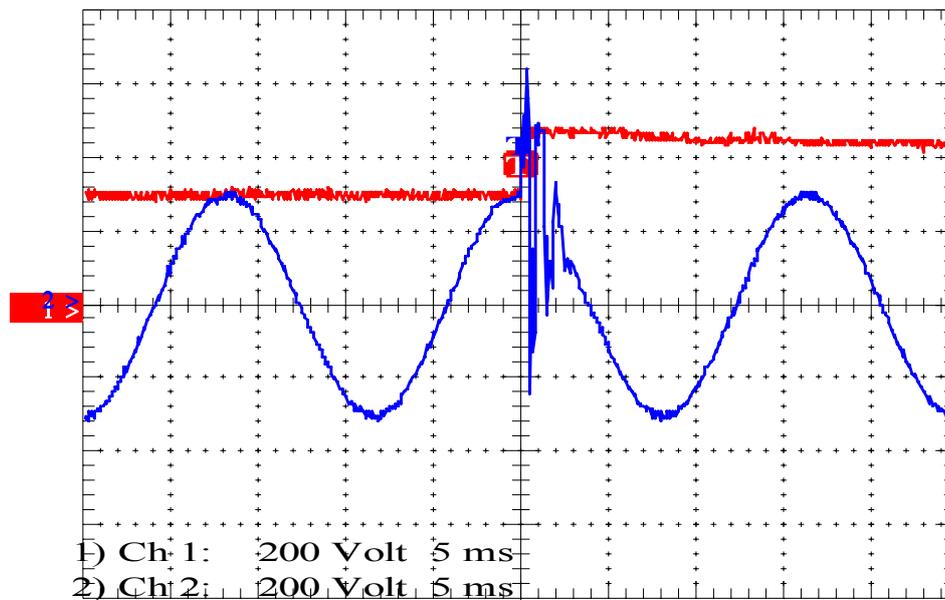


Figura 5.24 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental.

Como pode ser observado, a tensão no elo CC apresenta uma pequena elevação do seu nível no instante da aplicação do transitório de tensão.

Neste último ensaio também houve grande concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos, fato este que ratifica a adequação do modelo implementado computacionalmente.

## 5.2 – FONTE DE CARREGADOR DE CELULAR

No capítulo anterior foi esclarecido que, assim como o carregador de *notebook*, o carregador de celular trata-se de uma fonte chaveada. As grandezas monitoradas para se obter a validação naquele momento foram a tensão de entrada do equipamento, a tensão no elo CC – onde a tensão de alimentação encontra-se na forma contínua – e a corrente de entrada. Neste capítulo, as grandezas monitoradas são as mesmas com a diferença que desta vez a entrada do circuito não será puramente senoidal.

A figura 4.6 mostra o arranjo físico utilizado, no qual se observa o carregador de celular alimentado, desta vez, sob condições não-nominais de operação. As tensões de suprimento providas pela fonte de alimentação programável foram alteradas com o intuito de simular os mesmos fenômenos: Tensões harmônicas, Flutuações de tensão, VTCD's e Transitórios.

### 5.2.1 – Tensões Harmônicas

As figuras 5.25 a 5.28 mostram os resultados computacionais e experimentais obtidos pelo equipamento em estudo, quando este é alimentado por uma fonte supridora contendo distorções harmônicas de tensão. Neste sentido, são apresentados os oscilogramas das tensões e correntes para um DHT de 20% da tensão fundamental.

As figuras 5.25 e 5.26 mostram os oscilogramas da tensão aplicada juntamente com a corrente total consumida pela carga, para os casos computacional e experimental, respectivamente. Deve-se ressaltar que, os valores experimentais da corrente apresentados neste relatório são muito pequenos e a análise foi restringida a segunda casa decimal. Ainda sim, qualquer alteração provocava uma alteração significativa de resultado, prejudicando a diminuição do erro.

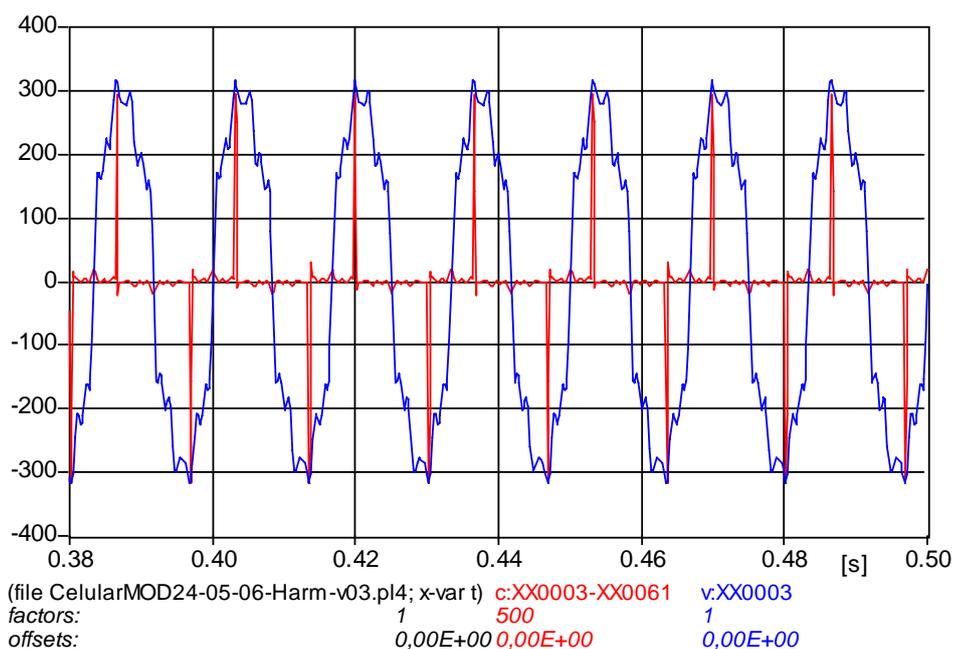


Figura 5.25 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.

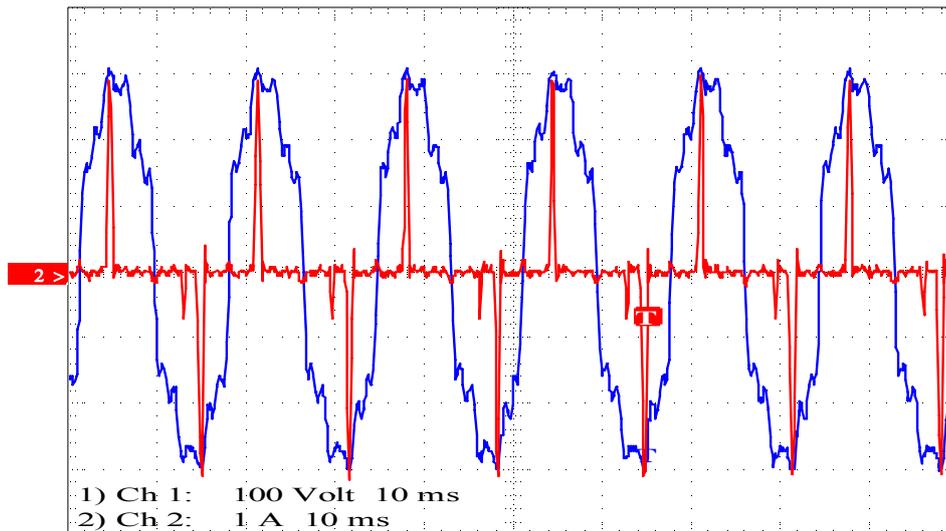


Figura 5.26 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental.

Observa-se nas figuras que a concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos é bastante significativa, fato este que, mais uma vez, ratifica a adequação do modelo implementado computacionalmente.

Na seqüência são apresentadas as figuras 5.27 e 5.28. Estas mostram, respectivamente, os oscilogramas da tensão no elo CC para o ensaio computacional e experimental.

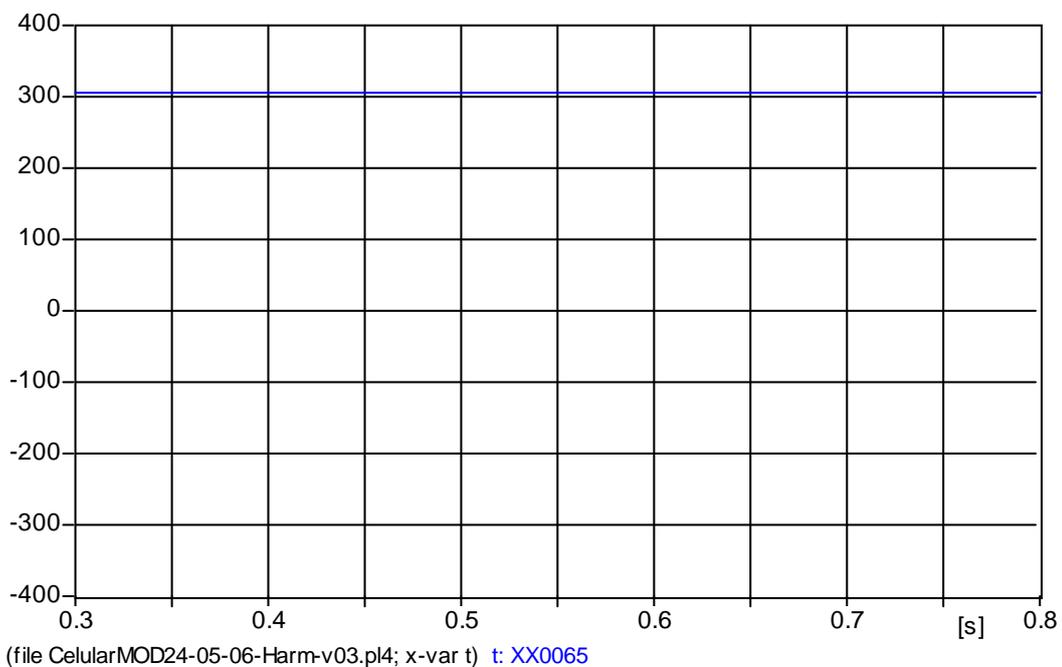


Figura 5.27 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimentalmente apresenta uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Computacional.

