

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



Modelagem para análise de desempenho  
de fornos micro-ondas no contexto da  
qualidade de energia elétrica

**Lucas Rodrigues de Almeida**

Uberlândia  
2016

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

**Modelagem para análise de desempenho de  
fornos micro-ondas no contexto da qualidade de  
energia elétrica**

Dissertação apresentada por Lucas Rodrigues de Almeida à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

**BANCA EXAMINADORA:**

Antônio Carlos Delaiba, Dr. – UFU (Orientador)  
Isaque Nogueira Gondim, Dr. – UFU  
Fernando Nunes Belchior, Dr. – UFG

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

A447m Almeida, Lucas Rodrigues de, 1989-  
2016 Modelagem para análise de desempenho de fornos micro-ondas no  
contexto da qualidade de energia elétrica / Lucas Rodrigues de Almeida.  
- 2016.

152 f. : il.

Orientador: Antônio Carlos Delaiba.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Energia elétrica - Controle de  
qualidade - Teses. I. Delaiba, Antônio Carlos. II. Universidade Federal  
de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

---

CDU: 621.3

Modelagem para análise de desempenho de fornos  
micro-ondas no contexto da qualidade de energia  
elétrica

**Lucas Rodrigues de Almeida**

Dissertação apresentada por Lucas Rodrigues de Almeida à  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

---

Prof. Antônio Carlos Delaiba, Dr.  
Orientador – UFU

---

Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D.  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho aos meus pais José Roberto e Sônia, que são a base da minha educação, à minha irmã Roberta, por todo apoio, e à minha noiva Carolina, pelo companheirismo e amor concedidos.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a **Deus** por mais um objetivo alcançado e pela força concedida durante todo o processo de estudo e escrita desta dissertação.

Aos meus pais **José Roberto** e **Sônia**, por serem grandes incentivadores dos meus estudos e do meu crescimento pessoal e profissional. À minha irmã **Roberta**, pelo apoio sempre dado e pela credibilidade depositada em mim. À minha avó **Iracy**, que sempre me incentivou e torceu pelo meu sucesso. Aos meus avôs **Sebastião** e **Orlando**, que, *in memoriam*, vibram a cada vitória.

À minha noiva **Carolina**, pela constante motivação, ajuda, compreensão, companheirismo, que, juntamente com seu amor, me fizeram persistir nos meus objetivos, fortalecendo, cada vez mais, nossa união. Agradeço, também, à sua mãe **Ercia** e sua irmã **Larissa**, pela partilha das dificuldades e alegrias de cada conquista.

Em especial, expresso meus sinceros agradecimentos ao professor **Antônio Carlos Delaiba**, pela orientação, confiança, paciência e apoio, fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço, também, pela amizade e compartilhamento de sua vasta experiência.

Aos colegas e amigos da Pós Graduação, em especial ao **Arthur Costa**, ao **Leandro Pains** e à **Raquel Filiagi**, pelo companheirismo e importante apoio. Ao professor **Isaque Nogueira**, pela disponibilidade e apoio que viabilizaram os ensaios laboratoriais desta pesquisa.

Ao professor **Robson Rodrigues**, pelas ideias e discussões sobre o tema deste trabalho, além dos constantes ensinamentos, desde a minha graduação.

À experiência vivida na empresa **Ondatec**, que despertou meu primeiro interesse pelo estudo sobre fornos micro-ondas e aos grandes amigos lá adquiridos.

Aos meus amigos **Guilherme Henrique**, **Flávio Borges**, **Wener Eugênio** e **Gabriel Faria**, que sempre me incentivaram e reconhecem a importância do desenvolvimento deste trabalho.

Aos **professores** do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFU, pelas oportunidades de aprendizado e crescimento a mim proporcionados.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para esta dissertação de mestrado.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

John F. Kennedy

# RESUMO

A energia elétrica é um recurso indispensável no cotidiano das pessoas, sendo essencial desde a realização das tarefas diárias mais simples em uma residência até as mais diversas necessidades de uma grande indústria. Devido à complexa dinâmica de um sistema elétrico, os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica têm despertado o interesse de pesquisadores, concessionárias e consumidores. Dentro desse contexto, encontram-se as investigações relacionadas à operação de equipamentos elétricos diante dos distúrbios da qualidade da energia elétrica. A realização de ensaios experimentais para a análise de desempenho desses equipamentos, quando submetidos a suprimentos não ideais, é de fundamental importância. Não obstante aos ensaios laboratoriais, a utilização de ferramentas computacionais tem apresentado resultados bastante satisfatórios. Diante do exposto, esta dissertação visa contribuir com a análise de desempenho de fornos micro-ondas no contexto da qualidade de energia elétrica. Os estudos estão direcionados, primeiramente, para a modelagem matemática de um forno micro-ondas doméstico e sua implementação computacional no programa ATP (*Alternative Transients Program*). Em seguida, sua validação é feita por meio da comparação entre os resultados das simulações computacionais e ensaios laboratoriais, sob condições ideais e não ideais de suprimento. Por fim, uma modelagem computacional é desenvolvida no ATP para a representação de um forno micro-ondas industrial real de elevada potência e seu sistema elétrico. Seus resultados são obtidos por meio de quatro estudos de caso que visam avaliar os impactos que o forno industrial pode causar na qualidade da energia elétrica de seu sistema de suprimento.

**Palavras-chave:** Análise de desempenho, modelagem, fornos micro-ondas, qualidade da energia elétrica.

# ABSTRACT

The electric energy is an indispensable resource in daily life, it is essential since the execution of the simplest everyday tasks in a residence to the diverse needs of a large industry. Due to the complex dynamics of a power system, the problems related to power quality have attracted the interest of researchers, dealers and consumers. In this context, are the investigations related to electrical equipment operation with disturbances of power quality. Experimental testing for performance analysis of such equipment when subjected to non-ideal supply is of fundamental importance. Nevertheless the laboratory tests, the use of computational tools has shown satisfactory results. Given the above, this work aims to contribute to the performance analysis of microwave ovens in the context of power quality. The studies are directed first to the mathematical modeling of a domestic microwave oven and its computational implementation in the program ATP (Alternative Transients Program). Then, its validation is done by comparing the results of computer simulations and laboratory tests, under ideal and non-ideal supply conditions. Finally, a computational modeling is developed in the ATP to represent a high power real industrial microwave oven and its electrical system. Their results are obtained through four case studies that aim to evaluate the impacts that the industrial oven can cause on the supply system power quality.

**Keywords:** Performance analysis, modeling, microwave ovens, power quality.

# SUMÁRIO

## Capítulo I

### Introdução geral

1.1 Considerações iniciais.....	19
1.2 Estado da arte.....	23
1.3 Contribuições desta dissertação .....	26
1.4 Estrutura desta dissertação.....	27

## Capítulo II

### Considerações gerais sobre fornos micro-ondas

2.1 Considerações iniciais.....	29
2.2 Utilização de fornos micro-ondas .....	32
2.3 Composição e princípio de funcionamento dos fornos micro-ondas.....	34
2.3.1 Estrutura física.....	35
2.3.2 Circuito elétrico principal.....	38
2.3.3 Unidade de controle.....	41
2.3.4 Componentes de proteção e segurança.....	46
2.4 Considerações finais .....	48

## Capítulo III

### Modelagem matemática e computacional de um forno micro-ondas doméstico

3.1 Considerações iniciais.....	49
3.2 Identificação dos principais componentes do forno micro-ondas em estudo .....	50
3.3 Estratégia para a modelagem do forno micro-ondas .....	52
3.3.1 Modelagem do transformador de alta tensão.....	52
3.3.2 Modelagem do circuito dobrador de tensão .....	60
3.3.3 Modelagem da válvula magnétron .....	61
3.4 Implementação computacional do forno micro-ondas doméstico .....	62
3.4.1 Implementação do modelo do transformador de alta tensão no ATP .....	62
3.4.2 Implementação do modelo do circuito dobrador de tensão no ATP .....	67
3.4.3 Implementação do modelo do magnétron no ATP.....	68
3.4.4 Implementação computacional do forno micro-ondas no ATP.....	70
3.5 Considerações finais .....	70

## Capítulo IV

### Validação do modelo computacional do forno micro-ondas em condições ideais e não ideais de suprimento

4.1 Considerações Iniciais .....	72
----------------------------------	----

4.2 Estrutura para a realização dos ensaios experimentais .....	73
4.2.1 Fonte programável .....	75
4.2.2 Microcomputador .....	76
4.2.3 Osciloscópio digital .....	76
4.3 Análises de desempenho do forno micro-ondas doméstico.....	79
4.3.1 Caso 1: Suprimento com características ideais .....	80
4.3.2 Caso 2: Elevação de tensão de curta duração .....	87
4.3.3 Caso 3: Afundamento de tensão de curta duração.....	92
4.3.4 Caso 4: Interrupção de tensão .....	97
4.3.5 Caso 5: Flutuação de tensão .....	103
4.3.6 Caso 6: Distorções harmônicas de tensão .....	106
4.4 Considerações finais .....	110

## **Capítulo V**

### **Avaliação do impacto da operação de um forno micro-ondas industrial real na qualidade de energia elétrica**

5.1 Considerações iniciais.....	112
5.2 Identificação da instalação em estudo .....	113
5.3 Implementação computacional do forno micro-ondas industrial no ATP.....	114
5.4 Estudos de casos .....	116
5.4.1 Caso 1: Análise com a carga total em regime permanente ( $R_{malha} \cong 0\Omega$ ).....	117
5.4.2 Caso 2: Análise com a carga total em regime permanente ( $R_{malha} = 1\Omega$ ) ..	127
5.4.3 Caso 3: Análise com a carga total em regime permanente ( $R_{malha} = 10\Omega$ )	130
5.4.4 Caso 4: Análise com a carga desequilibrada .....	133
5.5 Considerações finais .....	141

## **Capítulo VI**

### **Conclusões gerais**

Conclusões gerais .....	143
-------------------------	-----

## **Referências bibliográficas**

Referências bibliográficas .....	148
----------------------------------	-----

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais equipamentos reclamados para uma empresa distribuidora [6].	21
Figura 2.1 - Localização da região de micro-ondas no espectro eletromagnético. ....	29
Figura 2.2 - Moléculas de água com e sem a influência do campo elétrico [30]. ....	31
Figura 2.3 - Forno micro-ondas doméstico. ....	34
Figura 2.4 - Diagrama ilustrativo das características de um forno micro-ondas. ....	35
Figura 2.5 - Estrutura física de um forno micro-ondas doméstico. ....	35
Figura 2.6 - Ondas eletromagnéticas na câmara de cozimento de um forno micro-ondas. ....	37
Figura 2.7 - Proteção contra vazamento de micro-ondas pela porta do forno. ....	38
Figura 2.8 - Circuito elétrico principal do forno micro-ondas: a) Magnétron; b) Transformador de alta tensão; c) Capacitor de alta tensão; d) Diodo de alta tensão. .	38
Figura 2.9 - Magnétron [36]. ....	39
Figura 2.10 - Cavidade ressonante [29]. ....	40
Figura 2.11 - Circuito elétrico do forno micro-ondas [28]. ....	40
Figura 2.12 - Transformador de alta tensão utilizado no forno micro-ondas. ....	41
Figura 2.13 - Painel e circuito de controle do forno micro-ondas. ....	42
Figura 2.14 - Controle da potência de saída do magnétron por meio do ciclo de trabalho. ....	44
Figura 2.15 - Valores de ciclo de trabalho tipicamente encontrados em fornos micro-ondas domésticos. ....	44
Figura 2.16 - Comparação entre partida quente e partida fria. ....	46
Figura 2.17 - Dispositivos de proteção e segurança em série com o circuito de alta tensão. ....	47
Figura 3.1 - Forno micro-ondas utilizado. ....	50
Figura 3.2 - Componentes do circuito de alta tensão. ....	51
Figura 3.3 - Estrutura do transformador de alta tensão do forno micro-ondas [18]. ....	53
Figura 3.4 - Definição dos trechos do circuito magnético para a modelagem do transformador. ....	55
Figura 3.5 - Modelo $\pi$ equivalente do transformador de alta tensão [18]. ....	58
Figura 3.6 - Modelo do circuito dobrador de tensão de meia onda. ....	60
Figura 3.7 - Curva V-I e modelo representativo do magnétron [37]. ....	61
Figura 3.8 - Transformador de alta tensão do forno micro-ondas. ....	62
Figura 3.9 - Janela de parametrização das indutâncias não lineares no ATP. ....	64
Figura 3.10 - Curva B (H) do material do núcleo do transformador (SF19) [22]. ....	65

Figura 3.11 - Modelo do transformador implementado no programa ATP. ....	67
Figura 3.12 - Capacitor e diodo do circuito dobrador de tensão. ....	67
Figura 3.13 - Modelo do circuito dobrador de tensão implementado no programa ATP. .....	68
Figura 3.14 - Válvula magnétron utilizada no forno micro-ondas. ....	69
Figura 3.15 - Modelo do magnétron implementado no programa ATP. ....	70
Figura 3.16 - Modelo do forno micro-ondas implementado no programa ATP. ....	70
Figura 4.1 - Esquema de conexão para realização dos experimentos. ....	73
Figura 4.2 - Estrutura laboratorial para realização dos experimentos. ....	74
Figura 4.3 - Módulos constituintes da fonte HP 6834A. ....	75
Figura 4.4 - Ponteiras de alta tensão utilizando divisor resistivo. ....	77
Figura 4.5 - Divisor resistivo para obtenção das tensões na fonte de alta tensão do forno micro-ondas. ....	78
Figura 4.6 - Arranjo para medição de corrente no transformador e magnétron do forno micro-ondas. ....	79
Figura 4.7 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	81
Figura 4.8 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	82
Figura 4.9 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	84
Figura 4.10 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	84
Figura 4.11 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron....	85
Figura 4.12 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron....	86
Figura 4.13 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	87
Figura 4.14 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	88
Figura 4.15 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	89
Figura 4.16 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	89
Figura 4.17 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron....	90
Figura 4.18 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron....	91
Figura 4.19 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	92
Figura 4.20 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	93

Figura 4.21 - Corrente eficaz experimental (esquerda) e computacional (direita) na entrada do forno micro-ondas, para a ocorrência do afundamento de tensão - Caso 3..	93
Figura 4.22 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	94
Figura 4.23 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	95
Figura 4.24 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron....	96
Figura 4. 25 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron... 96	
Figura 4.26 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	98
Figura 4.27 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	98
Figura 4.28 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente de entrada eficaz (vermelho). ....	99
Figura 4.29 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente de entrada eficaz (vermelho). ....	99
Figura 4.30 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	101
Figura 4.31 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão. ....	101
Figura 4.32 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron..	102
Figura 4.33 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron..	102
Figura 4.34 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	104
Figura 4.35 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	104
Figura 4.36 - Corrente experimental (esquerda) e computacional (direita) no secundário do transformador, para a ocorrência de flutuação de tensão - Caso 5 .....	105
Figura 4.37 - Corrente experimental (esquerda) e computacional (direita) no magnétron, para a ocorrência de flutuação de tensão - Caso 5.....	105
Figura 4.38 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	107
Figura 4.39 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. ....	108
Figura 4.40 - Espectro harmônico da corrente de entrada do forno micro-ondas, experimental (vermelho) e computacional (azul) - Caso 6.....	109
Figura 5.1 Representação do diagrama unifilar da instalação elétrica do forno micro-ondas industrial.....	114
Figura 5.2 - Implementação computacional do forno micro-ondas industrial na plataforma ATP. ....	116

Figura 5.3 - Correntes eficazes nas fases A, B e C em condições nominais de operação - Caso 1. ....	118
Figura 5.4 - Forma de onda da corrente total no QGBT - Caso 1. ....	118
Figura 5.5 - Espectro harmônico da corrente total no QGBT - Caso 1. ....	119
Figura 5.6 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 1. ....	120
Figura 5.7 - Espectro harmônico da tensão no QGBT - Caso 1. ....	121
Figura 5.8 - Forma de onda da corrente no condutor neutro do QGBT - Caso 1. ....	122
Figura 5.9 - Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do QGBT (valores eficazes em ampere) - Caso 1. ....	123
Figura 5.10 - Forma de onda da corrente no lado de MT do transformador - Caso 1. ....	124
Figura 5.11 - Espectro harmônico da corrente no lado de MT do transformador - Caso 1. ....	124
Figura 5.12 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 1. ....	125
Figura 5.13 - Espectro harmônico da tensão no lado de MT do transformador - Caso 1. ....	126
Figura 5.14 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 2. ....	128
Figura 5.15 - Espectro harmônico da tensão no QGBT - Caso 2. ....	128
Figura 5.16 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 2. ....	129
Figura 5.17 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 3. ....	131
Figura 5.18 - Espectro harmônico da tensão no QGBT - Caso 3. ....	131
Figura 5.19 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 3. ....	132
Figura 5.20 - Condição operativa dos módulos emissores de micro-ondas de um QDF. A cor vermelha representa o módulo ligado e a cor verde representa o módulo desligado. ....	133
Figura 5.21 - Correntes eficazes nas fases A, B e C em condições de desequilíbrio de carga - Caso 4. ....	134
Figura 5.22 - Forma de onda da corrente total no QGBT - Caso 4. ....	135
Figura 5.23 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 4. ....	136
Figura 5.24 - Forma de onda da corrente no condutor neutro do QGBT - Caso 4. ....	137
Figura 5.25 - Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do QGBT (valores eficazes em ampere) - Caso 4. ....	138
Figura 5.26 - Forma de onda da corrente no lado de MT do transformador - Caso 4. ....	139
Figura 5.27 - Espectro harmônico da corrente no lado de MT do transformador - Caso 4. ....	139
Figura 5.28 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 4. ....	140

# LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características técnicas do forno micro-ondas utilizado.....	51
Tabela 3.2 - Características do transformador de alta tensão do forno micro-ondas utilizado.....	63
Tabela 3.3 - Características "fluxo - corrente" das indutâncias do modelo do transformador.....	65
Tabela 3.4 - Características do capacitor e diodo de alta tensão.....	68
Tabela 3.5 - Características da válvula magnétron.....	69
Tabela 4.1 - Quadro resumo dos casos analisados.....	79
Tabela 4.2 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as correntes de entrada do forno micro-ondas - Caso 1.....	82
Tabela 4.3 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no secundário do transformado de alta tensão - Caso 1.....	85
Tabela 4.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada da válvula magnétron - Caso 1.....	86
Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada do forno micro-ondas - Caso 2.....	88
Tabela 4.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas - Caso 2.....	91
Tabela 4.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada do forno micro-ondas - Caso 3.....	94
Tabela 4.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas - Caso 3.....	97
Tabela 4.9 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada do forno micro-ondas - Caso 4.....	100
Tabela 4.10 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas - Caso 4.....	103
Tabela 4.11 - Distorções harmônicas individuais e total aplicadas ao forno micro-ondas.....	106
Tabela 4.12 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as correntes de entrada do forno micro-ondas com suprimento de tensão contendo distorções harmônicas - Caso 6.....	109
Tabela 5.1 - Características da instalação elétrica do forno industrial.....	115

# LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	- <i>Alternative Transients Program</i>
DHTi	- Distorção Harmônica Total de Corrente
DIT <sub>h</sub>	- Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem h
DTT	- Distorção Harmônica Total de Tensão
NF	- Normalmente Fechado
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PST	- Indicador de severidade de <i>flicker</i> de curto prazo[pu]
QDF	- Quadro de Distribuição de Força
QGBT	- Quadro Geral de Baixa Tensão
VTCD	- Variações de Tensão de Curta Duração
a	- Comprimento de trechos do circuito magnético
b	- Espessura do núcleo magnético do transformador
C	- Capacitor de alta tensão do circuito dobrador
D	- Diodo de alta tensão do circuito dobrador
e	- Comprimento do entreferro de ar
$e_3$	- Comprimento do entreferro de ar (2.e)
h	- Altura das placas empilhadas que constituem a derivação magnética
$i_1$	- Corrente no enrolamento primário
$i_2$	- Corrente no enrolamento secundário
$i'_1$	- Corrente do enrolamento primário referida ao secundário
$i_S$	- Corrente que circula na indutância $L_S$
$i'_P$	- Corrente que circula na indutância $L'_P$
$i'_{sH}$	- Corrente que circula na indutância $L'_{sH}$
$I_{AK}$	- Corrente da curva (V-I) do magnétron
$L_S$	- Indutância do enrolamento secundário
$L'_P$	- Indutância do enrolamento primário referida ao secundário
$L'_{sH}$	- Indutância da derivação magnética referida ao secundário
$n_1$	- Número de espiras do enrolamento primário

$n_2$	- Número de espiras do enrolamento secundário
$P_{mag}$	- Potência nominal da válvula magnétron
$P_{méd}$	- Potência média de saída da válvula magnétron
$r_1$	- Resistência do enrolamento primário
$r_2$	- Resistência do enrolamento secundário
$r'_1$	- Resistência do enrolamento primário referida ao secundário
$R_1$	- Relutância do trecho AB (trecho $l_1$ )
$R_2$	- Relutância do trecho BD (trecho $l_2$ )
$R_3$	- Relutância do trecho BC (trecho $l_3$ )
$R_{11}$	- Relutância do trecho CA (trecho $l_{11}$ )
$R_{22}$	- Relutância do trecho DC (trecho $l_{22}$ )
$R_p$	- Relutância do contorno do enrolamento primário
$R_s$	- Relutância do contorno do enrolamento secundário
$R_{sH}$	- Relutância da derivação magnética
$R_d$	- Resistência do magnétron (região de oscilação)
$R_f$	- Resistência do filamento do magnétron
$R_h$	- Resistência do magnétron (região de não oscilação)
$S_1$	- Área da seção transversal do primário
$S_2$	- Área da seção transversal do secundário
$S_3$	- Área da seção transversal da derivação magnética
$T$	- Período completo do ciclo de operação do forno micro-ondas para o controle de potência média
$T_{off}$	- Período que a fonte de alta tensão do forno micro-ondas fica desligada para o controle de potência média
$T_{on}$	- Período que a fonte de alta tensão do forno micro-ondas fica ligada para o controle de potência média
$u_1$	- Tensão no enrolamento primário
$u_2$	- Tensão no enrolamento secundário
$u'_1$	- Tensão no enrolamento primário referida ao secundário
$V$	- Tensão
$V_{cc}$	- Tensão contínua
$V_{AK}$	- Tensão da curva ( $V-I$ ) do magnétron
$\mu_0$	- Permeabilidade magnética do ar

- $\mu_1$  - Permeabilidade magnética do primário
- $\mu_2$  - Permeabilidade magnética do secundário
- $\mu_3$  - Permeabilidade magnética das placas de material magnético
- $\phi_1$  - Fluxo magnético respectivo ao enrolamento primário
- $\phi_2$  - Fluxo magnético respectivo ao enrolamento secundário
- $\phi_3$  - Fluxo magnético respectivo à derivação magnética

# CAPÍTULO I

---

## Introdução Geral

### 1.1 Considerações iniciais

Fundamental para o desenvolvimento econômico e social, a energia elétrica é considerada um bem indispensável nos dias atuais. Assim, as concessionárias de energia elétrica, além de garantir o fornecimento ininterrupto de energia aos seus consumidores, estão cada vez mais preocupadas em manter os níveis da qualidade de energia dentro dos padrões esperados. Algumas razões estão relacionadas às variações de tensão devido à complexa dinâmica de operação dos sistemas interligados, ao nível de harmônicas provenientes da crescente utilização de cargas não lineares no sistema elétrico e ao aumento da utilização de equipamentos sensíveis a esses distúrbios.

Há algumas décadas, a grande maioria dos equipamentos conectados ao sistema elétrico era eletromecânico e robusto, porém, a evolução da tecnologia e a necessidade de soluções que garantam um consumo mais eficiente da energia elétrica têm levado a uma crescente utilização de equipamentos baseados em acionamentos com eletrônica de potência. Esses equipamentos apresentam características não lineares, e quando utilizados em larga escala podem prejudicar a qualidade da energia elétrica de suprimento. Por outro lado, grande parte das cargas dessa natureza também apresenta considerável sensibilidade aos distúrbios que podem ocorrer na qualidade da energia do sistema elétrico.

Em tempo, o termo "problema de qualidade de energia elétrica" pode ser definido como "qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou

desvios na frequência, que resultem em falha ou má operação de um equipamento de um consumidor" [1].

Essas condições não ideais de suprimento de energia elétrica podem gerar perdas consideráveis aos consumidores residenciais, comerciais e industriais. Esses consumidores estão cada vez mais informados e exigentes quanto à qualidade da energia elétrica que consomem. Diante destes aspectos, tem-se notado nos últimos anos um incremento de pedidos de ressarcimento feitos por consumidores às concessionárias de energia associados aos danos em dispositivos eletroeletrônicos, possivelmente ocasionados pelos problemas na qualidade da energia elétrica de suprimento [2].

Em consonância com o assunto, compete à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), dentre outras atribuições, estabelecer regras para mediar os interesses das concessionárias de energia elétrica e de seus consumidores [3]. Dentre os vários documentos elaborados pela ANEEL, destacam-se os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, do qual os Módulos 8 e 9 se alinham diretamente com os objetivos desta dissertação.

O Módulo 8 do PRODIST é o principal documento em âmbito nacional relacionado às recomendações, procedimentos e normalizações sobre o tema qualidade de energia elétrica. Esse módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade da tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de qualidade de energia elétrica [4].

Já em seu Módulo 9, o PRODIST estabelece os procedimentos a serem observados pelas distribuidoras na análise de processos de ressarcimentos por danos elétricos [5]. Não obstante a essa documentação, a metodologia adotada para análise de causa e efeito, para comprovação da necessidade de ressarcimento, não apresenta sustentação técnica e científica, podendo obter resultados não confiáveis.

Complementarmente, observam-se, em [6], preocupações por parte das distribuidoras devido ao grande aumento dos pedidos de indenização por danos elétricos e seus impactos financeiros e sociais, devido a conflitos e outras questões que envolvem a relação entre empresas concessionárias e seus consumidores. Destacam-se, ainda, nessa última referência, os principais equipamentos envolvidos nos pedidos de ressarcimento por danos elétricos de uma distribuidora de grande porte, conforme ilustra

a Figura 1.1. Observa-se que os fornos micro-ondas estão relacionados entre esses eletroeletrônicos, merecendo, assim, uma certa atenção. Com o aumento do poder aquisitivo da população nos últimos anos, aliado à utilidade e praticidade dos fornos micro-ondas, percebe-se um crescente aumento desse eletrodoméstico nas residências brasileiras, sendo uma das justificativas para o foco deste trabalho estar direcionado a esse equipamento.

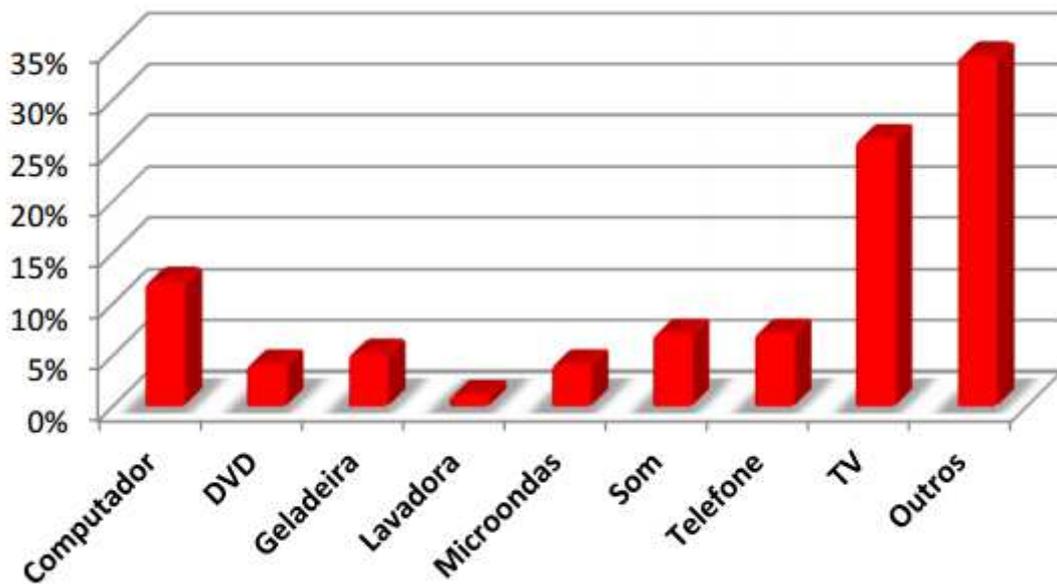


Figura 1.1 - Principais equipamentos reclamados para uma empresa distribuidora [6].

No intuito de analisar os fenômenos relacionados aos distúrbios na qualidade de energia elétrica, bem como o desempenho dos mais variados equipamentos diante dessas perturbações, a utilização de ferramentas computacionais tem apresentado resultados bastante satisfatórios. Essa abordagem computacional pode ser utilizada, também, na análise do relacionamento de um pedido de ressarcimento frente a uma perturbação na qualidade de energia elétrica da concessionária. Geralmente, essas estratégias compreendem as seguintes etapas: modelo do equipamento, implementação computacional no domínio do tempo, validação dos modelos obtidos perante a ensaios laboratoriais, e, finalmente, a comparação entre a suportabilidade do equipamento e os impactos dos distúrbios na tensão de suprimento aplicada nos terminais do equipamento investigado [7].

Ainda, à respeito da utilização de ferramentas computacionais no contexto da qualidade de energia elétrica, uma outra vertente se encontra na análise de impactos que determinadas cargas podem provocar em seu sistema elétrico de suprimento, obtidas por meio de modelagens e simulações. Uma vez que se obtém a validação do modelo da carga e de seu sistema elétrico, a implementação e simulação computacional podem ser consideradas como um excelente método para análises dos impactos que podem ocorrer na qualidade da energia elétrica. Com base nisso, pode-se dizer que esse tipo de ferramenta é uma boa opção para projetistas que atuam, principalmente, com instalações elétricas industriais, tanto no que tange à avaliação dos valores de referências para qualidade de energia elétrica estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, quanto às premissas de dimensionamento de condutores e demais componentes de um instalação elétrica, atendendo às prescrições contidas na norma ABNT NBR 5410 [8]. Essa última norma referenciada é a principal documentação brasileira no que se diz respeito às instalações elétricas em baixa tensão, tratando, inclusive, sobre dimensionamento de condutores em condições de presença de distorções harmônicas e suas particularidades.

Dentro desse contexto, esta dissertação visa contribuir com a análise de desempenho de fornos micro-ondas frente a distúrbios da qualidade de energia elétrica. Sua principal justificativa se baseia na carência de publicações voltadas para a modelagem e análise de desempenho desses equipamentos no contexto da qualidade da energia elétrica. Assim, o escopo dos trabalhos a serem desenvolvidos contempla, primeiramente, a modelagem matemática de um forno micro-ondas doméstico e sua implementação computacional na plataforma ATP (*Alternative Transients Program*). Sua validação é feita por meio da comparação entre os resultados das simulações computacionais e ensaios laboratoriais, sob condições ideais e não ideais de suprimento. Adicionalmente, ressalta-se que este trabalho segue na direção de subsidiar estudos mais precisos relacionados aos pedidos de ressarcimento associados ao danos elétricos provocados em fornos micro-ondas domésticos. Por fim, uma modelagem computacional é desenvolvida no ATP para a representação de um forno micro-ondas industrial real de elevada potência e seu sistema elétrico. Seus resultados são obtidos por meio de quatro estudos de caso que visam avaliar os impactos que o forno industrial pode causar na qualidade de energia elétrica de seu sistema de suprimento. Além dos impactos serem avaliados com base no Módulo 8 do PRODIST, uma atenção especial

se faz necessária em relação ao dimensionamento dos condutores fase e neutro e demais componentes da instalação elétrica com base na norma ABNT NBR 5410.

## 1.2 Estado da arte

Após pesquisas e estudos da bibliografia atual, obteve-se um conjunto de informações que sintetizam distintos trabalhos de pesquisa e avanços do conhecimento no contexto específico desta dissertação. Apresenta-se, na sequência, um resumo das principais bibliografias consultadas sobre o tema em pauta, dividindo-as nas seguintes grandes áreas:

- **Conceitos gerais sobre Qualidade de Energia Elétrica**

Nas referências [1] e [9] podem-se encontrar conceitos, definições e uma extensa descrição dos distúrbios relacionados à qualidade de energia elétrica. Tendo em vista que as questões associadas à qualidade de energia elétrica já estão bastante difundidas, considera-se dispensável maiores comentários sobre o assunto neste trabalho.

- **Normas e recomendações nacionais sobre os aspectos deste trabalho**

A referência [4], Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), é um documento elaborado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) que estabelece os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica, abordando sobre a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras. No que tange aos objetivos deste trabalho, a seção que trata sobre a qualidade do produto caracteriza os fenômenos de qualidade de energia elétrica, estabelece critérios de amostragem, aborda sobre os valores de referência e procedimentos relacionados aos seguintes distúrbios: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variações de frequência.

A referência [5], Módulo 9 do PRODIST, é um documento que estabelece os procedimentos a serem observados pelas distribuidoras na análise de processos de

ressarcimentos por danos elétricos devido a distúrbios ocorridos na rede elétrica. O referido documento, que se encontra em sua primeira versão, é dividido em cinco seções: introdução, análise, verificação, resposta e ressarcimento e, por fim, processo específico.

A norma ABNT NBR 5410 [8] tem o objetivo de estabelecer as condições a que devem satisfazer as instalações elétricas em baixa tensão, a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens. Essa norma se aplica às instalações elétricas de edificações de natureza residencial, comercial, pública, industrial, de serviços, entre outras. No contexto desta dissertação, sua principal aplicação está relacionada ao dimensionamento de condutores e demais equipamentos na presença de distorções harmônicas.

- **Modelagem e desempenho de equipamentos no contexto da qualidade de energia elétrica**

Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos sobre modelagem e desempenho de equipamentos no contexto da qualidade de energia elétrica. Em [10], são feitos estudos de desempenho de fontes lineares e chaveadas, visto que a grande maioria dos equipamentos eletroeletrônicos são constituídos por fontes dessa natureza. Em [11], os estudos no contexto da qualidade de energia elétrica estão direcionados para aparelhos condicionadores de ar. Na dissertação referenciada em [12,] é avaliado o desempenho de refrigeradores domésticos frente aos principais distúrbios relacionados à qualidade de energia elétrica. O trabalho apresentado em [13] tem seu foco em avaliar a sensibilidade de controladores lógicos programáveis (CLPs) quando submetidos a condições não ideais de suprimento, visto que esse equipamento desempenha uma função bastante importante em um processo industrial, podendo causar grandes prejuízos financeiros em caso de sua parada ou mau funcionamento. Em [14], contribuições são feitas em direção ao desenvolvimento de uma estrutura laboratorial para testes de desempenho de equipamentos no contexto da qualidade da energia elétrica, de forma a sistematizar os procedimentos de ensaios definidos. A dissertação [15] apresenta a modelagem de televisores, videocassetes e aparelhos de som e suas validações diante de distúrbios na qualidade da energia de suprimento. Já, em [16], o mesmo tipo de estudo é feito, porém com foco em aparelhos de DVD, fax e telefone sem fio. Na dissertação [17], os esforços

são direcionados à modelagem e análise de desempenho de equipamentos da linha branca diante de distúrbios. Por fim, em [6], é desenvolvida uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos, em que, além da modelagem matemática e computacional, foram feitas validações por meio da comparação entre resultados de ensaios experimentais e simulações computacionais, abordando, também, a inserção do modelo computacional em um aplicativo de análise de pedidos de ressarcimento denominado APR.

- **Modelagem de fornos micro-ondas**

Embora os fornos micro-ondas sejam bastante utilizados atualmente, percebe-se uma carência de estudos envolvendo esse equipamento no contexto da qualidade de energia elétrica. Porém, alguns estudos envolvendo modelagem de fornos micro-ondas estão bastante focados no desenvolvimento e melhorias que tangem a respeito de sua fonte interna de alta tensão. Em [18], é apresentada uma modelagem da fonte de alta tensão de geradores de micro-ondas com um magnétron, tipicamente utilizada em aplicações industriais. Sua implementação computacional foi desenvolvida em Matlab-*Simulink* e contempla o transformador de alta tensão, o circuito dobrador de tensão e a válvula magnétron. Ensaios experimentais são feitos, obtendo as formas de onda de tensão e corrente, e sua validação é feita por meio da comparação com os resultados computacionais. Seu principal objetivo é determinar a potência média absorvida pelo magnétron e obter sua eficiência com base na potência de entrada fornecida pelos dados de placa da fonte de alta tensão. A principal contribuição desse trabalho está relacionada ao desenvolvimento do modelo  $\pi$  do transformador de alta tensão do forno micro-ondas, baseado em sua derivação magnética. Esse modelo representa o núcleo desse transformador especial com três indutâncias não lineares obtidas por meio de sua relação fluxo-corrente e seus parâmetros construtivos. Outros trabalhos foram desenvolvidos com base no modelo  $\pi$  do transformador, envolvendo outras contribuições. Na referência [19], uma abordagem semelhante é utilizada para o modelo  $\pi$  do transformador, porém sua principal contribuição se apoia na abordagem analítica da curva B-H do transformador, tendo sua representação por meio de uma expressão polinomial obtida no Matlab-*Simulink*. O trabalho [20] contribui no sentido de validar a

lei da conservação de fluxos, baseado na comparação entre ensaios experimentais e simulações computacionais utilizando o Matlab-*Simulink*. A busca por uma otimização no projeto do transformador de alta tensão é abordada em [21], analisando seus resultados para variações de alguns parâmetros de seu modelo computacional, tais como: tamanho do circuito magnético, número de espiras do enrolamento secundário, tamanho da derivação magnética e a espessura do entreferro de ar. Ainda relacionado ao modelo  $\pi$  do transformador de alta tensão do forno micro-ondas, outros trabalhos investigam a utilização de uma quantidade maior de magnétrons sendo alimentada pela fonte de alta tensão. Em [22], [23] e [24], é desenvolvido um modelo  $\pi$  do transformador monofásico para alimentação de dois magnétrons ao mesmo tempo. Já em [25], o mesmo desenvolvimento é aplicado para atender três magnétrons. Por fim, em [26] e [27], trabalha-se com a alimentação de três magnétrons, porém utilizando o modelo  $\pi$  do transformador em uma configuração trifásica.