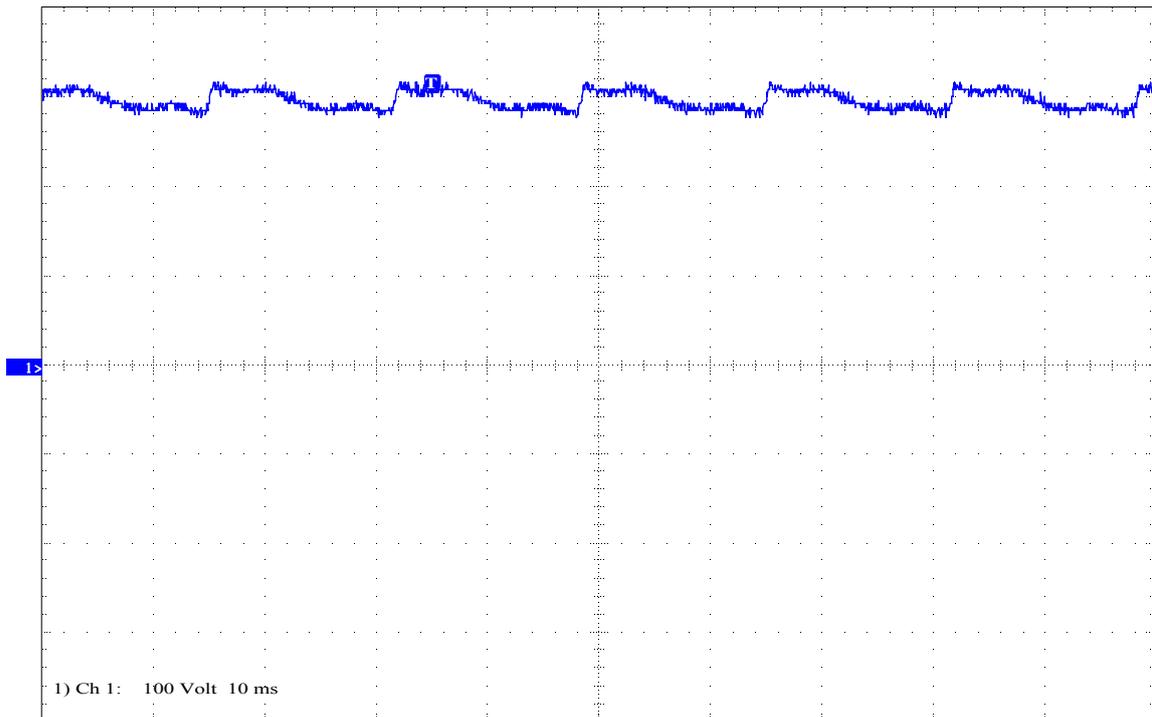


Figura 5.28 – Tensão no elo CC quando a tensão de suprimento experimenta uma distorção harmônica total (DHT) de 20% - Experimental.

Também para esta grandeza, constata-se uma grande semelhança entre as formas de onda apresentadas.

A tabela 5.3 sintetiza os resultados obtidos das análises computacionais experimentais. Como esclarecido, estes refletem a operação do equipamento sob condições distorcidas para a tensão de alimentação. Os erros detectados entre as respostas computacionais e experimentais evidenciam uma boa correlação entre os valores, tendo em vista que o erro máximo foi na casa de 20%. Mesmo assim, tal erro ocorreu na comparação dos valores da 5ª harmônica, um parâmetro difícil de ser ajustado. Levando em consideração os valores muito pequenos de corrente que sofrem grande variação ao menor ajuste de componentes do circuito, o modelo proposto apresenta uma boa correlação com o funcionamento real do produto.

Tabela 5.3 – Síntese das grandezas observadas – distorções harmônicas de tensão.

Local	Grandeza		Computacional	Experimental	Diferença	
<b>Entrada</b>	Corrente	Valor eficaz (mA)	105,4	109,6	3,83 %	
		Valor de Pico (mA)	589	500	16,6 %	
		Harmônicas mais significativas (%)	3 <sup>a</sup>	46,39	49,37	6,04 %
			5 <sup>a</sup>	33,3	27,6	20,65 %
		THD (%)	319,47	300,35	6,37 %	
<b>Elo CC</b>	Tensão	Valor Médio (V)	306	308	0,6 %	

### 5.2.2 – Flutuações de Tensão (“*Flicker*”)

Complementarmente aos estudos anteriores, um outro item de distúrbio considerado nos trabalhos investigativos compreendeu a resposta do carregador de celular perante um suprimento contendo flutuações de tensão.

As figuras 5.29 a 5.32 expressam os resultados obtidos para as simulações digitais e os ensaios experimentais realizados neste módulo. Para fins do presente ensaio, a fonte de suprimento disponibilizou uma excitação contendo uma flutuação de tensão responsável por um indicador de cintilação luminosa (Pst) da ordem de 5pu.

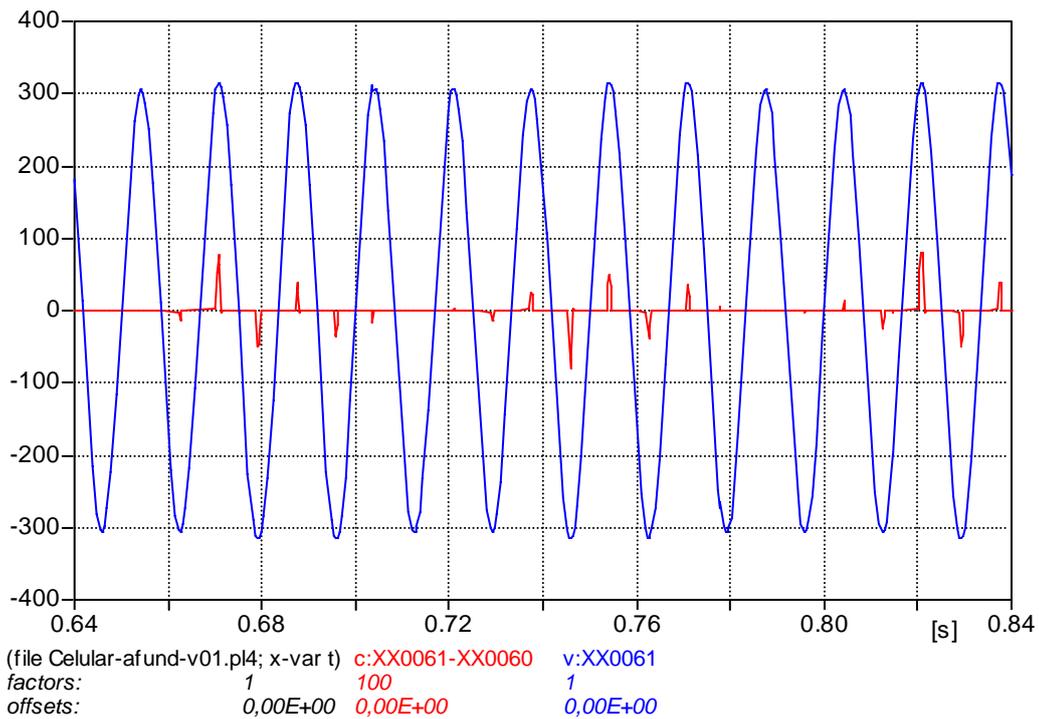


Figura 5.29 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Computacional.

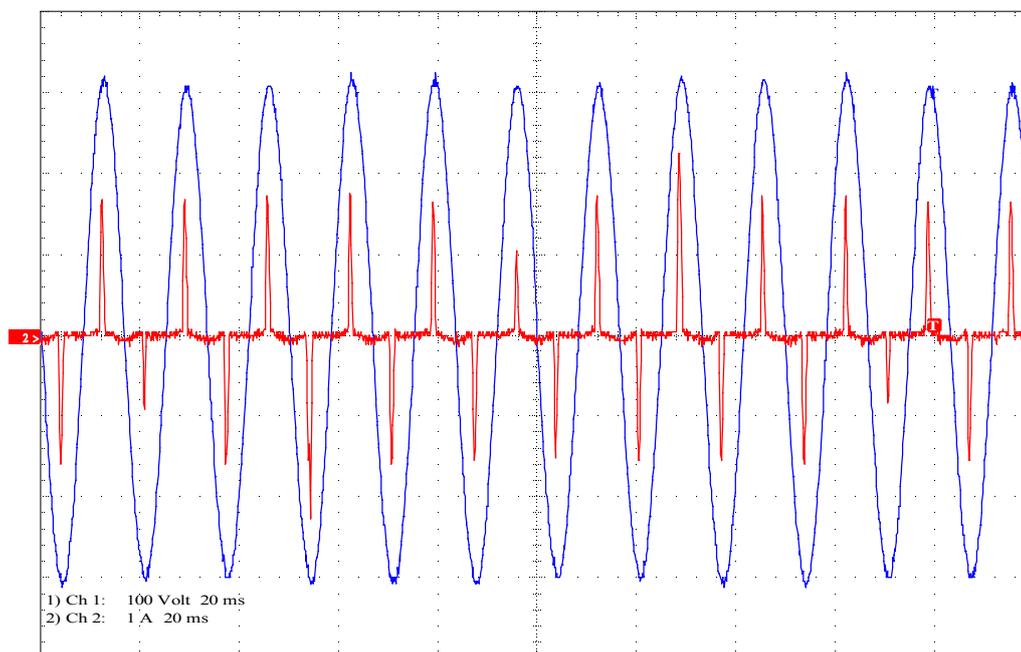


Figura 5.30 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST = 5 – Experimental.

Como pode ser observado nas figuras 5.29 e 5.30, a corrente na entrada do equipamento apresenta, como seria esperado, variações no seu valor de pico. Estas acompanham as oscilações das correspondentes tensões.

As figuras 5.31 e 5.32 apresentam os resultados para a tensão no elo CC do equipamento.

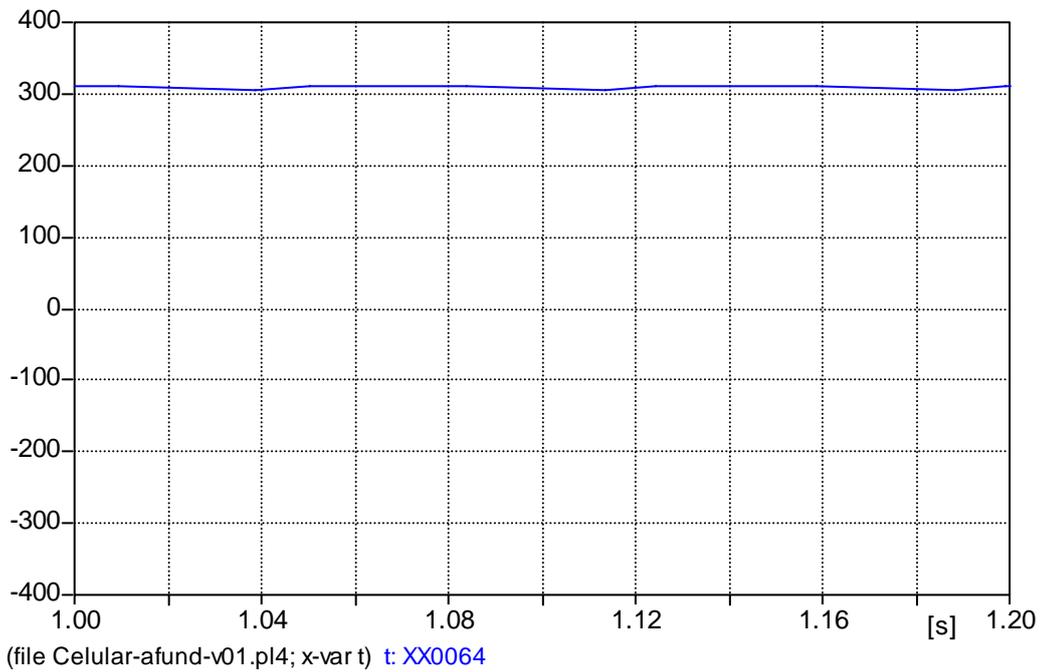


Figura 5.31 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST=5 – Computacional.

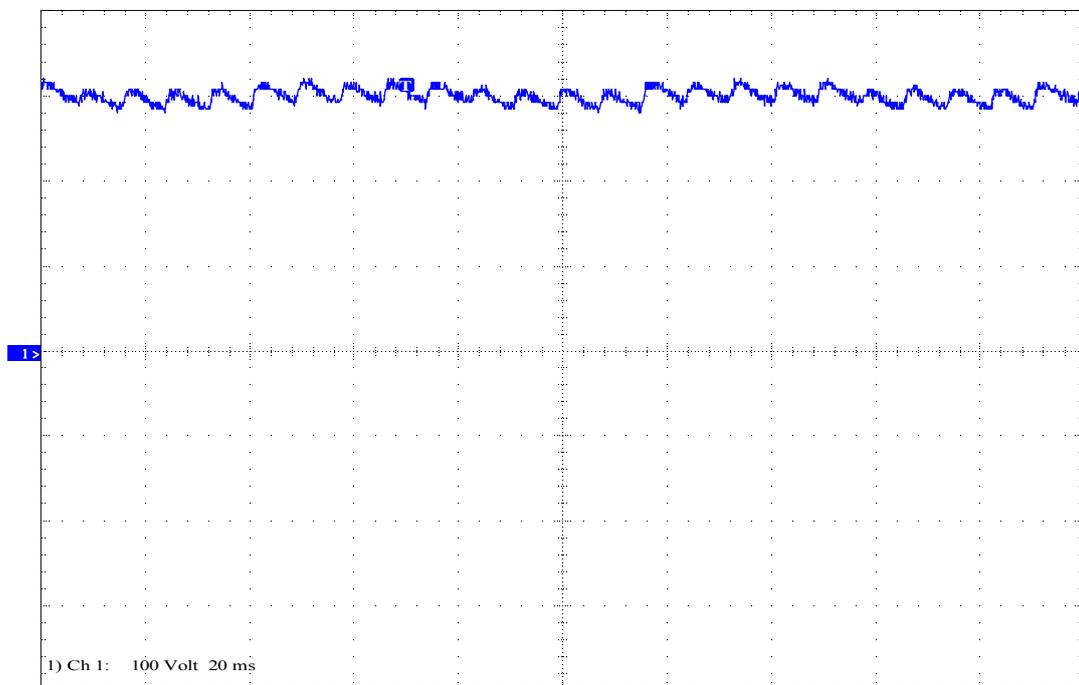


Figura 5.32 – Tensão no elo CC para um suprimento de tensão contendo flutuação de tensão: PST=5 – Experimental.

Como pode ser visto, a forma de onda obtida através da simulação computacional apresenta as mesmas características que aquela advinda do ensaio experimental.

A tabela 5.4 sintetiza os principais resultados obtidos dos trabalhos de investigação computacional e experimental, para o caso de suprimento contendo oscilação de tensão nos níveis adotados no presente estudo.

Tabela 5.4 – Síntese das principais grandezas observadas para uma oscilação de tensão – PST = 5

Local	Grandeza		Computacional	Experimental	Diferença
Entrada	Corrente	Valor eficaz (mA)	89	79	12,66 %
		Valor de Pico (mA)	766	448	70,98 %
Elo CC	Tensão	Valor Médio (V)	306	300	1,33 %

### 5.2.3 – Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD's)

Os fenômenos de afundamento, interrupção e elevação de tensão serão analisados, desta vez, para o carregador de celular.

Os resultados obtidos dos ensaios e correspondentes simulações, para cada um dos itens descritos, são analisados na seqüência.

#### 5.2.3.1 - Afundamento de Tensão de Curta Duração

As figuras 5.33 a 5.36 ilustram o comportamento computacional e experimental do carregador de celular, contemplando as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente de entrada, quando da aplicação de um afundamento para 60% da tensão nominal com duração de 10 ciclos.

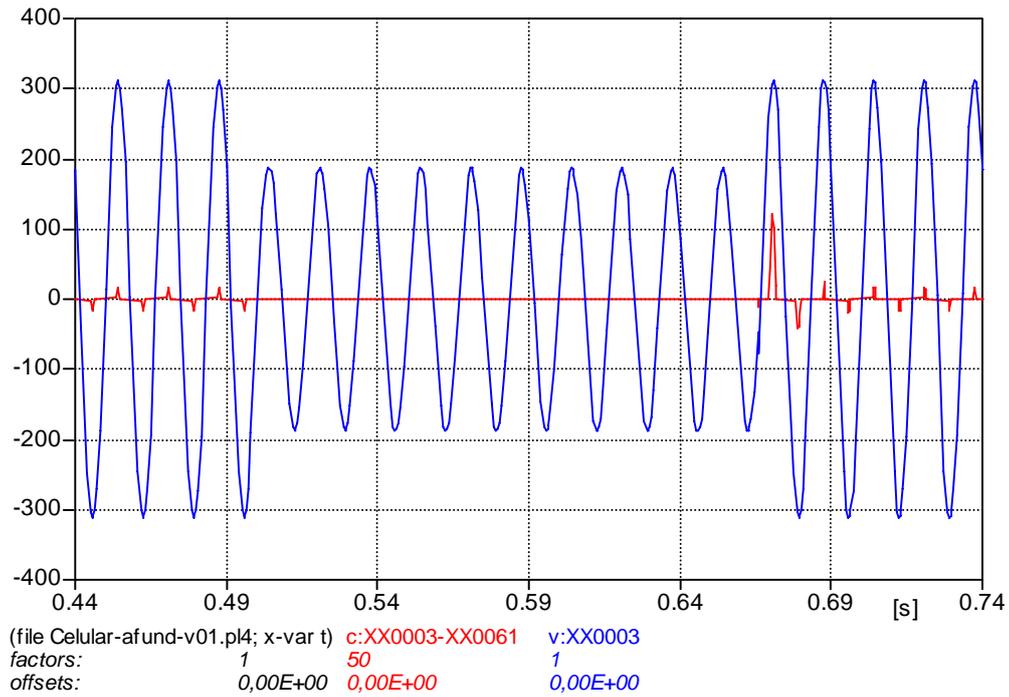


Figura 5.33 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.