### 1.3 Contribuições desta dissertação

Muito embora se reconheça os avanços obtidos pelas pesquisas referenciadas anteriormente, ainda há várias lacunas e carências no campo da representação de fornos micro-ondas no contexto da qualidade de energia elétrica. Com base nisso, este trabalho complementa e procura contribuir nessa direção por meio do desenvolvimento de uma modelagem computacional de fornos micro-ondas, sua validação sob condições ideais e não ideais de suprimento, além de sua implementação em uma configuração industrial baseada em uma aplicação real. Em suas várias etapas, os desenvolvimentos são embasados na legislação e recomendações brasileiras como o Módulos 8 e 9 do PRODIST e ABNT NBR 5410. De forma mais específica, esta dissertação apresenta contribuições nos seguintes pontos:

- Modelagem matemática e implementação computacional, no domínio do tempo, de um forno micro-ondas doméstico, contemplando tanto seus aspectos de entrada como suas características internas;
- Validação do modelo por meio da comparação entre resultados provenientes de ensaios experimentais e simulações computacionais, em condições de suprimento ideais e não ideais;

- Subsídio a estudos de desempenho de fornos micro-ondas frente a distúrbios na qualidade de energia elétrica, voltados para a área de pedidos de ressarcimento por danos elétricos;
- Implementação computacional de um forno micro-ondas industrial real de elevada potência e a avaliação do impacto na qualidade de energia elétrica do seu sistema de suprimento.
- Subsídio a projetistas quanto ao correto dimensionamento dos condutores fase e neutro, conforme prescrições contidas na norma de instalações elétricas em baixa tensão, ABNT NBR 5410.

## **1.4 Estrutura desta dissertação**

Diante do exposto e das lacunas encontradas, além do presente capítulo introdutório, esta dissertação encontra-se estruturada da seguinte maneira:

### **Capítulo II - Considerações Gerais Sobre Fornos Micro-Ondas**

Este capítulo, de cunho didático, apresenta, primeiramente, as considerações gerais sobre as micro-ondas, o princípio de transformação da energia eletromagnética em calor e suas principais aplicações em fornos domésticos e industriais. Em seguida, são apresentadas suas partes constituintes e seu princípio de funcionamento.

### **Capítulo III - Modelagem Matemática e Computacional de um Forno Micro-Ondas Doméstico**

Esta unidade apresenta a identificação dos principais componentes do forno micro-ondas em estudo, assim como suas características técnicas, a fim de se obter um modelo elétrico representativo. Em seguida, faz-se uma modelagem matemática baseada em seu circuito equivalente. Por fim, seu modelo representativo é implementado computacionalmente por meio do programa ATP (*Alternative Transients Program*).

### **Capítulo IV - Validação do Modelo Computacional do Forno Micro-Ondas em Condições Ideais e Não Ideais de Suprimento**

De posse do modelo do forno micro-ondas doméstico implementado no ATP, são realizadas simulações computacionais envolvendo a alimentação do equipamento com tensões senoidais ideais, além de condições em que a qualidade de sua energia elétrica de suprimento se encontra com perturbações. A validação do modelo do forno micro-ondas é feita por meio da comparação dos resultados obtidos computacionalmente com aqueles oriundos de ensaios experimentais.

### **Capítulo V - Avaliação do Impacto da Operação de um Forno Micro-Ondas Industrial Real na Qualidade de Energia Elétrica**

Uma vez que a modelagem computacional desenvolvida é validada para condições ideais e não ideais de suprimento, esta seção está direcionada à realização de estudos computacionais empregando o modelo para a representação de um forno micro-ondas industrial real de elevada potência e avaliação dos impactos que pode causar na qualidade de energia elétrica de seu sistema de suprimento. Os casos analisados computacionalmente envolvem distúrbios relacionados às distorções harmônicas e desequilíbrios envolvendo a operação do forno micro-ondas industrial.

### **Capítulo VI - Conclusões Gerais**

Este capítulo destina-se a sintetizar as análises e discussões sobre os principais resultados e constatações feitas durante o desenvolvimento desta dissertação. Por fim, são ressaltadas as principais contribuições deste trabalho, bem como sugestões para futuros desenvolvimentos.

## CAPÍTULO II

# Considerações gerais sobre fornos micro-ondas

## 2.1 Considerações iniciais

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas não ionizantes que se encontram na faixa de 300 MHz a 300 GHz, apresentando comprimento de ondas de um milímetro a um metro. São, portanto, ondas que se situam entre as regiões de infravermelho e rádio, conforme mostra a Figura 2.1.

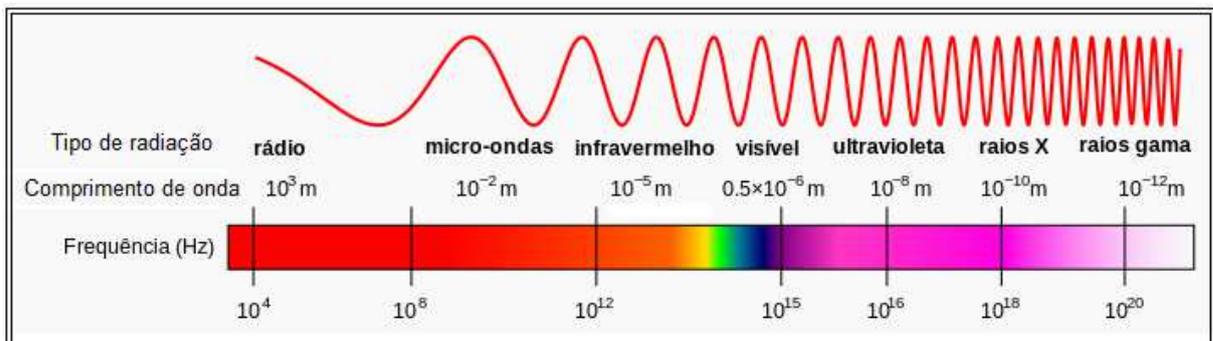


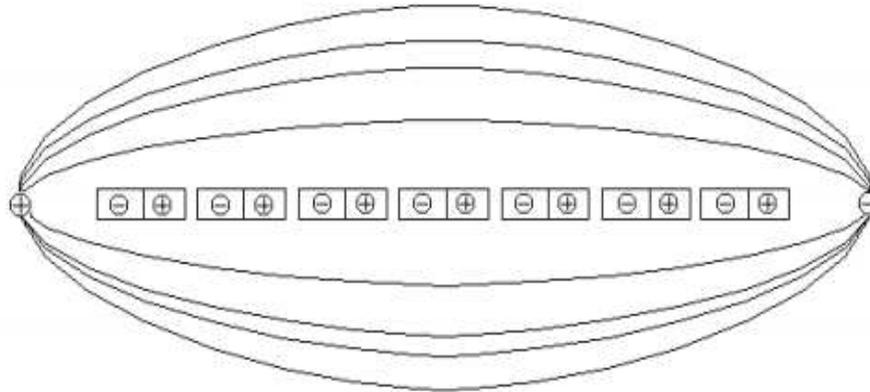
Figura 2.1 - Localização da região de micro-ondas no espectro eletromagnético.

A tecnologia de micro-ondas foi desenvolvida na Segunda Guerra Mundial, e sua primeira aplicação prática foi na construção de radares (*Radio Detection And Ranging* - Detecção e Localização por Rádio) nas décadas de 1940 e 1950. Esses equipamentos eram capazes de detectar aviões e navios a vários quilômetros de distância, por meio da emissão de micro-ondas que, ao se chocarem com o objeto, eram refletidas e captadas por um receptor.

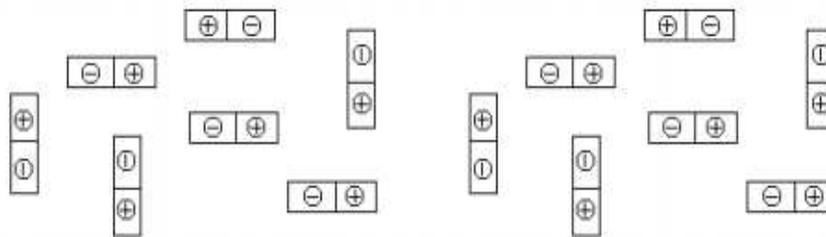
Durante o desenvolvimento dos radares, diversas características das micro-ondas foram esclarecidas, surgindo então numerosas aplicações para essa faixa de frequências, como por exemplo: física da matéria condensada, astrofísica, medicina, telecomunicações, química de novos materiais, aviação civil, indústria e culinária [28].

A pesquisa de sistemas de radar levou à descoberta acidental da aplicação mais utilizada hoje em dia, que são os fornos de micro-ondas. Segundo a literatura, essa descoberta se deu em 1945 quando o engenheiro Percy Spencer, trabalhando com radares, percebeu que uma barra de chocolate havia se derretido em seu bolso. Descobriu, assim, que as micro-ondas têm a capacidade de aquecer alimentos, pois a energia das ondas nessa região do espectro eletromagnético corresponde à energia do movimento rotacional de algumas moléculas dipolares presentes nos alimentos, como água, gorduras e açúcares [29].

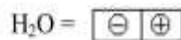
O aquecimento por micro-ondas é chamado de aquecimento dielétrico e se difere daquele que ocorre em um forno de cozinha convencional, onde o aquecimento de alimentos ocorre por condução, irradiação e convecção. Seu princípio de transformação da energia eletromagnética em calor é chamado de rotação de dipolo e está relacionado com o alinhamento das moléculas com o campo aplicado. Uma representação esquemática é mostrada na Figura 2.2, em que se usou a água como exemplo [30].



1- Dipolos alinhados com o campo eletromagnético.



2- Dipolos após a retirada do campo eletromagnético.



**Figura 2.2 - Moléculas de água com e sem a influência do campo elétrico [30].**

Como o campo que constitui a radiação de micro-ondas é alternado no tempo, os dipolos permanecem sempre em oscilação mecânica na frequência das micro-ondas. Dessa forma, a energia é transformada em calor em função da fricção molecular causada pelos dipolos em movimento. A quantidade de calor gerada por esse processo é diretamente proporcional à capacidade das moléculas em se alinhar com a frequência do campo a qual estão submetidas. Se o dipolo não possuir tempo suficiente para se realinhar ao campo aplicado (radiação de alta frequência) ou se realinha muito rapidamente ao mesmo (radiação de baixa frequência), não ocorrerá a produção de calor. As frequências do espectro de micro-ondas situam-se justamente entre esses dois limites, propiciando aos dipolos tempo suficiente para se alinhar e realinhar ao campo eletromagnético [31].

Outro princípio que ocorre na transformação da energia eletromagnética em calor é chamado de condução iônica, e o calor é gerado através de perdas por fricção, que acontecem através da migração de íons dissolvidos quando submetidos a um campo eletromagnético. Estas perdas dependem do tamanho, carga, condutividade dos íons dissolvidos e interação destes últimos com o solvente [30].

O fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) mede a eficiência da conversão de energia eletromagnética em calor. A constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) da substância é uma medida que indica a sua polaridade. Já a razão  $\epsilon''/\epsilon'$  é numericamente igual a  $\tan \delta$  ( $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ ), sendo chamada de fator de dissipação, que significa a habilidade de uma amostra converter radiação eletromagnética em calor (quanto maior este valor mais a substância é aquecida por micro-ondas) [30].

É interessante destacar que a frequência utilizada nos fornos micro-ondas não é igual à frequência natural (frequência de ressonância) das moléculas, para não ser inteiramente absorvidas nas primeiras camadas do alimento, sem chegar ao seu interior. Dessa forma, frequências mais altas penetrariam menos e não aqueceriam o interior do alimento, e frequências mais baixas penetrariam melhor, porém, não haveria uma boa absorção dessa energia. Assim, procura-se otimizar, escolhendo frequências intermediárias.

Há quatro valores de frequência designados para uso nos fornos de micro-ondas: 13,56 MHz, 27,12 MHz, 896 MHz e 2,45 GHz. Essas frequências foram padronizadas para que não haja interferência em sistemas de comunicação que usam frequências próximas. A frequência mais utilizada nos fornos domésticos é a de 2,45 GHz, que tem um comprimento de onda compatível ao tamanho do forno. As outras frequências são mais utilizadas em aplicações industriais [28].

## 2.2 Utilização de fornos micro-ondas

Após as descobertas sobre as propriedades de aquecimento das micro-ondas, durante a Segunda Guerra Mundial, os primeiros fornos experimentais foram desenvolvidos, porém eram grandes e caros. No final dos anos 1960, começaram a ser projetados fornos mais convenientes para uso doméstico. Esses fornos foram se tornando cada vez mais populares por cozinhar os alimentos mais rapidamente, além de serem muito eficientes no uso da eletricidade, pois aquecem apenas os alimentos, e nada

mais. As radiações com essas frequências são absorvidas pela água, açúcares e gorduras, mas não o é pela maioria dos plásticos, vidros e cerâmicas. Por isso, as micro-ondas são capazes de aquecer os alimentos sem provocar o aquecimento do vasilhame. Estes se aquecem apenas devido ao contato com os alimentos quentes [28].

O aquecimento e secagem por micro-ondas têm várias vantagens em relação aos métodos convencionais, tais como: tem aquecimento rápido, apresenta economia significativa de energia elétrica, ocupa menos espaço e permite controle de aquecimento e secagem mais preciso e eficiente [32].

Devido às suas várias vantagens, os fornos micro-ondas vêm sendo utilizados em inúmeras aplicações industriais como, por exemplo, produção, secagem e cura de polímeros cerâmicos, na indústria microeletrônica, em usinas de reciclagem, na secagem e carbonização de madeira, tratamento de resíduos sólidos de saúde e inativação de resíduos sólidos de tratamento de esgoto.

A vulcanização de borracha foi a primeira aplicação industrial para os fornos de micro-ondas, a partir da década de 1960. Enquanto nos sistemas que utilizam fontes térmicas o aquecimento da borracha é superficial e externo, o aquecimento gerado pelas micro-ondas é mais profundo, garantindo um aquecimento mais uniforme e uma melhoria na qualidade do produto [29].

A referência [33] apresenta um estudo sobre a "transesterificação alcalina de óleos vegetais para a produção do biodiesel", em que a tecnologia por radiação de micro-ondas se mostra vantajosa em comparação com os métodos convencionais, acelerando significativamente a reação de transesterificação, permitindo obter elevados rendimentos de produtos em um curto período de tempo, consumindo menos energia.

Nas referências [34] e [35], são apresentados estudos sobre "descontaminação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo por meio da secagem por micro-ondas". No processo de perfuração de poços de petróleo, os fragmentos de rocha gerados pela broca, juntamente com seu fluido de perfuração, são transportados para a superfície. Devido à toxicidade e baixa biodegradabilidade desse fluido, é necessário um sistema de separação para que o cascalho retirado possa ser descartado no meio ambiente. Esses trabalhos apontam que a técnica de separação por micro-ondas é muito promissora, pois apresenta alta eficiência e menores problemas operacionais, quando comparada aos equipamentos convencionais.

Os fornos micro-ondas, com algumas alterações, principalmente na potência e na frequência utilizadas, passaram a ser bastante utilizados em processos químicos que utilizam aquecimento de substâncias formadas por moléculas polares. Esse é um recurso que traz algumas vantagens quando comparado a métodos de aquecimento que utilizam fogo ou resistências elétricas. Assim, as paredes dos recipientes apolares ficam mais frias, emitindo menor quantidade de energia para o ambiente, enquanto o interior da amostra polar permanece aquecido [29].

### 2.3 Composição e princípio de funcionamento dos fornos micro-ondas

Embora os fornos micro-ondas possam ser utilizados em diversas aplicações, sua principal utilização ainda se encontra nas residências, para o cozimento de alimentos. A Figura 2.3 ilustra um forno doméstico com frequência das micro-ondas de 2,45 GHz, potência de 1000 W, alimentado em 220V, cuja cavidade de cozimento possui um volume interno de 31 litros.



Figura 2.3 - Forno micro-ondas doméstico.

Apesar de sofrerem algumas variações de um fabricante para outro, além de algumas melhorias ao longo do tempo, o princípio de funcionamento dos fornos micro-ondas residenciais e seus componentes básicos são os mesmos. Sua estrutura pode ser dividida em componentes elétricos, eletrônicos, mecânicos, e demais dispositivos que garantem a proteção do equipamento e a segurança das pessoas que vão manuseá-lo. O diagrama ilustrativo da Figura 2.4 apresenta, de forma resumida, algumas características

encontradas em um forno micro-ondas. Nos próximos tópicos esses itens serão melhor abordados.

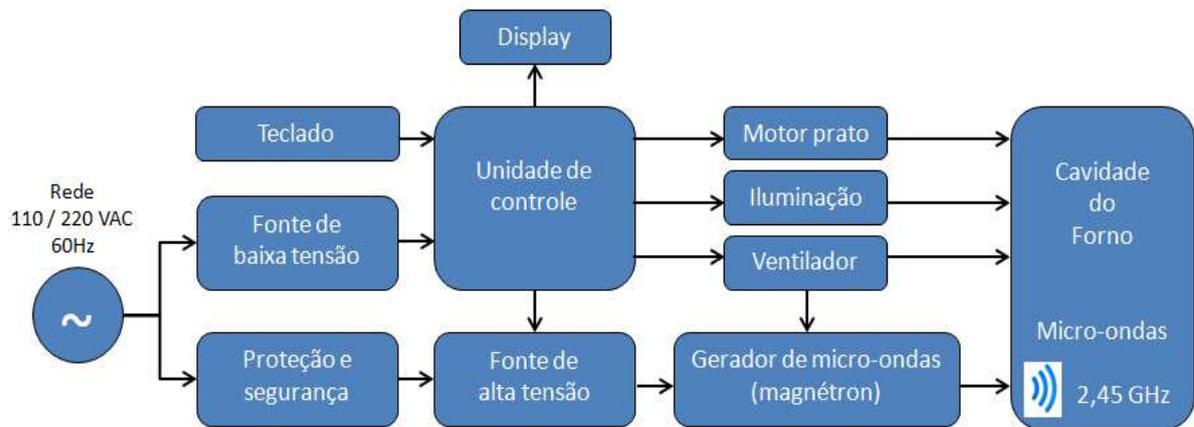


Figura 2.4 - Diagrama ilustrativo das características de um forno micro-ondas.

### 2.3.1 Estrutura física

A Figura 2.5 ilustra algumas características da estrutura física de um forno micro-ondas doméstico.

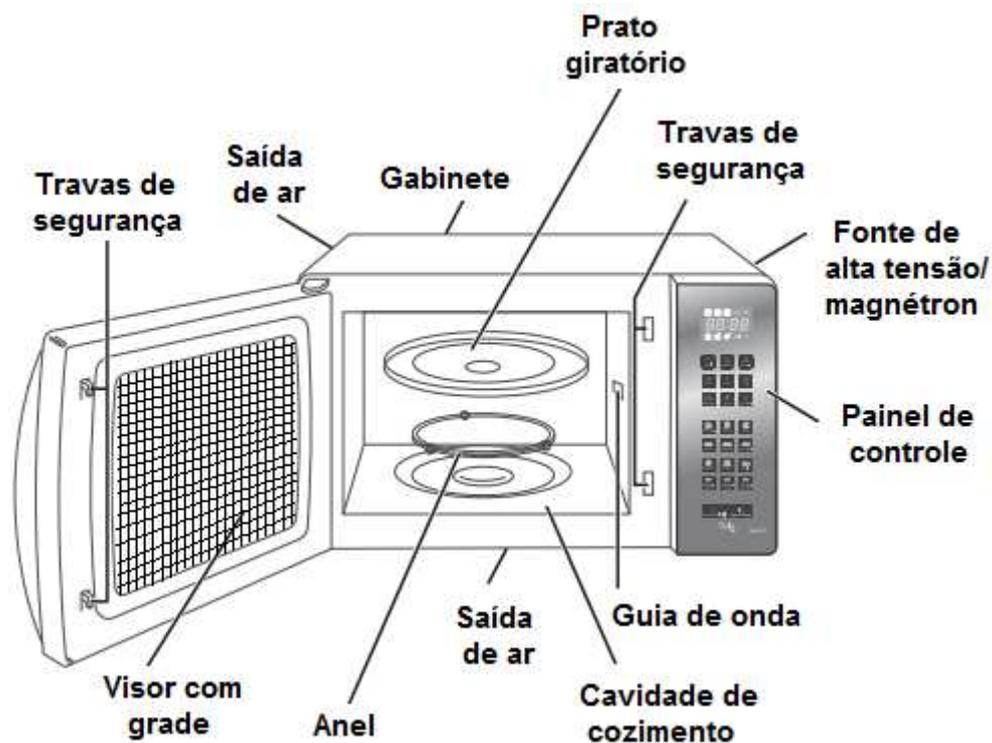


Figura 2.5 - Estrutura física de um forno micro-ondas doméstico.