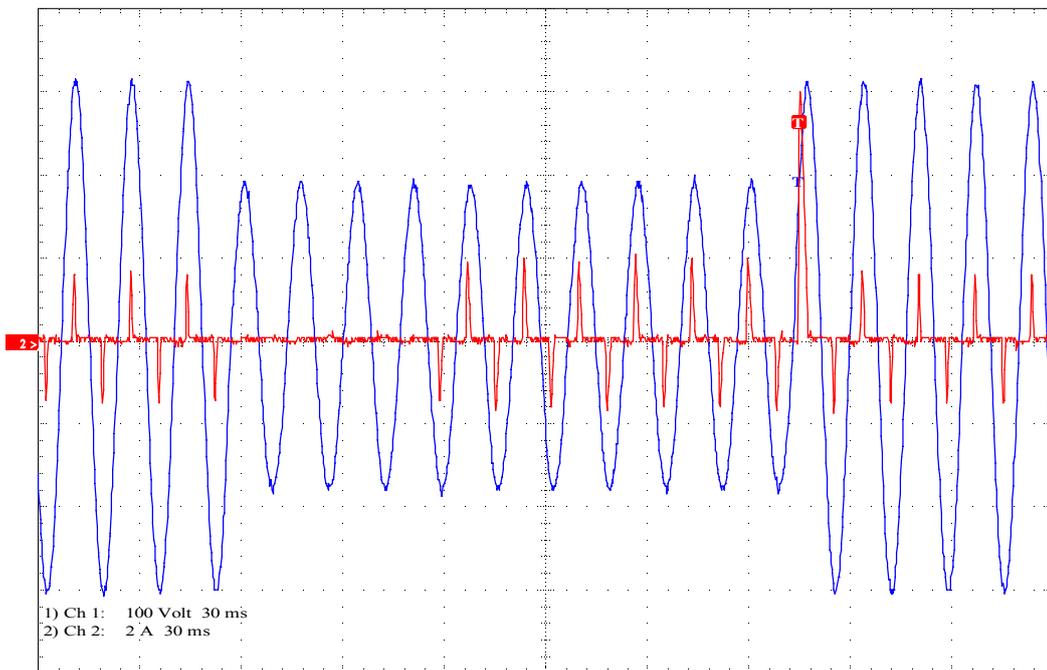


Figura 5.34 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.

Conforme apresentado, como resposta ao afundamento de tensão aplicado, a corrente solicitada pelo carregador de celular se anula pela polarização reversa dos diodos da ponte retificadora, permanecendo nesta condição enquanto a tensão do capacitor for maior a da

rede. Uma vez restabelecida a tensão, como se constata nestas figuras, ocorre um pico de corrente (cerca de 3 vezes o valor nominal) devido à recarga do capacitor, restabelecendo a condição de regime permanente após alguns ciclos.

As figuras 5.35 e 5.36 ilustram as formas de onda da tensão de alimentação e da tensão no elo CC do aparelho, obtidas pelo método computacional e experimental, respectivamente, para o afundamento supra referido.

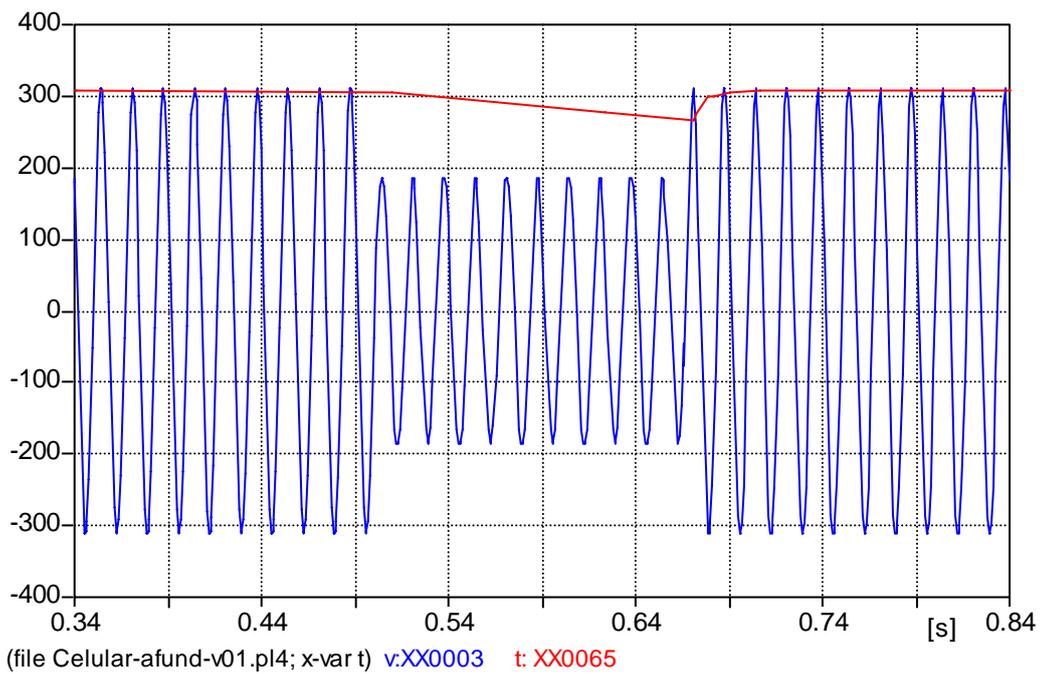


Figura 5.35 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.

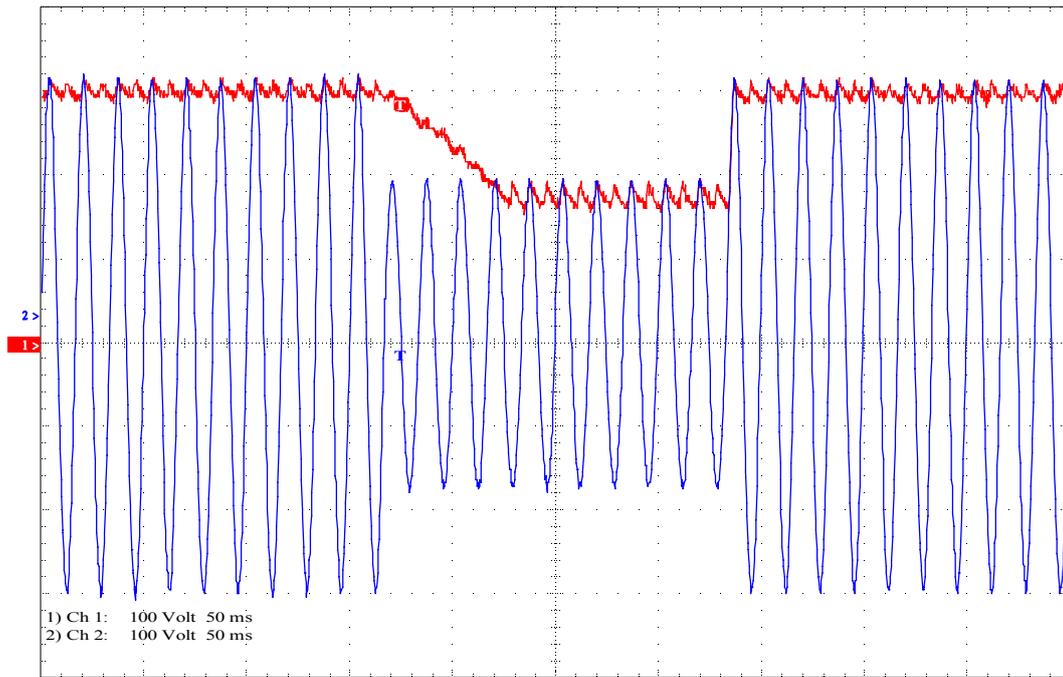


Figura 5.36 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação e sob um afundamento temporário de tensão para 60% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.

Observa-se nas figuras que, a tensão no elo CC acusou um afundamento correspondente, apresentando um decréscimo em seu valor para um nível compatível com aquele apresentado pela tensão de alimentação. Analogamente, a tensão retorna ao seu patamar inicial quando a tensão da rede assume seu valor nominal.

Da análise dos resultados anteriores observa-se, mais uma vez, uma boa concordância qualitativa e quantitativa entre os resultados.

### 5.2.3.2 - Interrupção do Fornecimento de Energia Elétrica

Os estudos computacional e experimental realizados nesta seção objetivam analisar o desempenho do modelo computacional do carregador de celular sob condições de interrupção do fornecimento de energia elétrica.