A cavidade de cozimento (ou câmara de cozimento) é o recipiente onde o alimento é inserido. O tempo em que o alimento será aquecido é ajustado por meio do painel de controle, que irá ligar e desligar a fonte de alta tensão que alimenta o magnétron, responsável pela emissão das ondas eletromagnéticas. As micro-ondas são captadas e irradiadas da antena do magnétron até a cavidade de cozimento através de um tubo metálico denominado guia de onda. Essas ondas eletromagnéticas, ao chegarem na câmara de cozimento, interagem com o alimento, aquecendo-o. As paredes da cavidade de cozimento são feitas de materiais metálicos (geralmente de aço inoxidável), capazes de refletir as micro-ondas que não são imediatamente absorvidas pelos alimentos, até que sejam, finalmente, absorvidas. Para garantir uma distribuição uniforme das micro-ondas no alimento, há um prato giratório. O prato é propositalmente de vidro para permitir que as micro-ondas o atravessem sem perda de eficiência, pois o vidro é transparente para essa banda de frequências.

A câmara de cozimento é projetada em função do comprimento de onda utilizado no forno. Ondas confinadas entre paredes sofrem reflexões que fazem com que haja ondas deslocando-se em sentidos opostos. Essas ondas de mesma frequência, mesma amplitude, mesma velocidade, mesma direção e sentidos opostos, se sobrepõem. A superposição pode formar ondas estacionárias, dependendo da relação entre o comprimento de onda e a distância entre as extremidades. A energia transportada por uma onda eletromagnética fica confinada nas regiões de vibração, permitindo a conversão de energia, mas, no caso de ondas estacionárias isso não ocorre, pois são representadas pelos nós, que não vibram. Em um forno de micro-ondas, a câmara de cozimento é dimensionada de maneira que suas paredes sempre coincidam com os nós das ondas eletromagnéticas, conforme é visto na Figura 2.6. Assim, praticamente não haverá absorção de energia das ondas pelas paredes do forno, proporcionando reflexões próximas à condição ideal de formação de onda estacionária. Dessa forma, a distância entre as paredes deve, então, ser um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda das micro-ondas utilizadas no processo. Como se pode observar na Figura 2.6, meio comprimento de onda, considerando uma frequência de 2,45 GHz, é igual a 6,12 centímetros. Do mesmo modo que ocorre na cavidade de cozimento, a seção do guia de ondas deve ter dimensões iguais ou múltiplos inteiros de meio comprimento de onda, para que os nós das ondas estacionárias coincidam com as paredes do tubo, a fim de se evitar o surgimento de corrente elétrica em suas paredes [29].

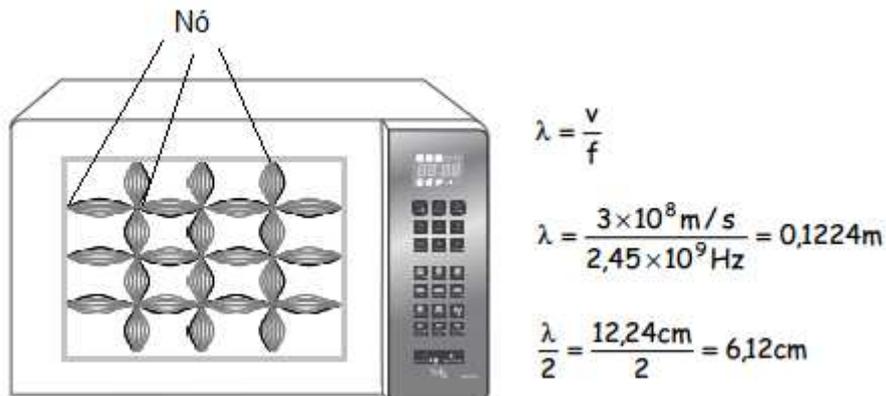


Figura 2.6 - Ondas eletromagnéticas na câmara de cozimento de um forno micro-ondas.

Tratando-se de segurança, diferentemente de raios ultravioleta, raios X e raios  $\gamma$ , as radiações de micro-ondas não podem causar alterações moleculares nos tecidos. O único problema que as micro-ondas podem causar são queimaduras. Para isso, o forno é projetado de forma a garantir que não haja vazamento, principalmente pela porta. A janela da porta é fabricada em três camadas: uma de vidro temperado, uma grade metálica intermediária e outra de filme plástico translúcido interno, conforme ilustrado na Figura 2.7. O vidro tem a função de permitir a passagem da luz e a camada de filme plástico interno, além de permitir a passagem da luz, protege a grade metálica contra acúmulo de sujeiras e contra corrosão. A grade metálica é projetada de maneira que as perfurações tenham um diâmetro muito maior que o comprimento de onda da luz, de forma a permitir a visibilidade, porém com diâmetro muito menor que o comprimento de onda das micro-ondas, bloqueando e refletindo-as de volta para o interior da cavidade de cozimento [29].

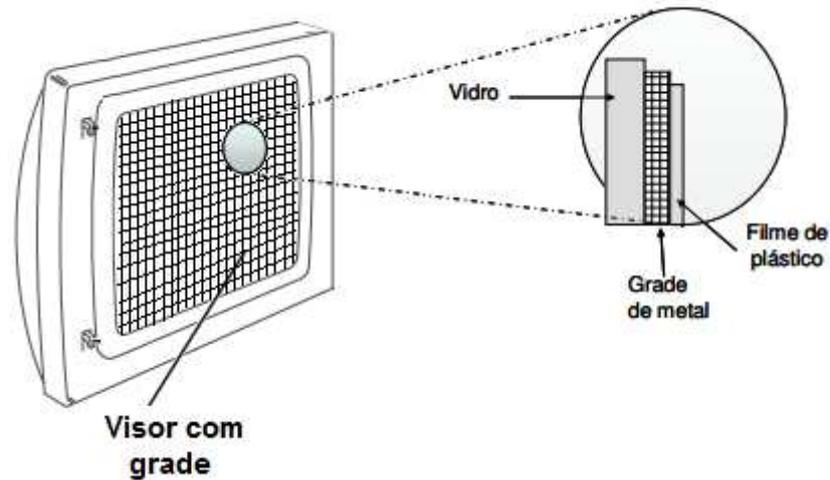


Figura 2.7 - Proteção contra vazamento de micro-ondas pela porta do forno.

### 2.3.2 Circuito elétrico principal

A Figura 2.8 apresenta o circuito elétrico principal do forno micro-ondas, destacando seus principais componentes. Tem-se a válvula magnétron (a) e os componentes de sua respectiva fonte de alimentação de alta tensão, formada por um transformador (b) e um circuito dobrador de tensão composto por um capacitor (c) e um diodo (d).

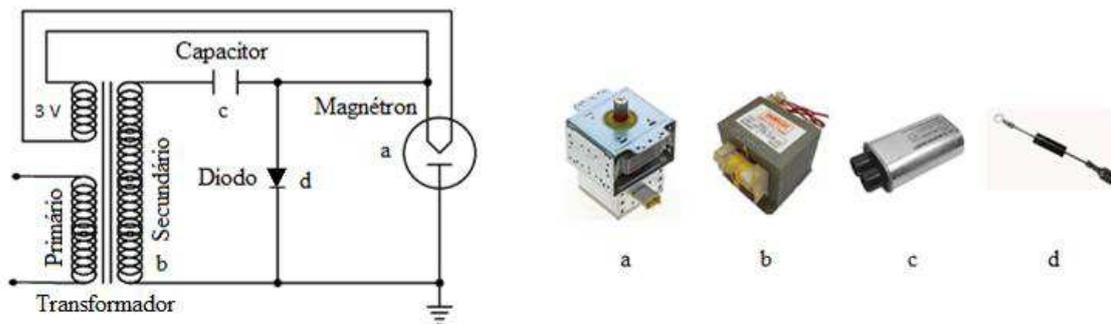


Figura 2.8 - Circuito elétrico principal do forno micro-ondas: a) Magnétron; b) Transformador de alta tensão; c) Capacitor de alta tensão; d) Diodo de alta tensão.

#### A. Magnétron

O magnétron, principal componente do forno micro-ondas, é uma válvula termiônica responsável por converter a energia elétrica em ondas eletromagnéticas. Sua estrutura é formada por cátodo, ânodo, ímãs permanentes, antena e aletas para dissipação de calor, conforme apresentado na Figura 2.9.

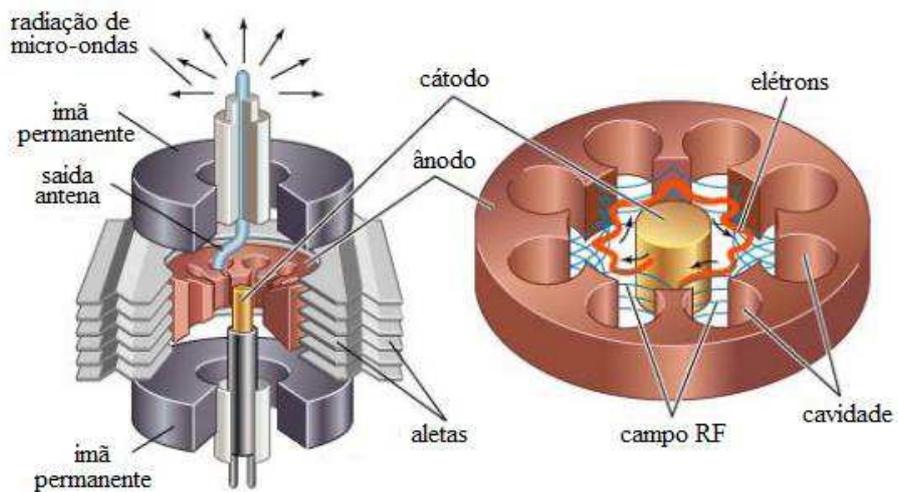


Figura2.9 - Magnétron [36].

O cátodo, localizado no centro do magnétron, é composto por um filamento que emite elétrons ao ser aquecido através da passagem de uma corrente elétrica. Sua alimentação é proveniente de uma fonte de alta tensão que impõe um potencial negativo de aproximadamente 4000 Vcc em relação ao ânodo, formando um campo elétrico. O ânodo é uma peça oca, geralmente feita de cobre, com um número par de cavidades e é eletricamente aterrado. Os elétrons emitidos pelo filamento são acelerados pelo campo elétrico e têm sua trajetória desviada pelo campo magnético formado pelos dois ímãs permanentes, fazendo com que percorram uma trajetória circular em vez de se deslocarem diretamente em direção ao ânodo, conforme é mostrado na Figura 2.10. Ajustando-se convenientemente os valores desses campos, bem como as dimensões das cavidades em que os elétrons se propagam, é possível obter um circuito oscilante em que a indutância está associada ao deslocamento dos elétrons pelas paredes da cavidade e a capacitância está associada ao acúmulo de cargas entre seus vãos [28]. Dessa forma, o magnétron é projetado para se comportar como um circuito ressonante com os valores de indutância e capacitância muito pequenos, emitindo oscilações de alta frequência. Essas ondas eletromagnéticas são conduzidas para o exterior através de uma antena conectada ao ânodo.

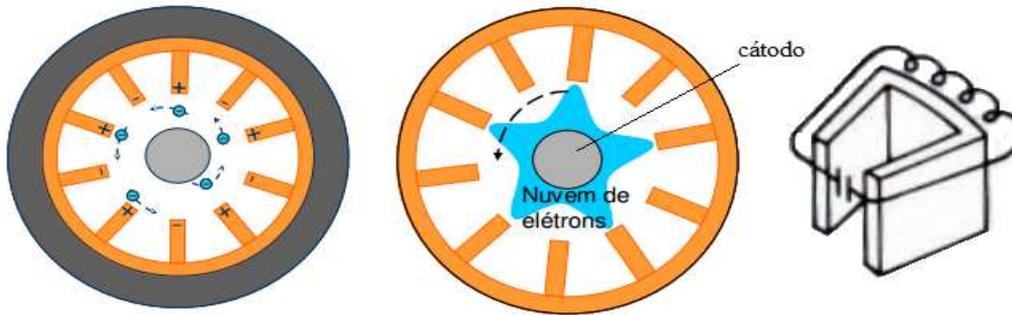


Figura 2.10 - Cavidade ressonante [29].

*B. Fonte de alta tensão*

A fonte de alimentação do forno micro-ondas tem três funções específicas: aquecer o filamento do magnétron através da passagem de corrente, fornecer uma alta tensão ao cátodo e garantir estabilidade de corrente para não comprometer a vida útil do magnétron. A fonte de alimentação é composta por um transformador de três enrolamentos, um diodo e um capacitor, ambos de alta tensão, e seu funcionamento é descrito conforme a Figura 2.11.

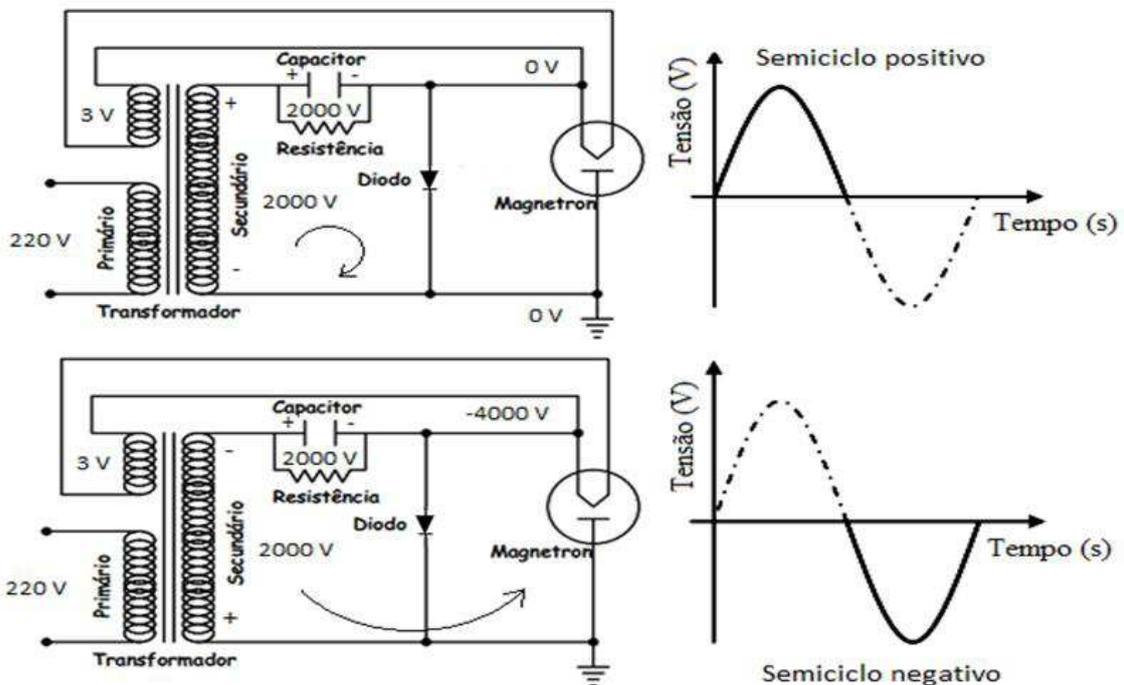


Figura 2.11 - Circuito elétrico do forno micro-ondas [28].

O aquecimento do filamento ocorre por meio da passagem da corrente proveniente do enrolamento terciário do transformador, cuja tensão é próxima a 3 V. Já

o elevado potencial de alimentação do magnétron é obtido por um circuito dobrador de tensão de meia onda. No semiciclo positivo da tensão, o capacitor se carrega com aproximadamente 2000 V proveniente do enrolamento secundário do transformador, pois o diodo está diretamente polarizado. No semiciclo negativo, como o diodo está inversamente polarizado, os 2000 V armazenados no capacitor se somam aos 2000 V do secundário do transformador, gerando um potencial de aproximadamente -4000 Vcc no cátodo em relação ao ânodo do magnétron. Dentro da carcaça do capacitor, há um resistor para descarregá-lo, quando o forno é desligado.

Diferentemente de um transformador convencional, o transformador do micro-ondas apresenta uma derivação em seu núcleo. Essa derivação se consiste em lâminas de material magnético empilhadas e localizadas entre o enrolamento primário e o secundário. Sua função é desviar o fluxo que circula entre o enrolamento primário e secundário e essa dispersão adicional protege o magnétron contra eventuais variações de tensão [18]. A Figura 2.12 apresenta o transformador de alta tensão utilizado no forno micro-ondas, destacando sua derivação magnética entre o enrolamento primário e secundário.

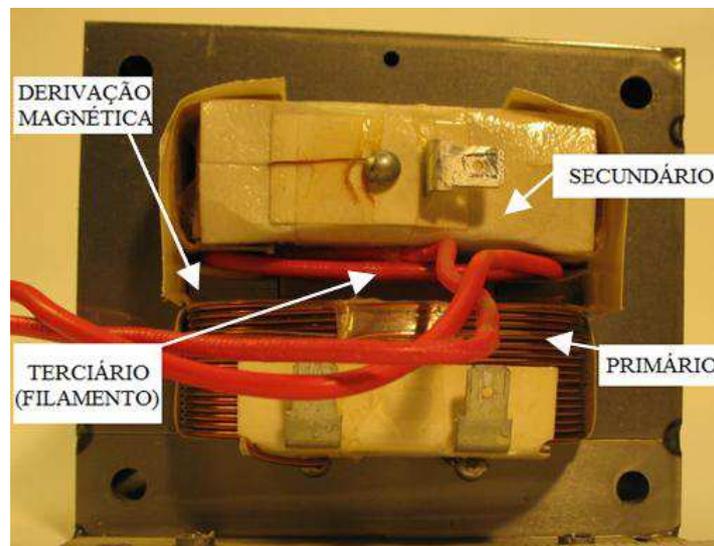


Figura 2.12 - Transformador de alta tensão utilizado no forno micro-ondas.