As figuras 5.37 e 5.38 ilustram os oscilogramas da tensão de suprimento e da corrente solicitada pelo dispositivo, obtidos pelos métodos computacional e experimental. Os resultados evidenciam uma interrupção por 10 ciclos, findo o qual a tensão é restaurada ao seu valor nominal.

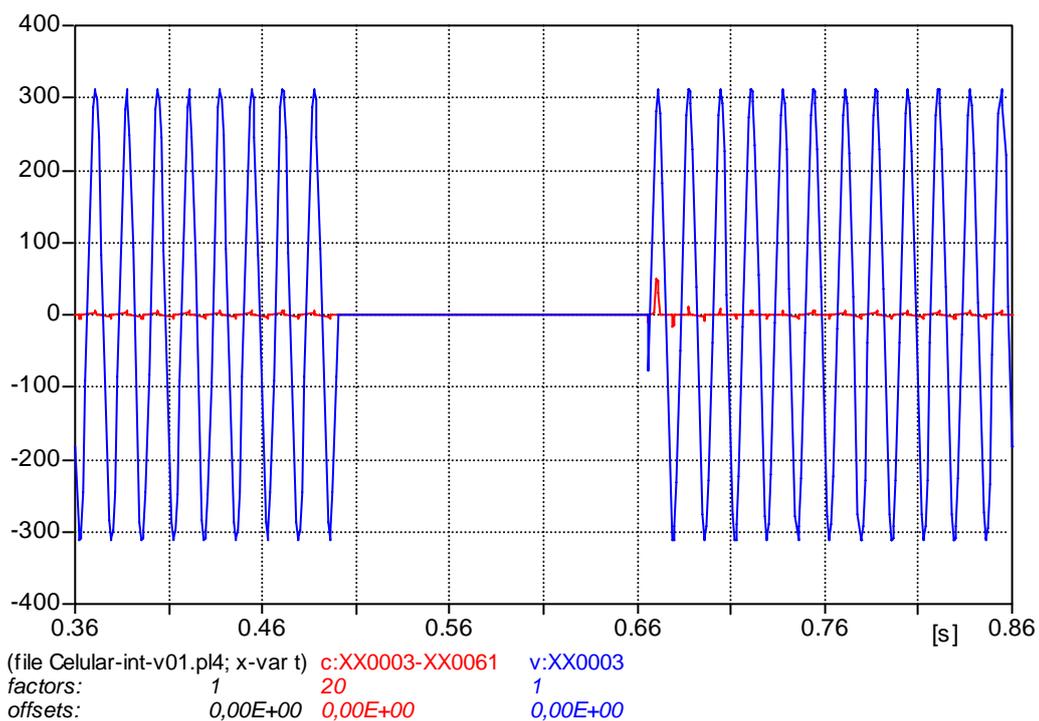


Figura 5.37 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 10 ciclos – Computacional.

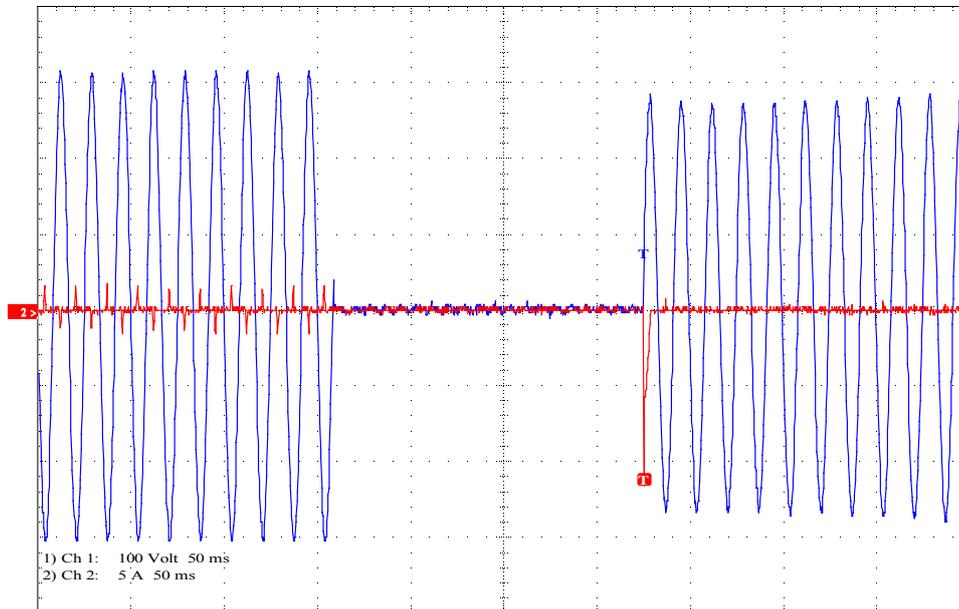


Figura 5.38 – Tensão de alimentação e corrente de entrada para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - 10 ciclos – Experimental.

Observa-se nas duas figuras anteriores que, novamente, no instante da aplicação da interrupção, a corrente na entrada do carregador de celular se anula, permanecendo nesta situação enquanto perdura o distúrbio. Esta constatação é atribuída à polarização reversa

dos diodos da retificação. No instante do restabelecimento da tensão aos padrões de regime permanente, ocorre um pico de corrente bastante considerável, de 5 vezes o seu valor sob condições normais de operação. Deve-se ressaltar que, nos casos apresentados acima, muito embora as intensidades dos picos de corrente sejam próximas, as correntes apresentam polaridades diferentes.

As figuras 5.39 e 5.40 ilustram as formas de onda da tensão de alimentação e da tensão no elo CC do aparelho, obtidas pelo método computacional e experimental, respectivamente.

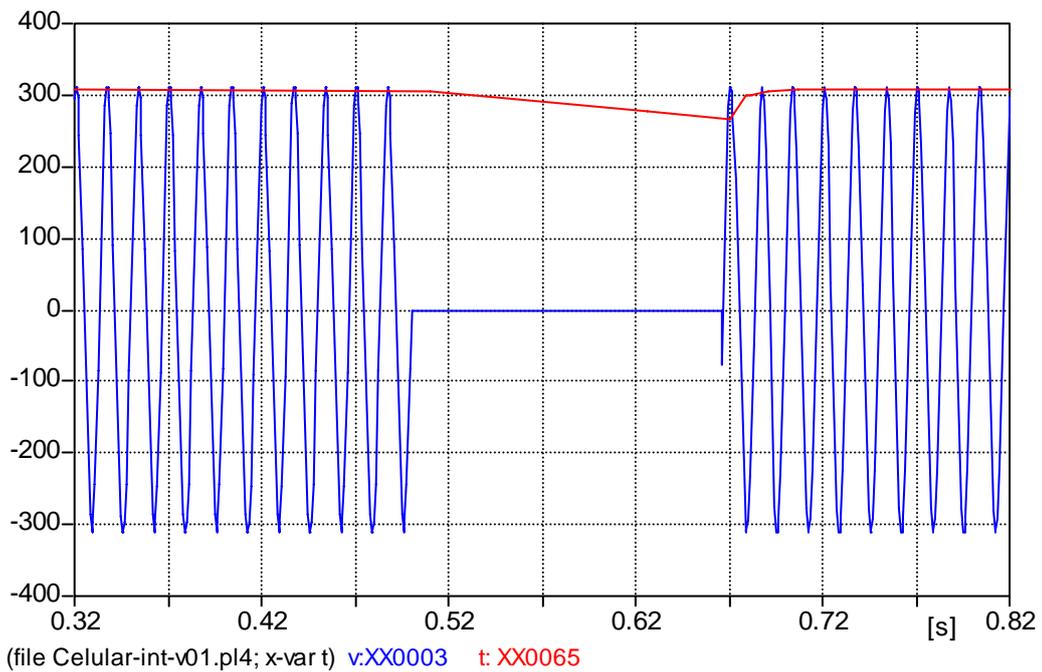


Figura 5.39 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Computacional.

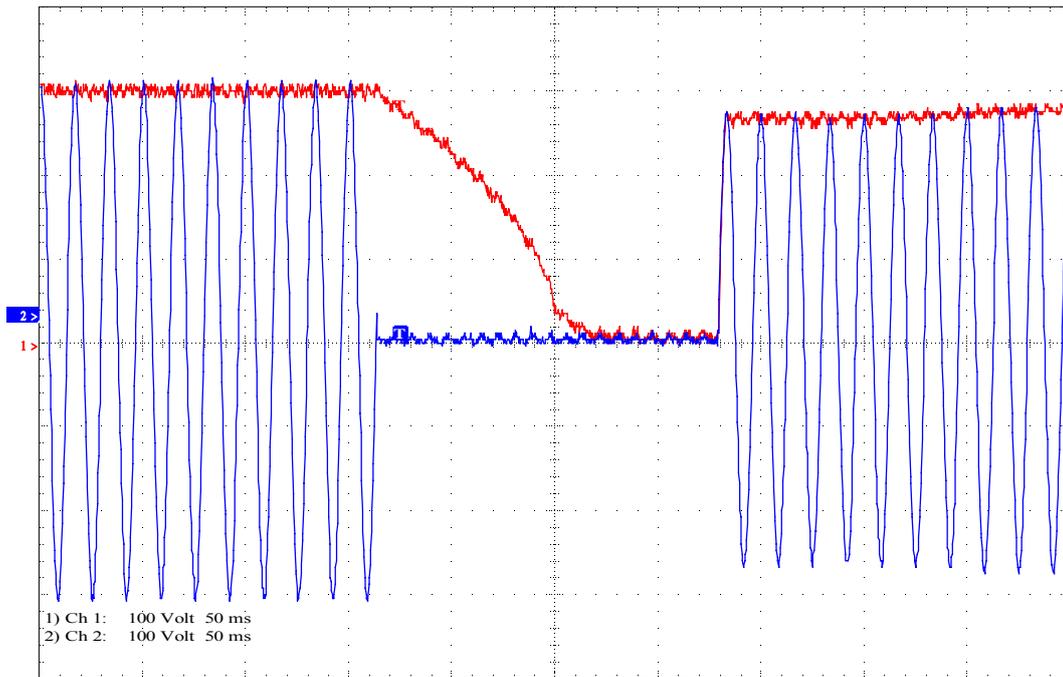


Figura 5.40 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação para uma interrupção do fornecimento de energia, tensão de 0% - Experimental.