### 2.3.3 Unidade de controle

#### A. Painel e circuito de controle

A operação do forno micro-ondas é feita por meio de seu painel de controle, localizado na parte frontal do equipamento. Esse painel é composto por um teclado, o qual, juntamente com seu circuito de controle, permite ligar, desligar e ajustar o tempo em que a válvula magnétron ficará ligada, além de ajustar a potência média de operação do forno. Essas funções podem ser mostradas por meio de um display. A Figura 2.13 ilustra o painel e circuito de controle do forno micro-ondas.



a) Painel frontal



b) Circuito de controle

**Figura 2.13 - Painel e circuito de controle do forno micro-ondas.**

Além das funções manipuladas pelo o usuário do eletrodoméstico, existem algumas funções automáticas, como:

- acionamento da lâmpada interna quando a porta frontal é aberta e quando o forno é ligado;
- acionamento do motor do prato giratório quando o forno está em funcionamento;
- acionamento do motor do ventilador para refrigeração do magnétron e do transformador de alta tensão.

O acionamento dos motores e lâmpada, bem como do transformador de alta tensão, é feito por meio de relés comandados pelo circuito de controle. Dessa forma, o controle de potência de um forno micro-ondas é feito, em sua grande maioria, por meio da modulação do tempo em que o relé da sua fonte de alta tensão estará acionado.

Assim como existe uma fonte de alimentação de alta tensão para o magnétron, existe, também, uma fonte de alimentação de baixa tensão para fornecer tensões contínuas para o circuito de controle. Essa fonte de alimentação é constituída, basicamente, por um transformador abaixador de 110 / 220 V para 12 / 24 V, um varistor para proteção contra sobretensões no primário e um circuito retificador no secundário do transformador.

### *B. Controle de potência*

Quanto maior for a potência do forno, mais rápido será o cozimento dos alimentos, porém, a densidade e as estruturas moleculares dos alimentos são características importantes que devem ser consideradas na escolha do ciclo de funcionamento e da potência dos fornos micro-ondas. Os primeiros fornos eram projetados para trabalhar com uma única potência de saída, o que poderia deixar os alimentos duros e com aspectos irregulares [29].

Devido aos problemas anteriormente citados, foram desenvolvidas algumas técnicas para o controle da potência de saída dos fornos micro-ondas. A principal técnica está relacionada ao controle do ciclo de trabalho da válvula magnétron. A grande maioria dos fornos micro-ondas domésticos faz o controle de potência de saída do magnétron por meio da modulação do tempo em que sua fonte de alta tensão fica ligada ( $T_{on}$ ) e desligada ( $T_{off}$ ). A razão entre o tempo em que o magnétron está ligado e o ciclo completo de operação ( $T$ ) determina o ciclo de trabalho do equipamento, que, por sua vez, está diretamente relacionado à potência média entregue à carga ( $P_{méd}$ ). As equações (2.1) a (2.3) apresentam o exposto.

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (2.1)$$

$$Ciclo\ de\ trabalho = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.2)$$

$$P_{méd} = P_{mag} \cdot Ciclo\ de\ trabalho \quad (2.3)$$

A Figura 2.14 mostra um gráfico que representa a potência média de saída de um forno micro-ondas de 1000 W de potência ( $P_{mag}$ ). De acordo com o gráfico, percebe-se que sua potência média de saída ( $P_{méd}$ ) será 250 W, por estar sendo

controlada em um ciclo de trabalho de 25%. Já a Figura 2.15 apresenta uma tabela com valores de ciclo de trabalho tipicamente encontrados em fornos micro-ondas domésticos.

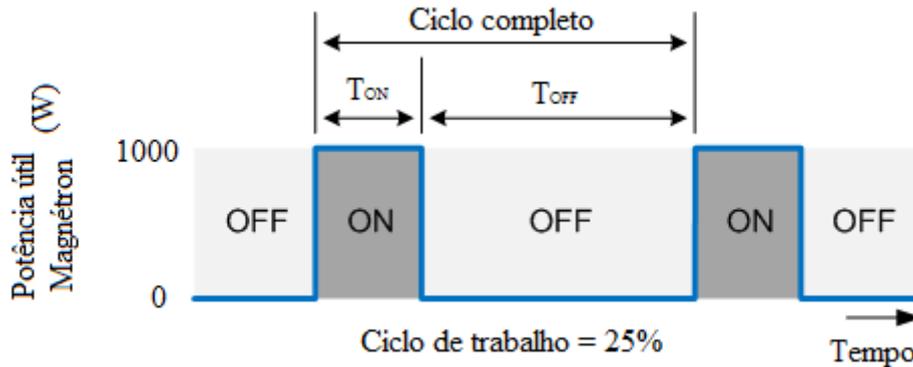


Figura 2.14 - Controle da potência de saída do magnétron por meio do ciclo de trabalho.

Potência	Percentual	T (s)	Ton (s)	Toff (s)
Alta	100%	22	22	0
Média	68%	22	15	7
Baixa	41%	22	9	13

Figura 2.15 - Valores de ciclo de trabalho tipicamente encontrados em fornos micro-ondas domésticos.

Além do controle do ciclo de trabalho, outras técnicas de controle de potência de saída foram desenvolvidas, tais como:

- Fonte de tensão variável: a potência de saída do magnétron pode ser variada em função da tensão de entrada do transformador de alta tensão, porém é pouco utilizada devido ao seu alto custo;
- Controle resistivo: resistências em paralelo podem ser conectadas em série com o diodo de alta tensão, limitando a tensão que o capacitor recebe, consequentemente, reduzindo a tensão do magnétron. O chaveamento dessas resistências permite, então, controlar a potência de saída do magnétron. Essa técnica não é eficiente, pois o resistor irá dissipar essa energia em forma de calor, além de necessitar de algum dispositivo para resfriar o calor gerado internamente;
- Controle capacitivo: ao chavear capacitores, a tensão de alimentação do magnétron será alterada, controlando sua potência de saída. Porém, essa

técnica é difícil de ser implementada devido às elevadas tensões envolvidas no chaveamento dos capacitores;

- Chaveamento de alta frequência: fontes chaveadas de estado sólido também são utilizadas para alimentação do magnétron, permitindo controle de potência praticamente contínuo, por meio de chaveamentos de alta frequência. Apesar do custo mais elevado, relacionado à eletrônica de potência envolvida, essa técnica permite uma redução considerável do tamanho e do peso do transformador de alta tensão.

### *C. Tipos de partida*

O filamento do magnétron deve ser aquecido para emitir elétrons e entrar em operação. Conforme apresentado anteriormente, esse aquecimento se dá devido à passagem de corrente elétrica proveniente do enrolamento terciário, de 3 V, do transformador de alta tensão. O filamento do magnétron leva, aproximadamente, 2 segundos para aquecer o suficiente para emitir elétrons, gerando micro-ondas apenas após esse intervalo. Esse tipo de partida é chamado de partida fria e, atualmente, praticamente todos os fornos micro-ondas domésticos utilizam esse tipo de partida. Nos fornos micro-ondas antigos, e em alguns fornos industriais que exigem um controle de potência mais preciso, o transformador responsável pelo aquecimento do filamento é uma unidade separada do transformador de alta tensão. Dessa forma, o filamento é energizado quando o forno é inicialmente ligado e permanece sempre aquecido e emitindo elétrons até o final de sua operação, independentemente do seu ciclo de trabalho. Esse tipo de partida é denominado partida quente e possibilita a geração de potência de micro-ondas instantaneamente, sem depender do tempo de 2 segundos a cada ciclo. A Figura 2.16 apresenta uma comparação gráfica entre a saída de potência do magnétron em um forno micro-ondas de partida quente e outro de partida fria.

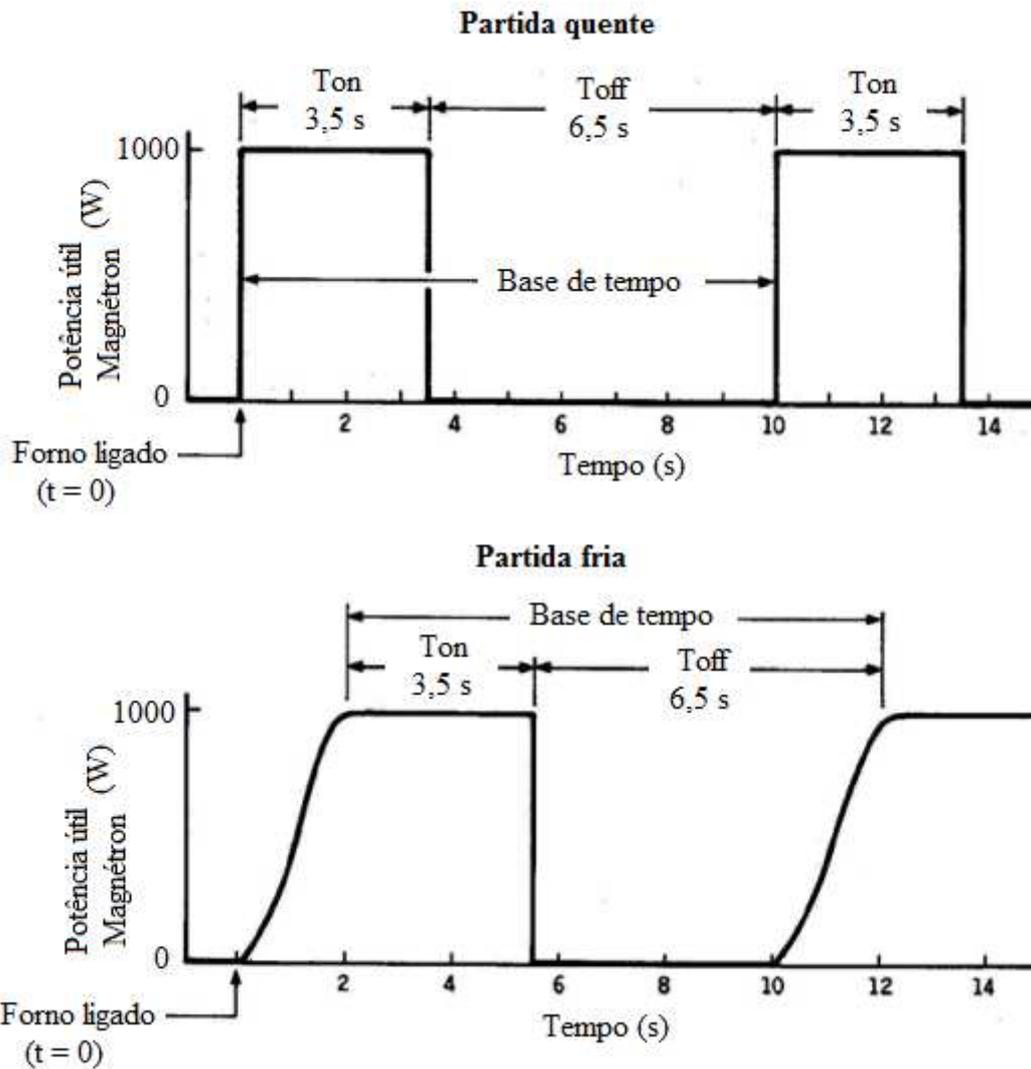


Figura 2.16 - Comparação entre partida quente e partida fria.

O forno de partida quente apresenta a vantagem de controle de potência mais preciso por meio da escolha de uma base de tempo menor que 2 segundos, o que é extremamente importante em algumas aplicações. Porém, devido à baixa necessidade de precisão no controle de potência de fornos domésticos e à redução nos custos de produção do equipamento, opta-se pela utilização de partida fria por meio da adição de um enrolamento terciário no transformador de alta tensão.

### 2.3.4 Componentes de proteção e segurança

Os fornos micro-ondas são dotados de dispositivos para garantir a proteção de seus componentes, assim como para a segurança de seus usuários. Pode-se observar na Figura 2.17, o grupo de dispositivos que se encontram logo após o cabo de alimentação

do equipamento, antes da conexão com o primário do transformador de alta tensão. Por estarem em série, ao ocorrer a atuação de qualquer um dos dispositivos de proteção, a fonte de alimentação de alta tensão é desligada, até que as condições normais se reestabeleçam.

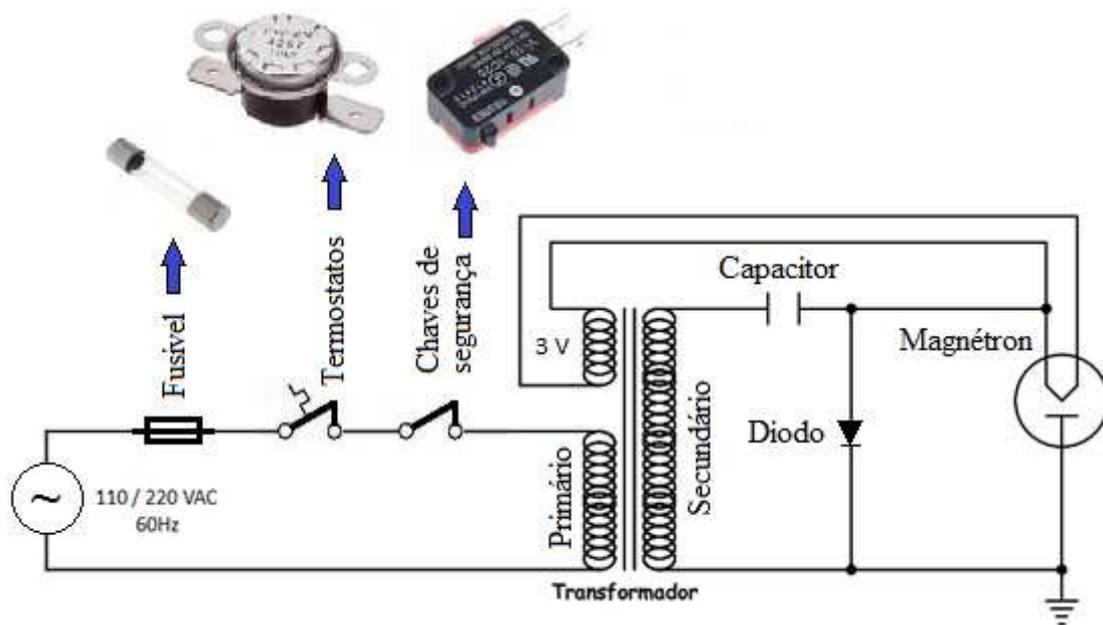


Figura 2.17 - Dispositivos de proteção e segurança em série com o circuito de alta tensão.

O primeiro dispositivo de proteção é o fusível, que faz a proteção elétrica da fonte de alta tensão. Sua função é abrir o circuito e desligar o forno em caso de curto-circuito em algum de seus componentes (transformador, capacitor, diodo ou magnétron). O segundo dispositivo apresentado é o termostato, uma espécie de sensor de temperatura, formado por duas lâminas de materiais diferentes, que, ao esquentar, se dilatam, fazendo com que o contato elétrico normalmente fechado (NF), que se encontra em série com o circuito, se abra, até que a temperatura volte às condições normais novamente. Geralmente são encontrados dois termostatos nos fornos micro-ondas domésticos. Um faz a proteção térmica do magnétron, caso este esteja funcionando de modo inadequado ou, por ventura, ocorra algum problema em seu ventilador de resfriamento. O outro termostato faz a proteção contra temperaturas excessivas dentro do forno, o que poderia comprometer o equipamento e a segurança dos usuários. Por fim, o terceiro dispositivo apresentado na Figura 2.17 é uma chave de segurança, normalmente fechada, que abre seu contato elétrico juntamente com a abertura da porta do forno. A principal função destas chaves é evitar que o forno emita micro-ondas com

a porta aberta, o que poderia causar queimaduras em seus usuários, caso sofressem a radiação dessas ondas eletromagnéticas.

## **2.4 Considerações finais**

Este capítulo apresentou, inicialmente, aspectos relevantes ao entendimento dos conceitos envolvendo micro-ondas, o princípio de transformação da energia eletromagnética em calor e suas principais aplicações em fornos domésticos e industriais.

Na sequência, são apresentadas suas partes constituintes e seu princípio de funcionamento. A seção sobre estrutura física apresenta os principais componentes de um forno micro-ondas doméstico e a interação das ondas eletromagnéticas dentro da sua cavidade de cozimento. A seção seguinte apresenta o circuito elétrico principal do forno micro-ondas, destacando os componentes de sua fonte de alta tensão, seu circuito equivalente e a avaliação do seu princípio de funcionamento. Por fim, conceitos relacionados à sua unidade de controle e componentes de proteção e segurança são apresentados.

De posse dessas informações, os próximos passos da pesquisa estão direcionados ao estabelecimento da modelagem matemática de um forno micro-ondas doméstico e a sua implementação computacional para a avaliação de desempenho diante de distúrbios da qualidade de energia elétrica.

## CAPÍTULO III

---

# Modelagem matemática e computacional de um forno micro-ondas doméstico

### 3.1 Considerações iniciais

No capítulo anterior, foram apresentados os principais conceitos teóricos sobre fornos micro-ondas domésticos, abordando sobre seus componentes, princípio de funcionamento e a interação das ondas eletromagnéticas com os alimentos dentro da câmara de cozimento. Este capítulo, por sua vez, objetiva apresentar os modelos físicos e matemáticos representativos de um forno micro-ondas, assim como sua implementação computacional no programa ATP (*Alternative Transients Program*).

Inicialmente, são identificados e apresentados os principais componentes do circuito elétrico do forno micro-ondas em estudo, assim como suas características e especificações técnicas, a fim de se obter um modelo elétrico representativo. A estratégia de modelagem adotada consiste na representação de cada um dos componentes do circuito principal de alta tensão, para, posteriormente, serem conectados de forma a representar o forno micro-ondas como um todo. Dessa forma, a modelagem é apresentada neste documento, por meio de subseções que contemplam os seguintes tópicos: transformador de alta tensão, circuito dobrador de tensão e válvula magnétron. Por fim, o modelo do forno micro-ondas doméstico é implementado na plataforma ATP.

Destaca-se, ainda, que este trabalho tem o objetivo de avaliar, por meio de simulações computacionais, o comportamento do modelo frente aos distúrbios que podem ocorrer na rede elétrica de suprimento. Por questões de facilidade para o leitor, os resultados das simulações computacionais do modelo desenvolvido neste capítulo são apresentados no capítulo 4, podendo ser comparados diretamente com os resultados oriundos dos ensaios laboratoriais, de forma a promover sua validação.

As principais contribuições deste capítulo estão relacionadas com a implementação computacional, no domínio do tempo, de um forno micro-ondas doméstico, contemplando tanto seus aspectos de entrada quanto suas características internas.

### 3.2 Identificação dos principais componentes do forno micro-ondas em estudo

Muito embora existam inúmeros fabricantes de fornos micro-ondas domésticos, praticamente todos equipamentos são constituídos, basicamente, pelos mesmos componentes principais, apresentando, portanto, características bem semelhantes.

O equipamento utilizado neste trabalho consiste em um forno micro-ondas com um magnétron de frequência de 2,45 GHz, potência de 900 W, cuja fonte de alta tensão é alimentada em 220 V em 60 Hz. O forno utilizado encontra-se ilustrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Forno micro-ondas utilizado.

Dentre os componentes elétricos do forno micro-ondas, o foco deste trabalho está na fonte de alimentação de alta tensão, responsável por alimentar o magnétron com aproximadamente 4000 Vcc. A Figura 3.2 mostra o forno micro-ondas sem seu gabinete de proteção, evidenciando os componentes do circuito de alta tensão do equipamento, que são: o transformador de alta tensão, o capacitor, o diodo e o magnétron.