Com relação às figuras que ilustram o comportamento da tensão no elo CC, verifica-se a repetição do que se observou no caso já apresentado de afundamento de tensão, ou seja, uma queda na tensão no elo CC. Entretanto, antes que esta grandeza atingisse o valor da tensão de alimentação, para o caso um valor nulo, a interrupção foi extinta. Conseqüentemente, o equipamento não sofreu nenhuma alteração em seu funcionamento, pelo fato do capacitor situado na entrada do equipamento ter suprido a alimentação dos circuitos internos do aparelho durante a interrupção.

Constata-se que, novamente, é grande a semelhança dos resultados obtidos por ambos os métodos, fato este que ratifica, mais uma vez, o desempenho do modelo computacional implementado.

### 5.2.3.3 - Elevação de Tensão de Curta Duração

Este item tem por objetivo verificar o desempenho do carregador de celular, pelos métodos computacional e experimental, quando o dispositivo experimenta uma elevação momentânea de tensão.

A figura 5.41 ilustra a forma de onda da tensão de suprimento, contendo uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos. A respectiva corrente solicitada pelo carregador de *notebook*, resultante da alimentação imposta, também é ilustrada.

A figura 5.42 ilustra as formas de onda da tensão de suprimento e da corrente do dispositivo, para o caso computacional.

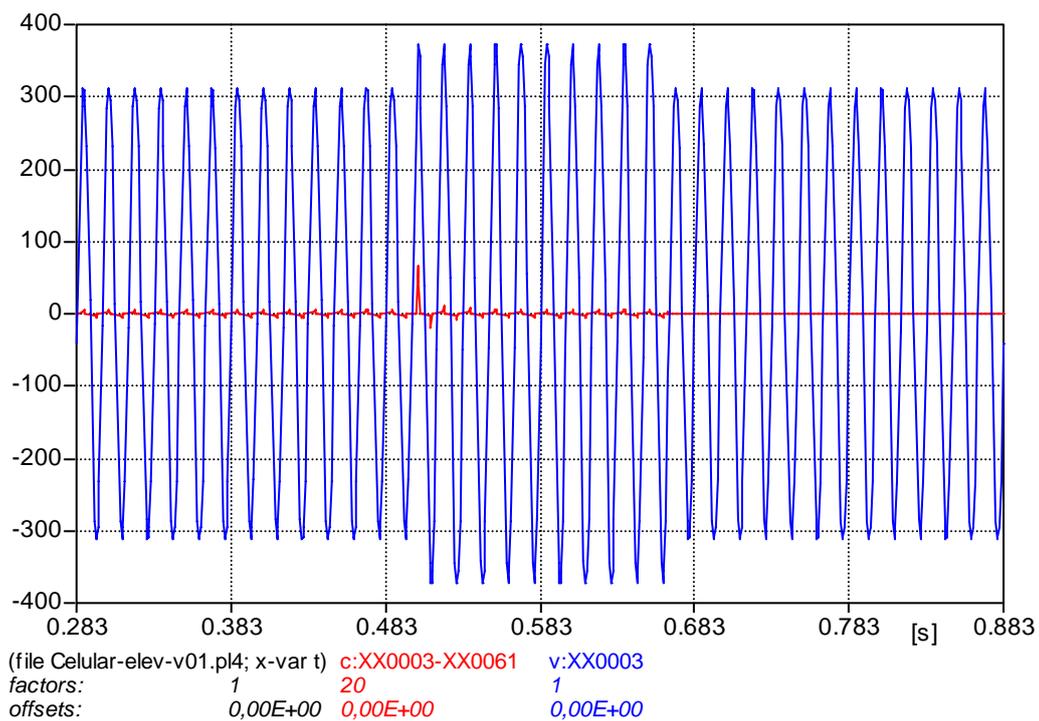


Figura 5.41 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 10 ciclos – Computacional.

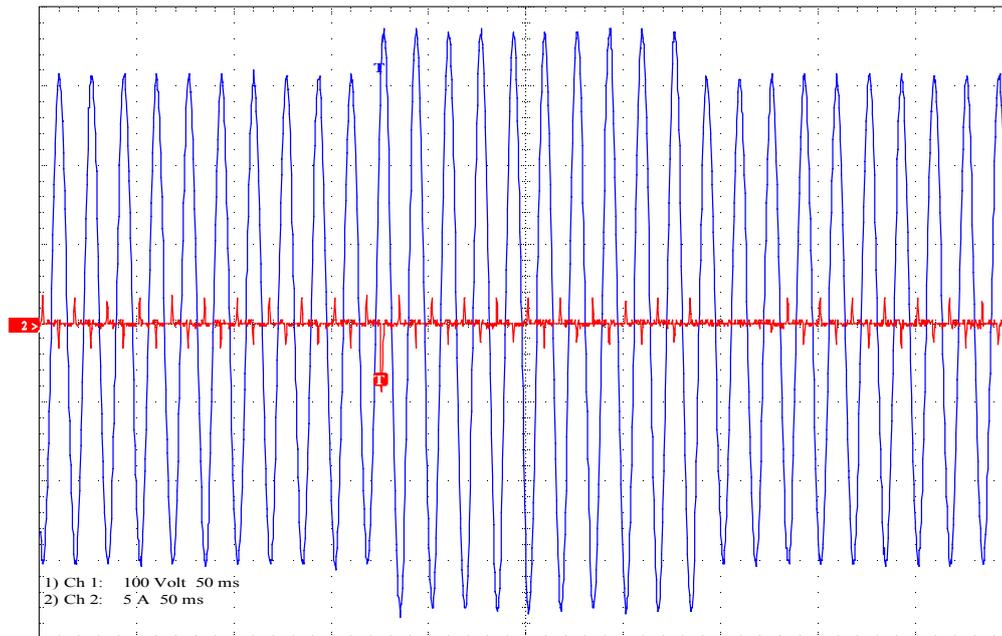


Figura 5.42 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal- 10 ciclos – Experimental.

Observa-se nas figuras 5.41 e 5.42, que no instante da elevação da tensão ocorre um pico de corrente (cerca de 8 vezes o valor nominal), associada com a operação do capacitor existente no elo CC do equipamento. No término da perturbação a corrente se anula por alguns ciclos, assumindo os valores de regime permanente em seguida. Deve-se ressaltar que neste exemplo, assim como no experimento de interrupção de fornecimento de energia, a corrente, também, apresentou polaridade invertida.

As figuras 5.43 e 5.45 ilustram as formas de onda da tensão de alimentação e da tensão no elo CC do aparelho, obtidas pelo método computacional e experimental, respectivamente.

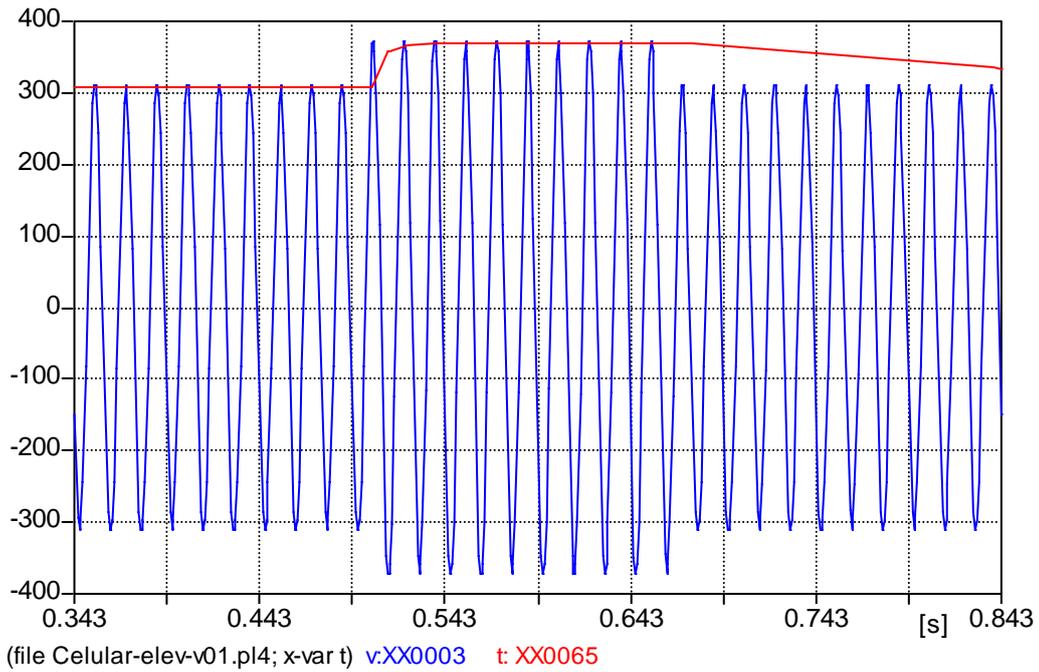


Figura 5.43 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Computacional.