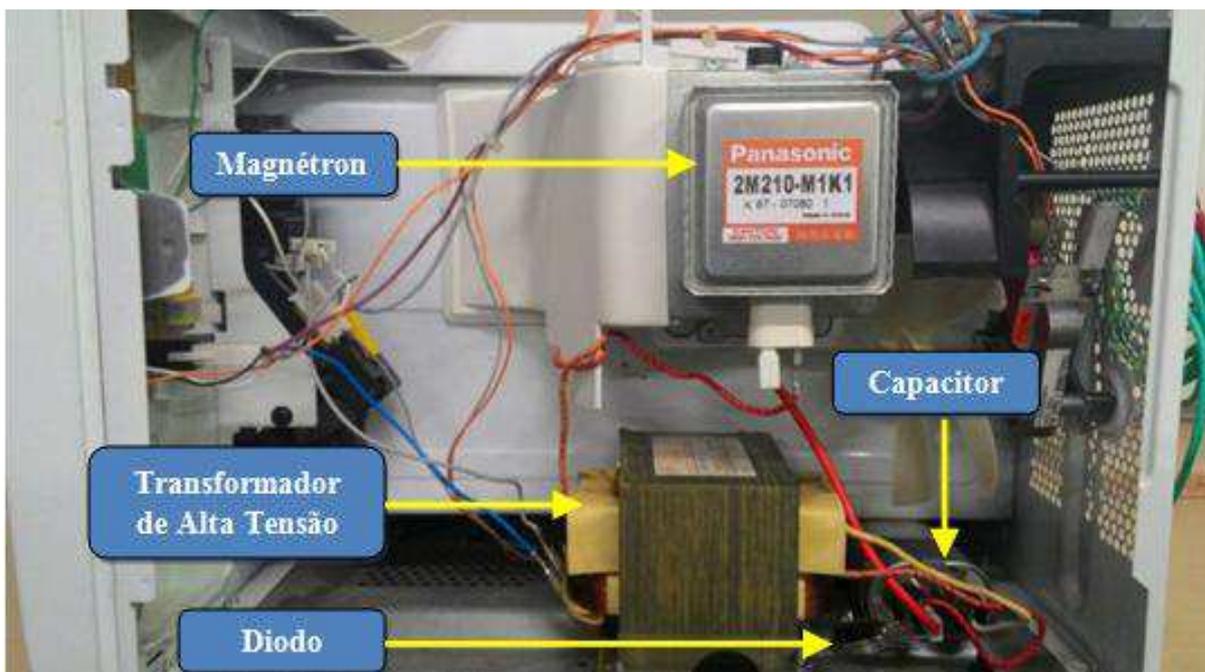


Figura 3.2 - Componentes do circuito de alta tensão.

Adicionalmente, a Tabela 3.1 fornece as principais características do forno micro-ondas utilizado neste trabalho.

Tabela 3.1 - Características técnicas do forno micro-ondas utilizado.

Forno micro-ondas	
Marca	Panasonic
Modelo	NN-S66BK
Potência de saída (magnétron)	900 W
Frequência de operação das micro-ondas	2,45 GHz
Tensão nominal	220 V
Frequência de alimentação	60 Hz
Consumo	1450 W
Capacitor	0,85 $\mu$ F

### **3.3 Estratégia para a modelagem do forno micro-ondas**

Para obter o modelo computacional representativo do forno micro-ondas, primeiramente, são analisadas as particularidades de cada um de seus componentes separadamente. Dessa forma, as seções seguintes são divididas em desenvolvimentos sobre o transformador de alta tensão, o circuito de dobrador de tensão e a válvula magnétron, na devida ordem. De forma geral, as seções abordam sobre os conceitos físicos envolvidos no funcionamento dos componentes e sua representação matemática. Por fim, as características técnicas específicas de cada componente e a implementação computacional do forno micro-ondas no programa ATP são apresentadas na última seção.

#### **3.3.1 Modelagem do transformador de alta tensão**

Conforme já discutido neste trabalho, o transformador de alta tensão do forno micro-ondas apresenta algumas particularidades que o difere de um transformador convencional. Este transformador apresenta uma derivação em seu núcleo, composta por lâminas de material magnético empilhadas e localizadas entre os enrolamentos. Sua função é desviar o fluxo que circula entre o enrolamento primário e secundário protegendo o magnétron contra eventuais variações de tensão. A modelagem utilizada para representar o transformador de alta tensão do forno micro-ondas se apoia na metodologia apresentada em [18], [19] e [22]. A Figura 3.3 ilustra a estrutura do transformador, utilizada para o desenvolvimento do modelo.

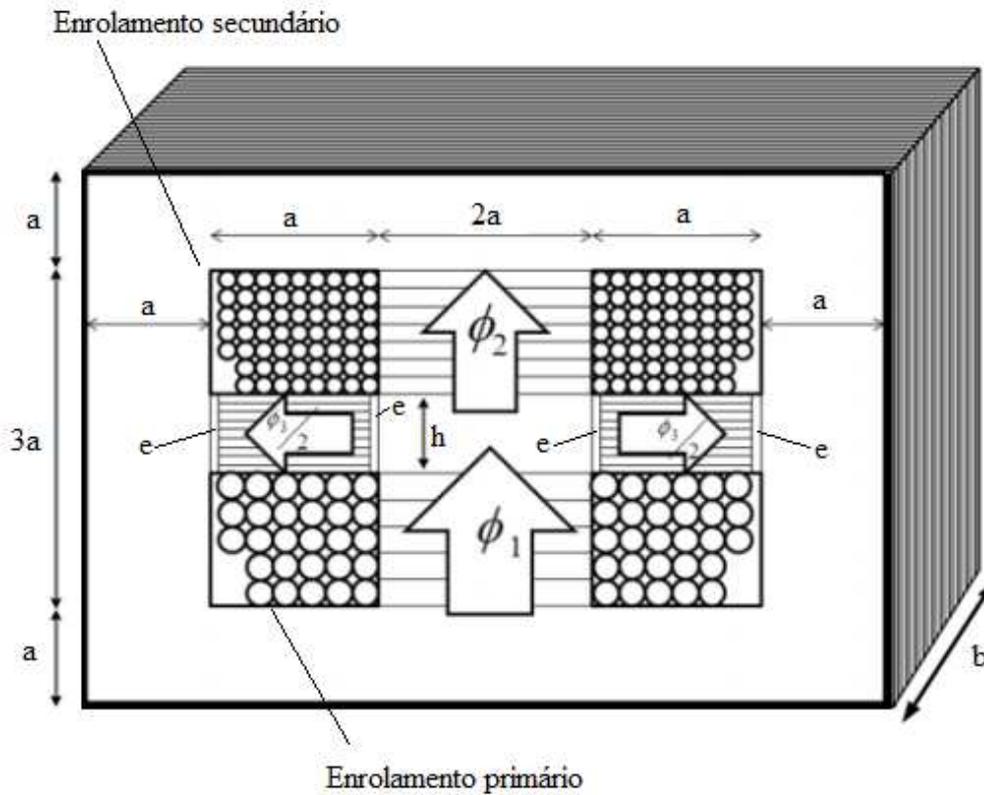


Figura 3.3 - Estrutura do transformador de alta tensão do forno micro-ondas [18].

Onde:

a - comprimento de trechos do circuito magnético;

b - espessura do núcleo magnético do transformador;

h - altura das placas empilhadas que constituem a derivação magnética;

e - comprimento do entreferro de ar;

$\phi_1$  - fluxo magnético do núcleo no trecho respectivo ao primário;

$\phi_2$  - fluxo magnético do núcleo no trecho respectivo ao secundário;

$\phi_3$  - fluxo magnético do núcleo no trecho respectivo à derivação magnética.

Analisando a estrutura do transformador, percebe-se que sua geometria é simétrica. Suas dimensões foram aqui representadas em função do comprimento do circuito magnético (a), espessura do núcleo magnético (b), altura do trecho da derivação magnética (h) e comprimento do entreferro de ar (e). Na sequência serão apresentadas as equações que definem o circuito elétrico e magnético do transformador de alta tensão do forno micro-ondas, de forma a obter seu circuito elétrico equivalente.

*A. Equações do circuito elétrico do transformador*

Para o desenvolvimento da modelagem do transformador de alta tensão do forno micro-ondas, suas perdas magnéticas por histerese e correntes parasitas serão desprezadas, levando em consideração apenas a saturação de seu núcleo magnético. As equações que representam a operação do transformador, baseadas na lei de Faraday, são apresentadas a seguir:

$$u_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (3.1)$$

$$u_2 = n_2 \frac{d\phi_2}{dt} - r_2 i_2 \quad (3.2)$$

Onde:

$u_1$  - tensão no enrolamento primário;

$u_2$  - tensão no enrolamento secundário;

$r_1$  - resistência do enrolamento primário;

$r_2$  - resistência do enrolamento secundário;

$i_1$  - corrente no enrolamento primário;

$i_2$  - corrente no enrolamento secundário;

$n_1$  - número de espiras do enrolamento primário;

$n_2$  - número de espiras do enrolamento secundário;

$\phi_1$  - fluxo magnético respectivo ao enrolamento primário;

$\phi_2$  - fluxo magnético respectivo ao enrolamento secundário.

*B. Equações do circuito magnético do transformador*

As equações do circuito magnético são baseadas na lei de Hopkinson, aplicadas aos contornos apresentados na Figura 3.4. Destaca-se que os fluxos magnéticos divididos por dois estão relacionados ao núcleo simétrico do transformador.

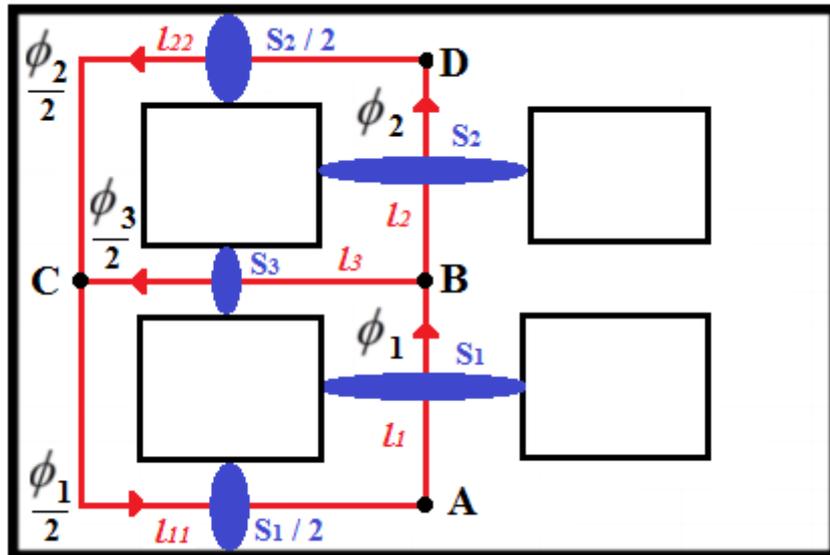


Figura 3.4 - Definição dos trechos do circuito magnético para a modelagem do transformador.

Dessa forma, a modelagem do transformador de alta tensão do forno micro-ondas pode ser caracterizada pelas seguintes equações:

- Para o contorno ABCA

$$R_1\phi_1 + R_3 \frac{\phi_3}{2} + R_{11} \frac{\phi_1}{2} = n_1 i_1 \quad (3.3)$$

- Para o contorno BDCB

$$R_2\phi_2 + R_{22} \frac{\phi_2}{2} - R_3 \frac{\phi_3}{2} = -n_2 i_2 \quad (3.4)$$

- Para o contorno ABDCA

$$R_1\phi_1 + R_2\phi_2 + R_{22} \frac{\phi_2}{2} + R_{11} \frac{\phi_1}{2} = n_1 i_1 - n_2 i_2 \quad (3.5)$$

Em que:

- $R_1$  - relutância do trecho AB (trecho  $l_1$ );
- $R_2$  - relutância do trecho BD (trecho  $l_2$ );
- $R_3$  - relutância do trecho BC (trecho  $l_3$ );
- $R_{11}$  - relutância do trecho CA (trecho  $l_{11}$ );
- $R_{22}$  - relutância do trecho DC (trecho  $l_{22}$ ).

As equações (3.3), (3.4) e (3.5) são complementadas por meio da relação da lei de conservação do fluxo, conforme equação (3.6).

$$\phi_1 = \phi_2 + \phi_3 \quad (3.6)$$

*C. Definição do circuito equivalente do transformador*

Por definição:

$$R_p = R_1 + \frac{R_{11}}{2} \quad (3.7)$$

$$R_s = R_2 + \frac{R_{22}}{2} \quad (3.8)$$

$$R_{sH} = \frac{R_3}{2} \quad (3.9)$$

Onde:

$R_p$  - relutância do contorno do enrolamento primário;

$R_s$  - relutância do contorno do enrolamento secundário;

$R_{sH}$  - relutância da derivação magnética.

Obtendo, então, as seguintes equações:

$$u_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\phi_1}{dt} \quad (3.10)$$

$$u_2 = n_2 \frac{d\phi_2}{dt} - r_2 i_2 \quad (3.11)$$

$$R_p \phi_1 + R_s \phi_2 = n_1 i_1 - n_2 i_2 \quad (3.12)$$

$$R_p \phi_1 + R_{sH} \phi_3 = n_1 i_1 \quad (3.13)$$

$$R_s \phi_2 - R_{sH} \phi_3 = -n_2 i_2 \quad (3.14)$$

Transformado as equações de (3.10) a (3.14), obtém-se as seguintes equações, de (3.15) a (3.19), que representam o transformador, com suas grandezas referidas ao circuito secundário.

$$u'_1 = r'_1 i'_1 + \frac{d}{dt}(L'_p i'_p) \quad (3.15)$$

$$u_2 = \frac{d}{dt}(L_S i_S) - r_2 i_2 \quad (3.16)$$

$$n_1 \frac{d\phi_1}{dt} = \frac{d}{dt}(L_S i_S) + \frac{d}{dt}(L'_{sH} i'_{sH}) \quad (3.17)$$

$$i'_1 = i'_p + i'_{sH} \quad (3.18)$$

$$i'_{sH} = i_2 + i_S \quad (3.19)$$

Em que:

$u'_1$  - tensão no enrolamento primário referida ao secundário;

$r'_1$  - resistência do enrolamento primário referida ao secundário;

$i'_1$  - corrente do enrolamento primário referida ao secundário;

$L'_p$  - indutância do enrolamento primário referida ao secundário;

$i'_p$  - corrente que circula na indutância  $L'_p$ ;

$L_S$  - indutância do enrolamento secundário;

$i_S$  - corrente que circula na indutância  $L_S$ ;

$L'_{sH}$  - indutância da derivação magnética referida ao secundário;

$i'_{sH}$  - corrente que circula na indutância  $L'_{sH}$ .

A Figura 3.5 ilustra a representação do circuito equivalente do transformador, denominado de modelo  $\pi$ , baseado nas equações anteriormente apresentadas.

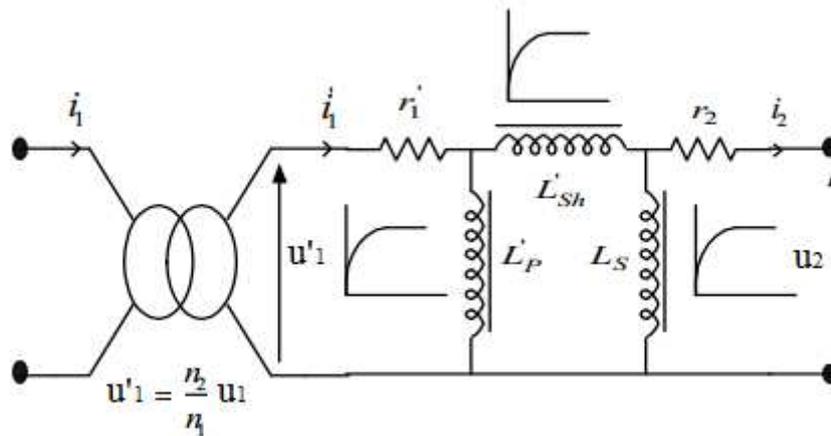


Figura 3.5 - Modelo  $\pi$  equivalente do transformador de alta tensão [18].

Baseado na geometria e dimensões apresentadas na Figura 3.3, no início dessa seção, as indutâncias do primário e do secundário podem ser obtidas por meio das equações (3.20) e (3.21).

$$L'_p = \frac{n_2^2}{R_p} = \frac{n_2^2}{\frac{6,5a}{\mu_1 S_1}} \quad (3.20)$$

$$L_s = \frac{n_2^2}{R_s} = \frac{n_2^2}{\frac{6,5a}{\mu_2 S_2}} \quad (3.21)$$

Onde:

$\mu_1$  - permeabilidade magnética do primário;

$\mu_2$  - permeabilidade magnética do secundário;

$S_1$  - área da seção transversal do primário;

$S_2$  - área da seção transversal do secundário.

Percebe-se, por meio das equações anteriores, que o valor da indutância do secundário e da indutância do primário referida ao secundário serão iguais, pois o núcleo do transformador é simétrico e suas permeabilidades magnéticas e seções transversais também são as mesmas.

Ainda com base na Figura 3.3, observa-se que a derivação magnética do transformador de alta tensão do forno micro-ondas é composta por placas de material magnético empilhadas e por um entreferro (*gap*) de ar. Dessa forma, a indutância da derivação magnética referida ao secundário ( $L'_{sH}$ ) pode ser dividida em duas parcelas: uma que está relacionada à relutância das placas de material magnético ( $R_{sH}^f$ ) e pode ser representada por  $(L'_{sH})^f$ , e outra que está relacionada à relutância do entreferro de ar ( $R_{sH}^e$ ) e pode ser representada por  $(L'_{sH})^e$ . Da mesma maneira adotada para as equações (3.20) e (3.21), as equações (3.22) e (3.23) podem ser definidas.

$$(L'_{sH})^f = \frac{n_2^2}{R_{sH}^f} = \frac{n_2^2}{\frac{l_3 - e_3}{\mu_3 S_3}} \quad (3.22)$$

$$(L'_{sH})^e = \frac{n_2^2}{R_{sH}^e} = \frac{n_2^2}{\frac{e_3}{\mu_0 S_3}} \quad (3.23)$$

Onde:

$\mu_3$  - permeabilidade magnética das placas de material magnético;

$\mu_0$  - permeabilidade magnética do ar;

$S_3$  - área da seção transversal da derivação magnética;

$e_3$  - comprimento do entreferro de ar (2.e).

As indutâncias não lineares podem ser modeladas com base em suas relações "fluxo-corrente" aliadas aos parâmetros geométricos do circuito magnético do transformador. Cada trecho do circuito magnético possui uma seção transversal (S) e um comprimento médio (l), que, ao serem relacionados à sua curva B(H), suas indutâncias não lineares podem ser obtidas de acordo com as seguintes equações:

$$L(i) = \frac{n_2 \phi(i)}{i} \quad (3.24)$$

$$n_2\phi(i) = n_2BS \quad (3.25)$$

$$i = \frac{Hl}{n_2} \quad (3.26)$$

### 3.3.2 Modelagem do circuito dobrador de tensão

Conforme visto no capítulo 2, o magnétron necessita de uma alta tensão contínua para entrar em funcionamento. Essa tensão é obtida por meio de um circuito dobrador de tensão de meia onda, que, além de retificar a corrente alternada proveniente do transformador de alta tensão, a eleva de um valor próximo a 2000 V para aproximadamente 4000 Vcc. O circuito dobrador de tensão do forno micro-ondas é composto por um capacitor e um diodo, ambos de alta tensão, e pode ser modelado conforme a Figura 3.6.