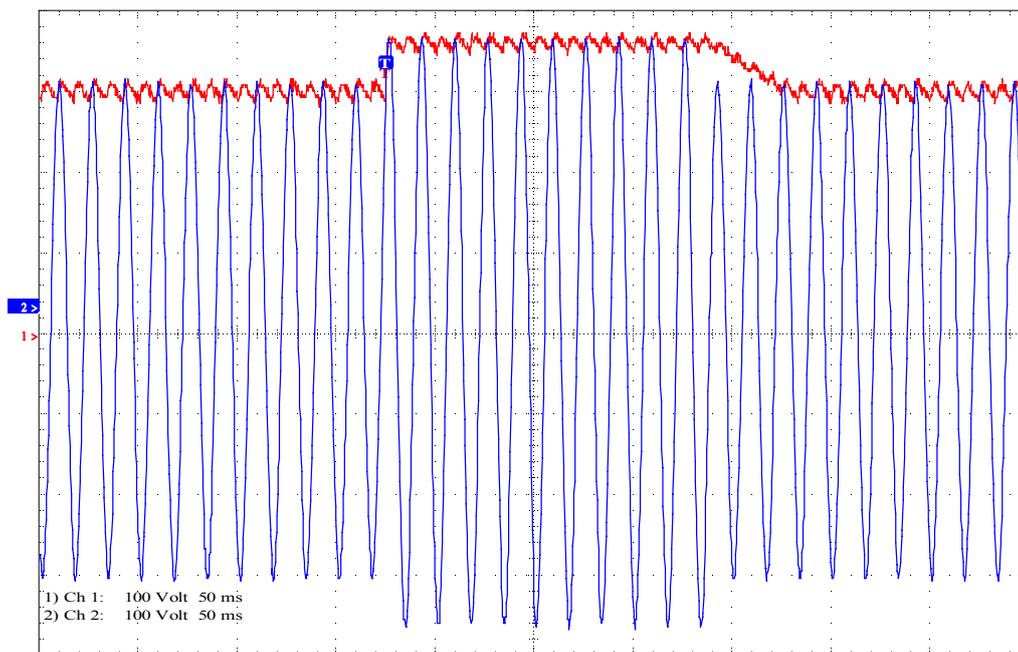


Figura 5.44 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação temporária de tensão para 120% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos – Experimental.

Esse fenômeno, contrariamente ao afundamento de tensão analisado, se reflete na tensão do elo CC. Isto ocasiona o comportamento ilustrado nas figuras 5.43 e 5.44. Os resultados mostram-se semelhantes para ambos os métodos utilizados. Esse comportamento pode

causar danos no equipamento, uma vez que não foi projetado para suportar tensões elevadas durante um longo período.

Nota-se uma pequena diferença entre os gráficos acima. O gráfico computacional apresentou um amortecimento maior àquele do gráfico experimental. Isso pode ser consequência de uma simplificação no circuito ou de um parâmetro mal ajustado para este fenômeno.

### 5.2.4 – Transitórios

Este item tem por objetivo analisar o desempenho do carregador de celular quando o mesmo é subitamente exposto à distúrbios de natureza transitória, os quais são comuns nas tensões de suprimento.

As figuras 5.45 e 5.46 mostram, respectivamente, os oscilogramas da tensão aplicada juntamente com a corrente solicitada pela carga, para os casos computacional e experimental.

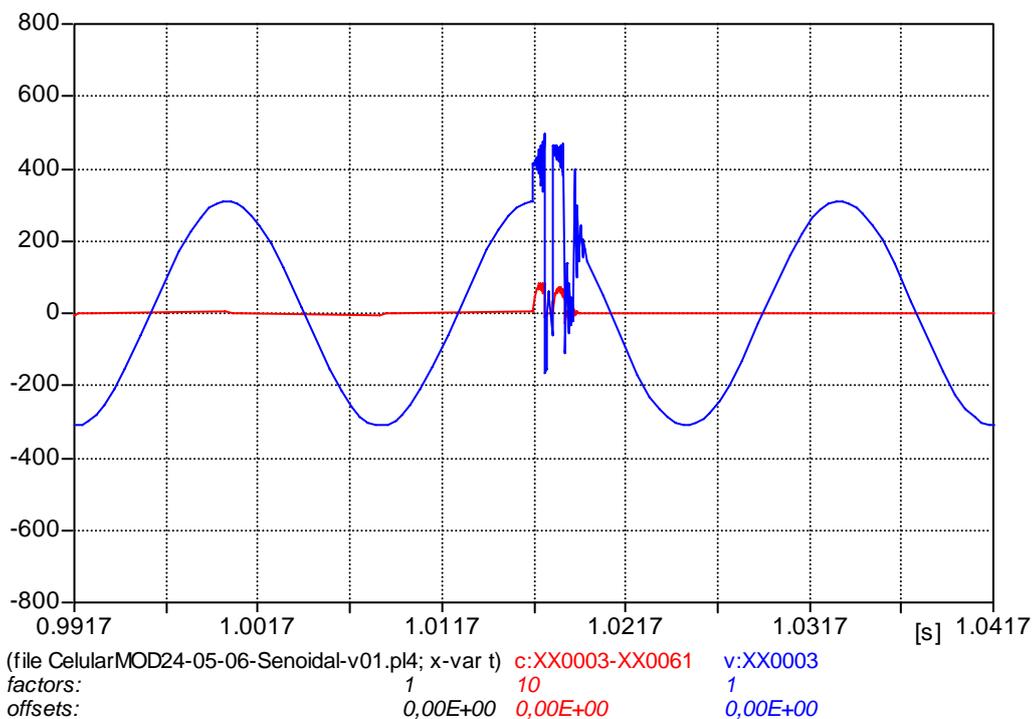


Figura 5.45 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional.

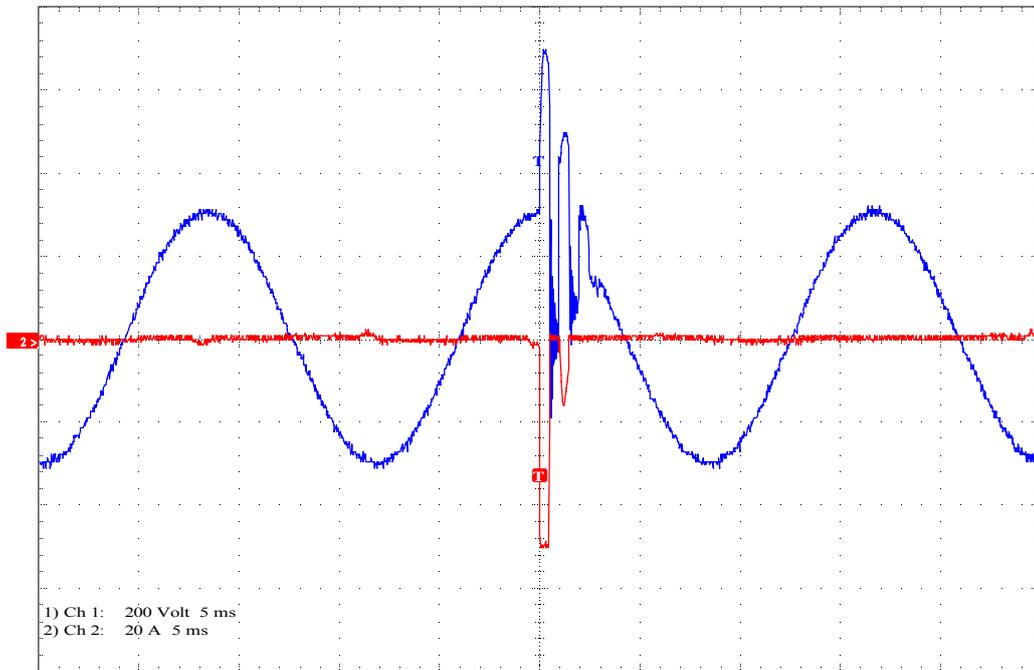


Figura 5.46 – Tensão de alimentação e corrente de entrada sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental.

Observa-se, através das figuras, que o carregador de celular solicita um elevado pico de corrente em resposta a elevação súbita na tensão de fornecimento. Não obstante esta corrente tenha alcançado valores elevados, cerca de 11 vezes o valor nominal, nenhuma anormalidade foi verificada quanto ao funcionamento deste equipamento.

Na seqüência, as figuras 5.47 e 5.48 mostram, respectivamente, os oscilogramas da tensão no elo CC para o teste computacional e experimental.