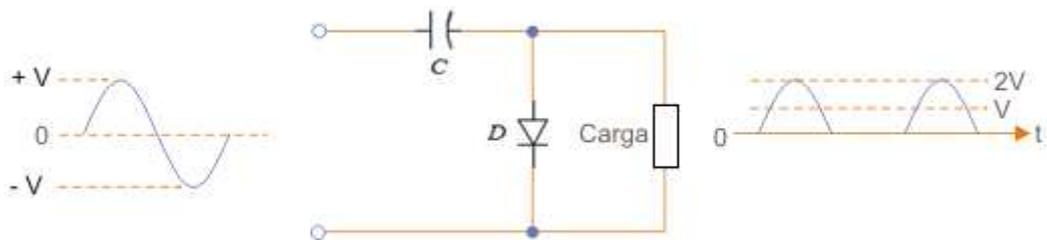


Figura 3.6 - Modelo do circuito dobrador de tensão de meia onda.

Onde:

C - capacitor de alta tensão do circuito dobrador;

D - diodo de alta tensão do circuito dobrador.

Nos semiciclos em que o diodo está diretamente polarizado, o capacitor é carregado com a tensão disponível no secundário do transformador. Nos semiciclos em que o diodo está inversamente polarizado, a tensão armazenada no capacitor é praticamente somada à tensão do secundário do transformador, fornecendo, então, uma tensão dobrada à carga conectada. Esse tipo de circuito é utilizado em fornos micro-ondas domésticos devido a sua simplicidade e seu baixo custo de implementação.

### 3.3.3 Modelagem da válvula magnétron

Por fim, tem-se a modelagem da válvula magnétron, responsável pela emissão das micro-ondas eletromagnéticas que proporcionam o aquecimento dos alimentos dentro do forno. O magnétron é um componente não linear e suas características elétricas típicas, bem como seu circuito equivalente, podem ser representados pela Figura 3.7. Sua característica tensão - corrente ( $V-I$ ) pode ser dividida em duas regiões: oscilação e não oscilação. A região de não oscilação representa o período em que o filamento do magnétron ( $R_f$ ) está sendo aquecido, antes da emissão das micro-ondas. Essa região é modelada por um resistor de alto valor ôhmico ( $R_h$ ) devido à baixa variação de corrente ( $I_{AK}$ ) para uma alta variação de tensão ( $V_{AK}$ ). A região de oscilação representa o período em que o magnétron está emitindo as micro-ondas e é modelada por uma fonte de corrente contínua em série com um diodo e uma pequena resistência ( $R_d$ ) [37].

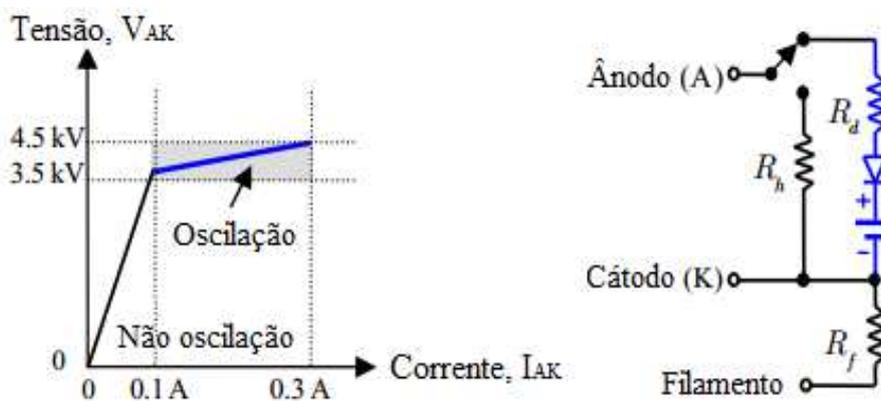


Figura 3.7 - Curva  $V-I$  e modelo representativo do magnétron [37].

Devido aos objetivos deste trabalho, o modelo do magnétron implementado contempla apenas a região de oscilação, por ser a região que representa a operação do forno micro-ondas em regime permanente. Adicionalmente, pode-se perceber que o modelo representativo da região de oscilação da válvula magnétron é semelhante ao circuito equivalente de um diodo Zener.

### 3.4 Implementação computacional do forno micro-ondas doméstico

A plataforma computacional utilizada para implementação do modelo do forno micro-ondas doméstico é o ATP (*Alternative Transients Program*). Esse é um dos programas mais utilizados para simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética, tendo grande aceitação no setor elétrico para análise de sistemas no domínio do tempo. Por meio dessa ferramenta é possível modelar adequadamente diversos componentes e equipamentos de um sistema elétrico, além de permitir a obtenção de gráficos que auxiliam na análise e interpretação dos resultados.

Uma vez obtidos os modelos físicos e matemáticos dos componentes do circuito principal do forno micro-ondas, esta seção tem por objetivo apresentar os procedimentos adotados para sua inserção no programa ATP. Dessa forma, para cada componente a ser implementado, serão apresentadas, anteriormente, suas características técnicas específicas.

#### 3.4.1 Implementação do modelo do transformador de alta tensão no ATP

O transformador de alta tensão do forno micro-ondas em estudo é identificado por meio da Figura 3.8.

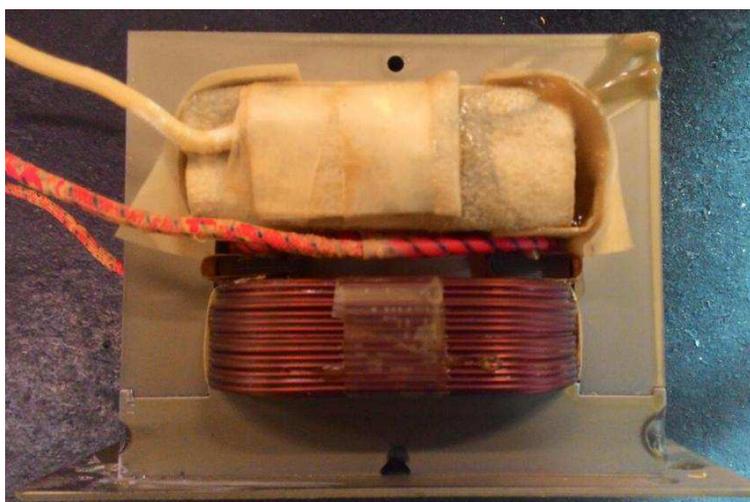


Figura 3.8 - Transformador de alta tensão do forno micro-ondas.

Para obter o seu modelo representativo, primeiramente, foram identificadas suas características físicas, que são apresentadas por meio da Tabela 3.2. Destaca-se que suas dimensões são estabelecidas com base na estrutura apresentada na Figura 3.3.

**Tabela 3.2 - Características do transformador de alta tensão do forno micro-ondas utilizado.**

<b>Transformador de alta tensão</b>	
Número de espiras do primário ( $n_1$ )	224
Número de espiras do secundário ( $n_2$ )	2400
Comprimento do trecho "a" do circuito magnético	15 mm
Comprimento do trecho "b" do circuito magnético	68 mm
Seção transversal do circuito magnético do primário ( $2a \cdot b$ )	2040 mm <sup>2</sup>
Comprimento do circuito magnético do primário ( $2a + 4,5a$ )	97,5 mm
Seção transversal do circuito magnético do secundário ( $2a \cdot b$ )	2040 mm <sup>2</sup>
Comprimento do circuito magnético do secundário ( $2a + 4,5a$ )	97,5 mm
Número de placas empilhadas na derivação magnética	8
Altura do montante de placas empilhadas (h)	4 mm
Seção transversal do circuito da derivação magnética ( $h \cdot b$ )	272 mm <sup>2</sup>
Comprimento do entreferro de ar (e)	0,75 mm
Comprimento do circuito da derivação magnética ( $2,5a - 2e$ )	36 mm

Conforme visto na Figura 3.5 o circuito  $\pi$  equivalente do transformador de alta tensão é representado por três indutâncias não lineares. O programa ATP já possui em sua biblioteca, indutâncias não lineares a serem parametrizadas de acordo com as características específicas necessárias. Essa parametrização pode ser feita por meio da curva de saturação da indutância, apresentada no ATP em função da corrente e do fluxo, conforme observa-se na Figura 3.9.

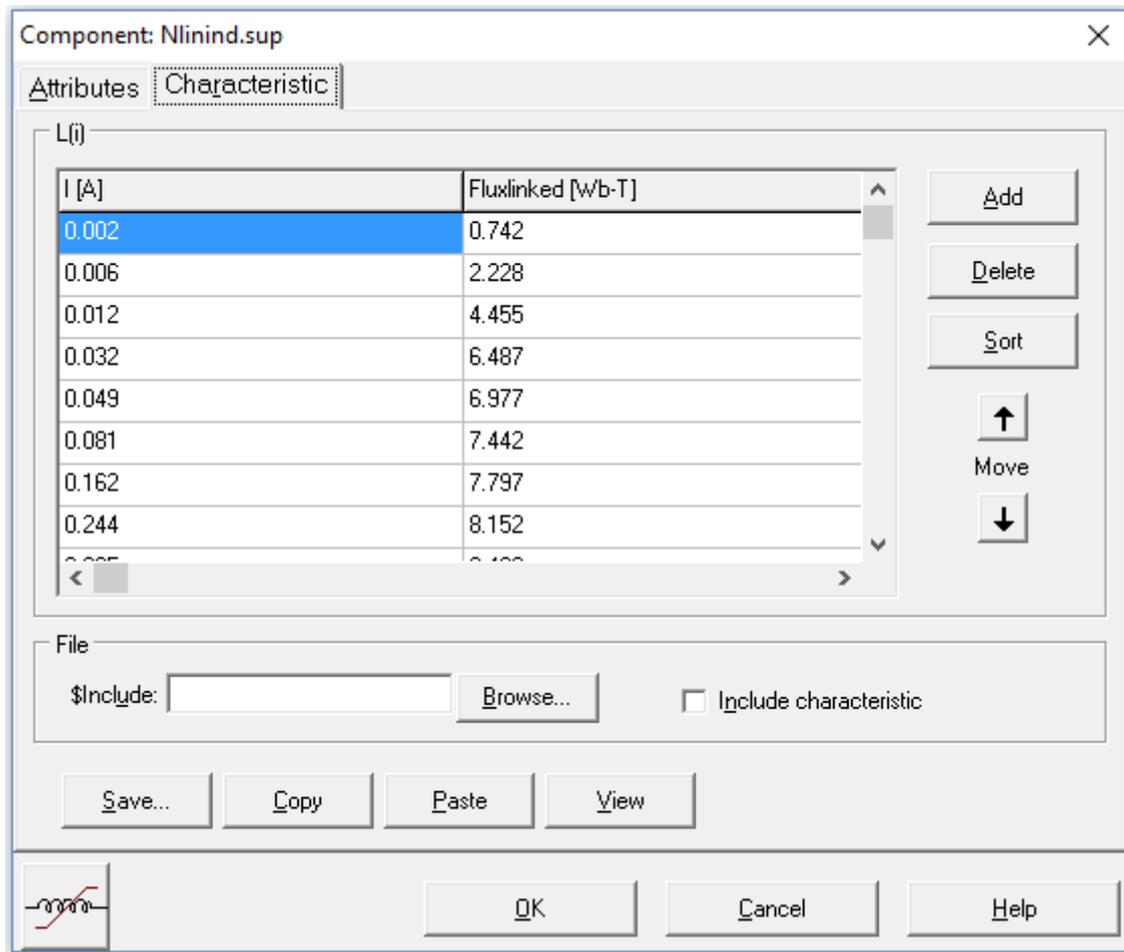


Figura 3.9 - Janela de parametrização das indutâncias não lineares no ATP.

De posse das informações de como a indutância não linear é inserida no programa ATP, seus valores de corrente e fluxo podem ser obtidos com base nas equações (3.25) e (3.26) e em suas características técnicas, como as dimensões da estrutura geométrica do transformador e sua curva  $B(H)$ . Para tanto, a curva de magnetização do material do núcleo do transformador de alta tensão é apresentada na Figura 3.10.

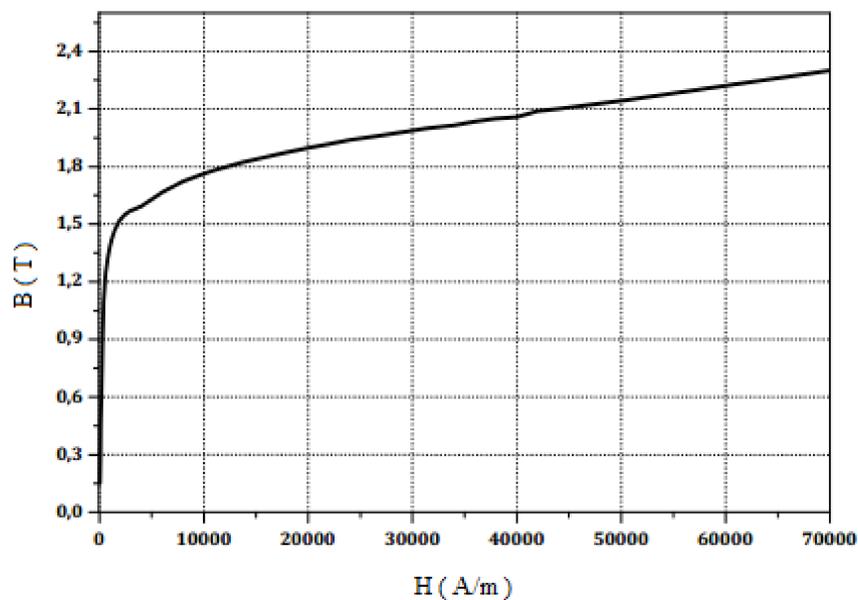


Figura 3.10 - Curva B (H) do material do núcleo do transformador (SF19) [22].

Dessa maneira, cada indutância não linear foi implementada, computacionalmente, por meio da inserção de alguns pontos da curva de saturação no programa ATP. A Tabela 3.3 ilustra os dados de saturação calculados e inseridos no modelo, referentes às indutâncias  $L'_p$ ,  $L_S$  e  $(L'_{sH})^f$ .

Tabela 3.3 - Características "fluxo - corrente" das indutâncias do modelo do transformador.

B(T)	H(A/m)	$\phi_1 = \phi_2$	$i1 = i2$	$\phi_3$	$i3$
		$n_2\phi = n_2BS$ (mWb)	$i = (HI)/n_2$ (A)	$n_2\phi = n_2BS$ (mWb)	$i = (HI)/n_2$ (A)
0,152	50	0,742	0,002	0,099	0,001
0,455	150	2,228	0,006	0,297	0,002
0,910	300	4,455	0,012	0,594	0,005
1,325	800	6,487	0,032	0,865	0,012
1,425	1200	6,977	0,049	0,930	0,018
1,520	2000	7,442	0,081	0,992	0,030
1,593	4000	7,797	0,162	1,040	0,060
1,665	6000	8,152	0,244	1,087	0,090

1,723	8000	8,433	0,325	1,124	0,120
1,825	14000	8,935	0,569	1,191	0,210
1,875	18000	9,180	0,731	1,224	0,270
1,938	24000	9,486	0,975	1,265	0,360
2,015	34000	9,865	1,381	1,315	0,510
2,100	44000	10,282	1,787	1,371	0,660
2,175	54000	10,649	2,194	1,420	0,810
2,250	64000	11,016	2,600	1,469	0,960
2,313	72000	11,322	2,925	1,510	1,080

A indutância  $(L'_{sH})^e$ , que representa a parcela referente ao entreferro de ar, pode ser calculada conforme equação (3.23) e sua solução é demonstrada por meio das equações seguintes:

$$(L'_{sH})^e = \frac{n_2^2}{R_{sH}^e} = \frac{n_2^2}{\frac{e_3}{\mu_0 S_3}} \quad (3.27)$$

$$(L'_{sH})^e = \frac{2400^2}{\frac{1,5}{\mu_0 \cdot 272}} = 4390mH \quad (3.28)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (3.29)$$

Por fim, os valores de resistência do enrolamento primário e secundário foram obtidos por meio de medições com um ohmímetro, apresentando valores de 2,4  $\Omega$  e 200  $\Omega$ , respectivamente. Como os valores adotados no modelo foram todos referidos ao lado secundário do transformador, a resistência do enrolamento primário utilizada no modelo computacional foi de 275  $\Omega$ . A Figura 3.11 apresenta, finalmente, o circuito equivalente do transformador de alta tensão do forno micro-ondas, implementado no programa ATP.

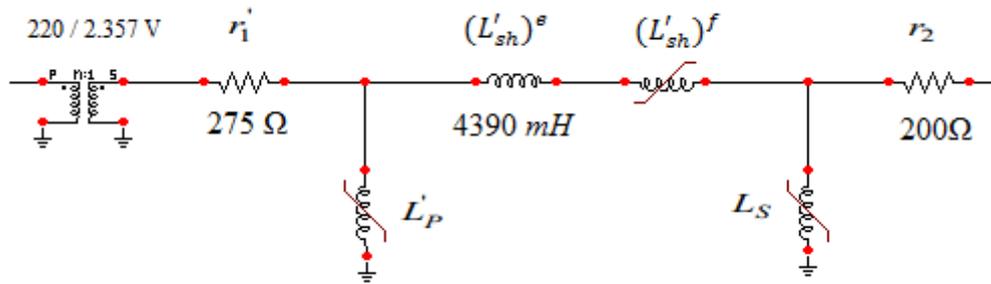


Figura 3.11 - Modelo do transformador implementado no programa ATP.

Como as características de saturação já foram consideradas na modelagem das indutâncias, utilizou-se de um transformador ideal apenas para obter a relação de transformação entre as grandezas do primário e secundário, a fim de proceder as simulações envolvendo a alimentação do forno micro-ondas em 220V.

### 3.4.2 Implementação do modelo do circuito dobrador de tensão no ATP

O capacitor e o diodo de alta tensão do circuito dobrador utilizado no forno micro-ondas em estudo são ilustrados no Figura 3.12 e suas características técnicas são apresentadas na Tabela 3.4.



(a) Capacitor

(b) Diodo

Figura 3.12 - Capacitor e diodo do circuito dobrador de tensão.

Tabela 3.4 - Características do capacitor e diodo de alta tensão.

Capacitor (C)	
Capacitância	0,85 $\mu$ F
Tensão nominal	2100 Vac
Diodo (D)	
Tensão reversa	12 kV
Corrente direta	350 mA

Como o princípio de funcionamento e demais características do circuito dobrador de tensão já foram amplamente explorados nesta dissertação, considera-se dispensável maiores comentários sobre o assunto nesta seção. Assim, a implementação do circuito dobrador de tensão no ATP pode ser vista na Figura 3.13. Ressalta-se, apenas, que os valores de 85 k $\Omega$  e 16  $\Omega$  foram definidos com base em comparações entre resultados de simulações computacionais e ensaios experimentais envolvendo o circuito mencionado.

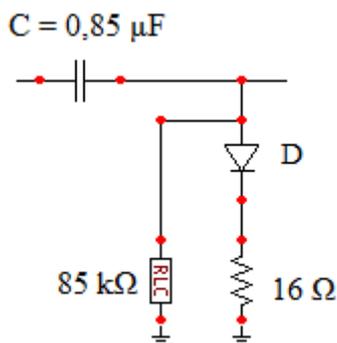


Figura 3.13 - Modelo do circuito dobrador de tensão implementado no programa ATP.

### 3.4.3 Implementação do modelo do magnétron no ATP

Por fim, tem-se a implementação computacional da válvula magnétron do forno micro-ondas. O componente pode ser visto na Figura 3.14 e suas características técnicas são apresentadas na Tabela 3.5.