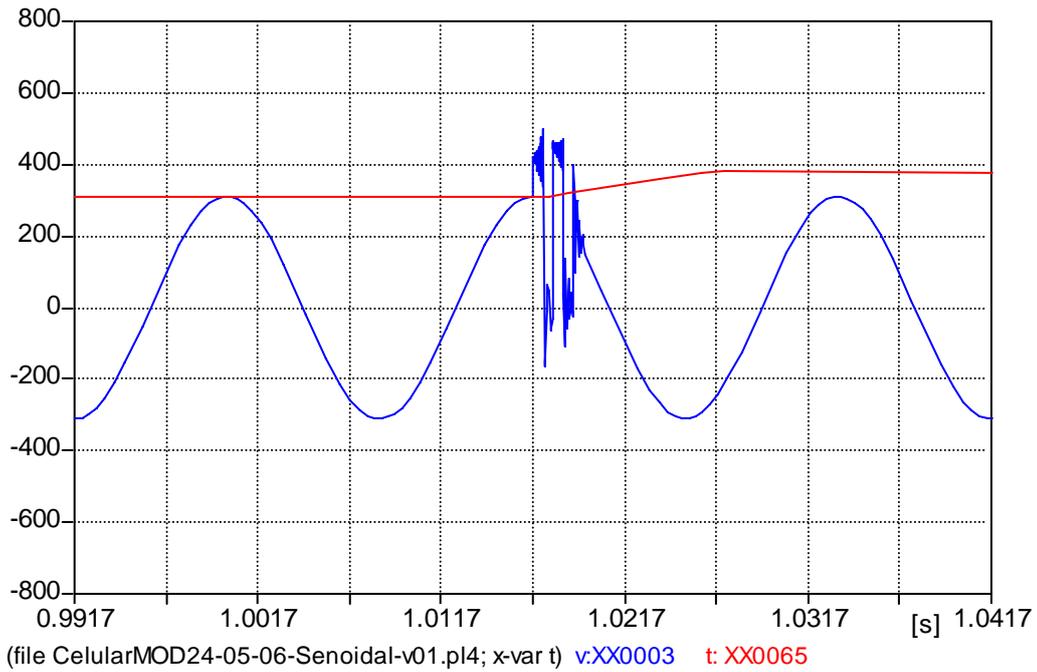


Figura 5.47 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Computacional.

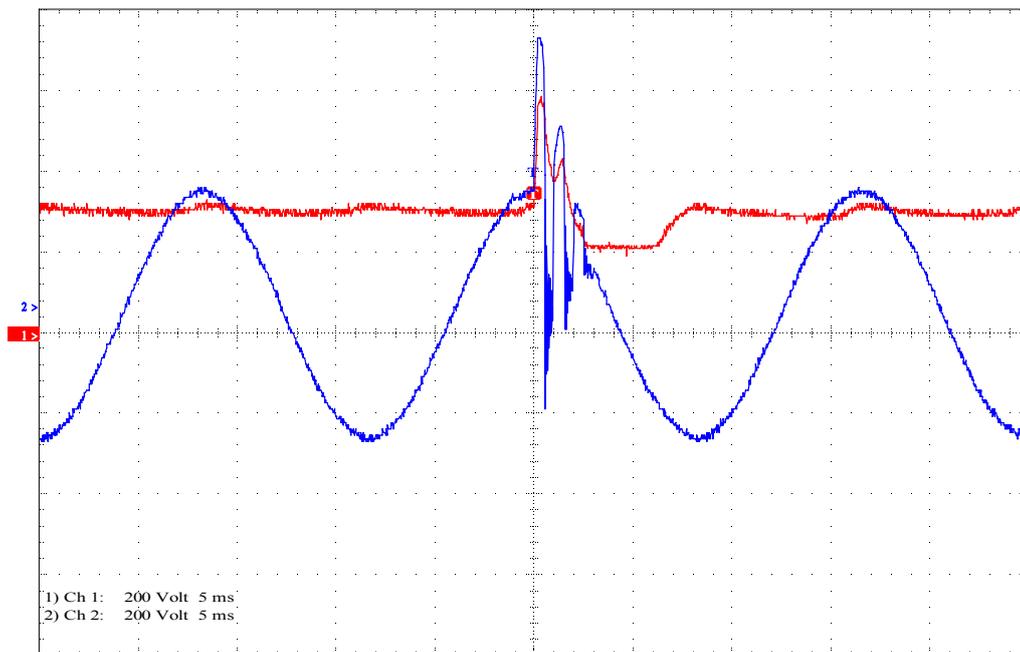


Figura 5.48 – Tensão no elo CC e tensão de alimentação sob uma elevação transitória na tensão de fornecimento – Experimental.

Como pode ser observado, a tensão no elo CC apresenta uma pequena elevação do seu nível no instante da aplicação do transitório de tensão.

Neste último ensaio também houve, quase sempre, grande concordância entre as respostas obtidas pelos dois métodos, fato este que ratifica a adequação do modelo implementado computacionalmente.

### 5.3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados de desempenho dos modelos computacionais mediante a comparação com correspondentes respostas obtidas laboratorialmente. De um modo geral pode-se concluir que a proposta de modelagem do carregador de *notebook*, já testada quando das avaliações sob condições nominais de funcionamento, mais uma vez se mostrou bastante eficaz na reprodução de condições não-ideais para a rede de suprimento. Apesar da diferença de 17% na 5ª harmônica, demais parâmetros em avaliação não apresentaram diferença superior a 8% quando da comparação entre resultados laboratoriais e computacionais.

Quanto à modelagem do carregador de celular, os valores pequenos de corrente dificultaram a validação do modelo, pois qualquer alteração na corrente representa um erro de grande magnitude, apesar de a divergência manter-se na casa dos miliampéres. Embora tenha ocorrido um considerável erro ao se comparar os valores colhidos pelos dois métodos citados para o valor de pico referente às flutuações de tensão, o modelo se comportou de forma satisfatória para os demais casos.

Portanto as discrepâncias encontradas podem ser consideradas perfeitamente condizentes com os fins desta pesquisa e permite afirmar que os modelos computacionais para o carregador de *notebook* e carregador de celular se apresentam compatíveis com as metas deste projeto.

## **6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES**

Este trabalho apresentou resultados da comparação da análise de circuitos reais com seus correspondentes modelos computacionais. Foram evidenciados os procedimentos para simulação no ATP e para checagem das respostas colhidas em ambas as técnicas.

Os estudos conduzidos neste documento permitem constatar que, de um modo geral, da confrontação das grandezas observadas experimentalmente com aquelas obtidas via simulação, verificou-se grande semelhança entre os resultados obtidos pelos dois métodos mencionados, seja na condição de suprimento ideal ou quando apresentado algum tipo de perda de qualidade. Isso permite afirmar que, os modelos computacionais propostos e implementados apresentam-se com boa aproximação na reprodução de todos os equipamentos, fato este que tornam validados tais modelos representativos para os produtos aqui enfocados.

Quanto aos resultados obtidos neste projeto, em seus aspectos numéricos, pode-se afirmar que foram completamente satisfatórios. Eventuais diferenças encontradas entre os valores experimentais com os computacionais podem ser atribuídas a algumas simplificações introduzidas nos modelos, as quais foram devidamente justificadas nos capítulos anteriores. Há ainda de se considerar as imprecisões paramétricas e no sistema de medição e aquisição de dados.

Dados os fatos supracitados, considera-se que os modelos construídos para utilização junto ao ATP cumpriram seus objetivos e podem descrever o comportamento dos circuitos reais dos aparelhos em pauta quando submetidos a eventualidades presentes na rede elétrica de distribuição.

Desta maneira, é possível afirmar que o uso do ATP como ferramenta de análise de problemas relacionados à qualidade da energia foi validado no presente trabalho.

Cabe ressaltar que os procedimentos e metodologias adotados no presente trabalho são de grande valia para se dar seqüência a um estudo de sensibilidade e suportabilidade dos equipamentos em foco, assim como análise de pedidos de ressarcimentos envolvendo consumidores e concessionárias de energia.

Dentro deste contexto, entende-se que foram atendidas plenamente as metas objetivadas na idealização deste trabalho de projeto final.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oliveira, Marco Aurélio Gonçalves de, *Apostila usada na disciplina Qualidade de Energia Elétrica*, 2005.
- [2] FONSECA, HUGO LEONARDO C. A. DA & LEAL, MÁRCIO FERNANDES, *Análise de Transitórios Eletromagnéticos Utilizando o ATPDraw*, 2003
- [3] Relatório CEB/UFU, Projeto de P&D, *Uma Estratégia Computacional para a Análise Técnica de Pedidos de Ressarcimento a Nível de Distribuição*, Modelagem Computacional dos Equipamentos, 2005.
- [4] J. L. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe, J. S. Martins, *Qualidade da Energia Elétrica*, *Revista o Electricista*, nº 9, 3º trimestre de 2004, ano 3, pp. 66-71, 2004.
- [5] [http://www.engecomp.com.br/pow\\_qual.htm](http://www.engecomp.com.br/pow_qual.htm); *Engcomp – Qualidade de Energia Elétrica*.
- [6] Oliveira, José Carlos de – *Qualidade de Energia Elétrica: “Uma Visão e o Contexto do Tema”*.