Figura 3.14 - Válvula magnétron utilizada no forno micro-ondas.

Tabela 3.5 - Características da válvula magnétron.

<b>Magnétron</b>	
Marca	Panasonic
Modelo	2M210-M1K1
Potência de saída	900 W
Frequência de operação das micro-ondas	2,45 GHz
Tensão nominal	4,2 kV
Corrente nominal	330 mA
Tensão de filamento	3,3 V
Corrente de filamento	6 A

Conforme já mencionado durante o desenvolvimento da modelagem matemática do magnétron, o modelo implementado no ATP contempla apenas a região de oscilação, representando sua operação em regime permanente. Mais uma vez, reforça-se que a região de oscilações da válvula magnétron apresenta comportamento semelhante a um diodo Zener, sendo representada pelo mesmo circuito equivalente. Os valores utilizados no modelo do magnétron e implementados no ATP foram -3650 Vcc para a fonte de corrente contínua e 210  $\Omega$  para a resistência ( $R_d$ ) em série com o diodo, conforme se observa na Figura 3.15.

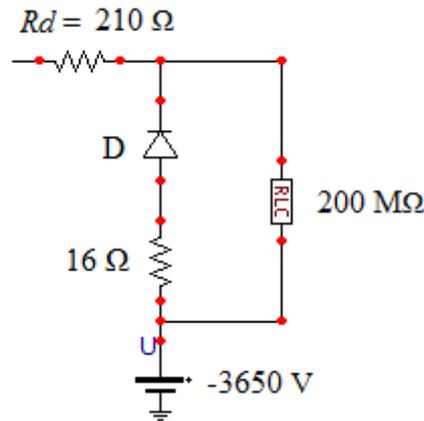


Figura 3.15 - Modelo do magnétron implementado no programa ATP.

### 3.4.4 Implementação computacional do forno micro-ondas no ATP

As sessões anteriores apresentaram as modelagens matemáticas e computacionais, de forma isolada, dos principais componentes da fonte de alta tensão e do magnétron do forno micro-ondas doméstico em estudo. Esta sessão apresenta o modelo do forno micro-ondas para representação do equipamento como um todo, sendo alimentado por uma fonte de alimentação puramente senoidal, conforme apresentado na Figura 3.16. A partir desse modelo obtido, simulações e validações serão feitas no capítulo seguinte, considerando o suprimento do forno em condições ideais e não ideais.

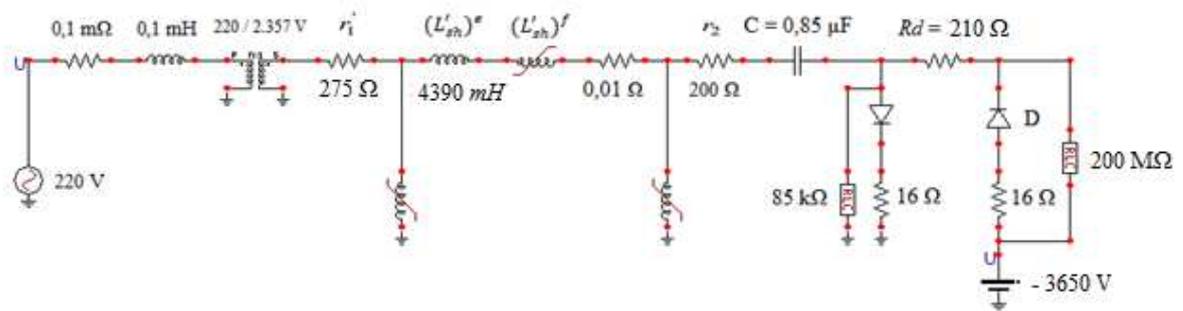


Figura 3.16 - Modelo do forno micro-ondas implementado no programa ATP.

## 3.5 Considerações finais

Este capítulo foi dedicado à modelagem matemática e computacional de um forno micro-ondas doméstico. Com esse foco, o primeiro passo foi a apresentação de

seus principais componentes elétricos, bem como suas características técnicas. A estratégia de modelagem adotada consistiu em analisar as particularidades de cada um de seus componentes separadamente, para, posteriormente, fazer a implementação computacional do forno micro-ondas como um todo. Assim, as seções foram divididas em desenvolvimentos sobre o transformador de alta tensão, o circuito dobrador de tensão, a válvula magnétron, e, por fim, a implementação computacional do forno micro-ondas doméstico no programa ATP.

Por questões de facilidade para o leitor, os resultados das simulações computacionais serão apresentados no próximo capítulo, onde serão comparados diretamente com os resultados oriundos dos ensaios laboratoriais. Portanto, no capítulo 4, serão feitos estudos considerando a alimentação do forno micro-ondas em condições ideais e não ideais, para avaliação de seu desempenho, conforme situações em que o equipamento pode estar sujeito no dia a dia em um sistema elétrico.

## CAPÍTULO IV

---

# Validação do modelo computacional do forno micro-ondas em condições ideais e não ideais de suprimento

### 4.1 Considerações Iniciais

No capítulo anterior, apresentou-se a modelagem matemática de um forno micro-ondas doméstico, assim como sua implementação computacional no programa ATP (*Alternative Transients Program*). Essa representação computacional permite o desenvolvimento de estudos de desempenho de fornos micro-ondas frente a situações em que o equipamento pode estar sujeito em um sistema elétrico. Dessa forma, este capítulo tem por objetivo conhecer o comportamento individual de um forno micro-ondas doméstico sob condições ideais e não ideais de suprimento.

A metodologia para validação da modelagem está fundamentada na comparação dos resultados das simulações computacionais com aqueles oriundos dos ensaios experimentais, sendo analisadas suas grandezas elétricas obtidas, tanto na entrada do equipamento quanto internamente, ou seja, na sua fonte de alta tensão. As diversas condições analisadas estão relacionadas à imposição de tensão na entrada do equipamento, contemplando situações com tensão senoidal ideal, além de distúrbios passíveis de ocorrerem em um sistema elétrico, tais como: afundamentos e elevações de tensão de curta duração, interrupções, flutuações e distorções harmônicas.

## 4.2 Estrutura para a realização dos ensaios experimentais

Uma vez definida a metodologia para validação, os ensaios experimentais foram implementados em laboratório. Os testes foram realizados em um dos laboratórios de Qualidade de Energia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, localizado no Bloco 5K. A Figura 4.1 mostra um esquema de conexão para representar o arranjo experimental montado no laboratório.

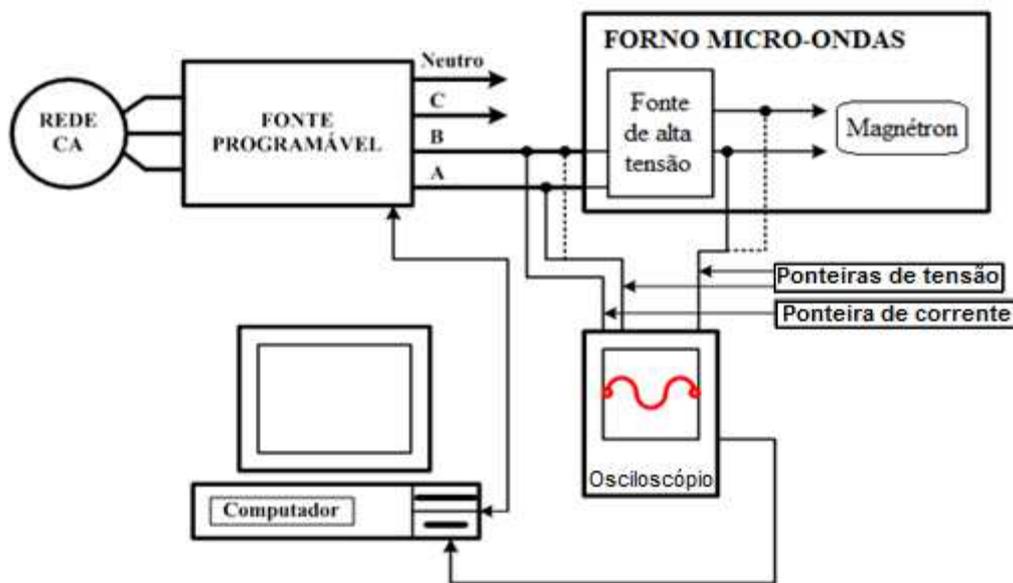
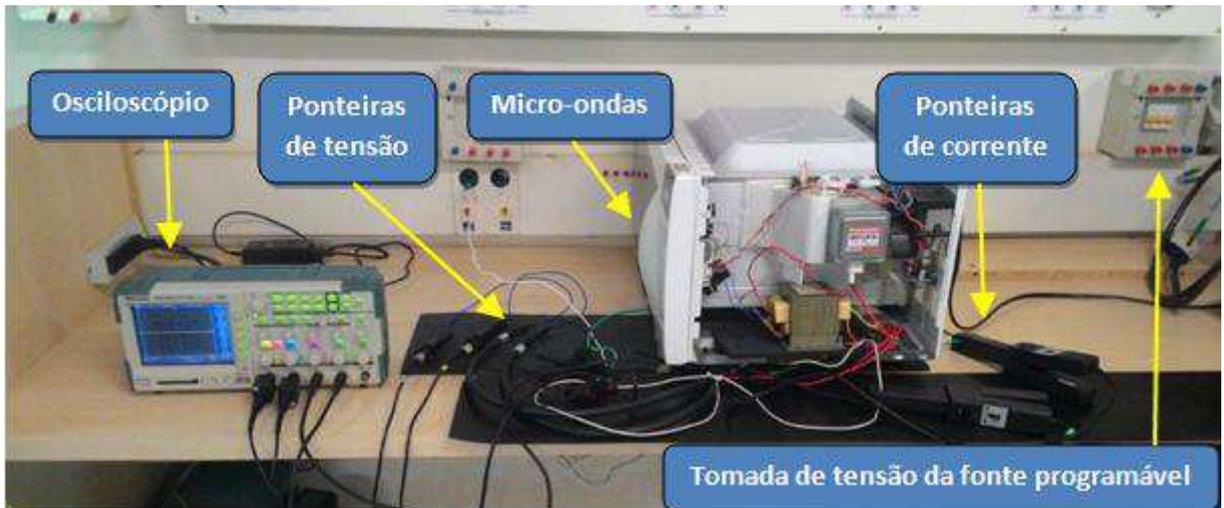


Figura 4.1 - Esquema de conexão para realização dos experimentos.

A alimentação do forno micro-ondas é feita por meio de uma fonte programável, que possibilita representar os mais variados distúrbios que podem ocorrer em um sistema elétrico. Os valores de tensão e corrente são obtidos por meio de um osciloscópio digital, conectado, tanto na entrada do forno micro-ondas quanto internamente, no enrolamento secundário do transformador de alta tensão e na entrada da válvula magnétron. O arranjo laboratorial é ilustrado na Figura 4.2.



(a) Bancada utilizada na montagem laboratorial



(b) Fonte programável controlada por um microcomputador

Figura 4.2 - Estrutura laboratorial para realização dos experimentos.

A seguir, são apresentadas as principais características dos dispositivos utilizados nos ensaios experimentais.

### 4.2.1 Fonte programável

O equipamento utilizado é uma fonte trifásica, HP Series 6800A - "AC Power Source/Analyzers" - modelo HP 6834A, que permite a programação dos sinais de tensão. Esse aparelho combina três diferentes módulos em uma única unidade, conforme apresentado na Figura 4.3.

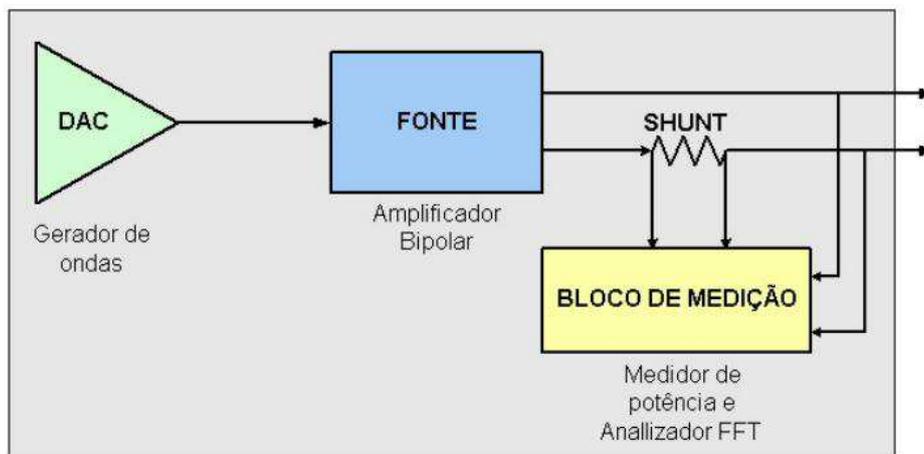


Figura 4.3 - Módulos constituintes da fonte HP 6834A.

Cada um dos três módulos tem as seguintes funções:

- DAC: gerador de funções onde são produzidas as formas de onda de tensão através da programação da amplitude, frequência e forma;
- FONTE: módulo amplificador que eleva o nível do sinal provindo do gerador de funções para as aplicações que demandam potência;
- BLOCO DE MEDIÇÃO: realiza todas as funções de medições, desde uma simples leitura de valores rms de tensão e corrente, até análises sofisticadas da forma de onda.

Dentre os vários recursos presentes na HP 6834A, listam-se abaixo algumas das suas principais características:

- Fonte trifásica de 4500 VA;
- Programação de tensão c.a., frequência, fase e limite de corrente;

- Formas de onda senoidal, quadradas, etc., definidas pelo usuário;
- Controle de taxa de crescimento / decrescimento de frequência e tensão;
- Capacidade de gerar transitórios, VTCD's (variações de tensão de curta duração) e outros distúrbios de rede;
- Ampla capacidade de medição como, por exemplo, valores eficazes e de pico de tensões e corrente, potência ativa, reativa e aparente, entre outras;
- Análise harmônica de tensão e corrente, fornecendo amplitude, ângulo de fase e distorções harmônicas até a 50ª ordem;
- Medições adicionais de potência total e de corrente de neutro no modo trifásico;
- Painel frontal com display fluorescente de 14 caracteres, possibilitando diversas programações;
- Autoteste, indicação de status e software para calibração.

#### **4.2.2 Microcomputador**

O microcomputador tem a função de controlar a fonte programável, objetivando a reprodução de sinais de tensão senoidais e distúrbios relacionados à qualidade de energia elétrica, ambos definidos pelo usuário. Além disso, pode armazenar e processar o tratamento de dados obtidos pelo osciloscópio digital.

#### **4.2.3 Osciloscópio digital**

O osciloscópio utilizado possui quatro canais, tendo, por finalidade, a aquisição dos sinais de tensão e corrente envolvidos no forno micro-ondas sob teste. Suas principais características são listadas a seguir:

- Fabricante: Tektronix;
- Modelo TPS2024;
- Número de canais: 4 (isolados);
- 2500 amostras por canal.

Como os valores de pico das tensões internas ao forno micro-ondas podem chegar a aproximadamente 5000 V, a obtenção das leituras de tensão no enrolamento secundário do transformador de alta tensão e na entrada do magnétron foi feita utilizando-se um divisor resistivo, devido às limitações das ponteiros do osciloscópio. As ponteiros construídas para as medições podem ser observadas na Figura 4.4.



**Figura 4.4 - Ponteiros de alta tensão utilizando divisor resistivo.**

Cada uma das ponteiros foi construída com 40 resistores de 120 k $\Omega$ , totalizando 4,8 M $\Omega$ , sendo que a tensão obtida pelo osciloscópio é relativa à queda de tensão no último resistor de 120 k $\Omega$ . Assim, para cada 1 volt medido no osciloscópio, seu valor real será 40 vezes maior, sendo, portanto, esse, o fator de multiplicação da grandeza medida no divisor resistivo. O diagrama esquemático da montagem do divisor resistivo pode ser observado na Figura 4.5.

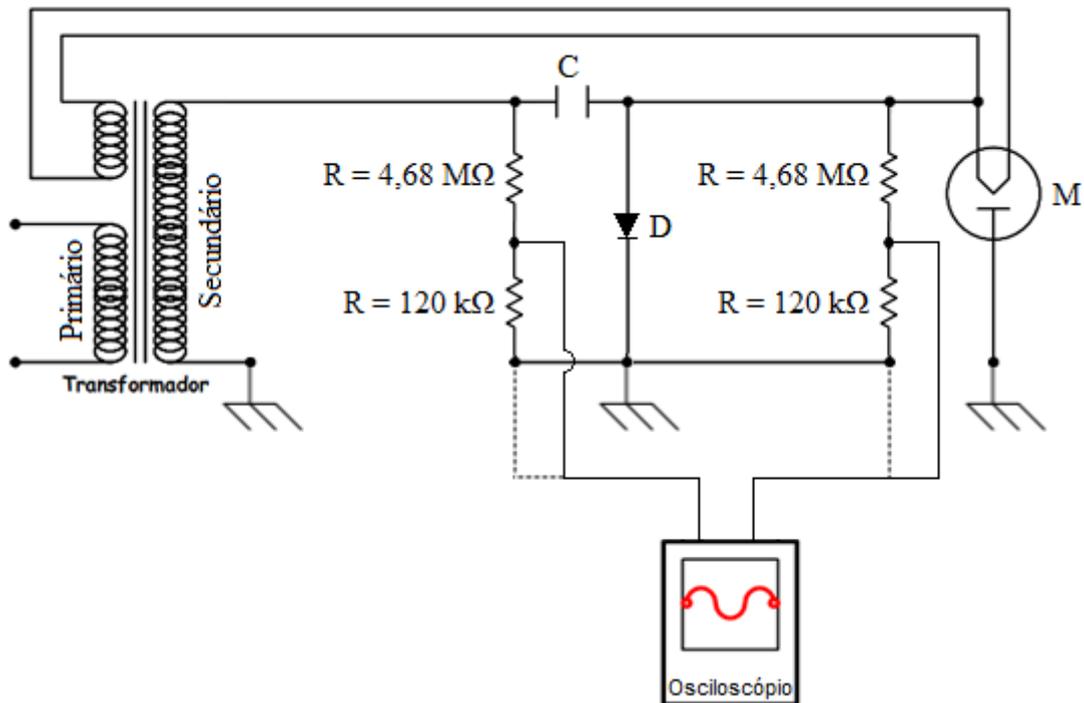


Figura 4.5 - Divisor resistivo para obtenção das tensões na fonte de alta tensão do forno micro-ondas.

Além das medições de tensão feitas no secundário do transformador de alta tensão e na entrada do magnétron, foram obtidas as correntes relacionadas aos mesmos componentes internos ao forno micro-ondas. Um detalhe importante na medição dessas correntes está relacionado ao aterramento desses componentes. O transformador, o diodo e o magnétron possuem o fechamento de seu circuito através do aterramento feito diretamente na carcaça do forno micro-ondas, por meio da própria fixação do componente na estrutura, ao invés da utilização de cabos. Visto que não é possível retirar e isolar o magnétron, devido ao risco de emissão de micro-ondas fora da câmara de cozimento, faz-se necessário isolar o transformador e o diodo da carcaça e fazer ligações através de cabos para permitir um caminho para circulação e, conseqüentemente, medição de suas correntes. Fisicamente, esse isolamento foi feito desparafusando o transformador e o diodo da carcaça e isolando-os com uma placa de borracha, evitando o contato com a carcaça metálica. A Figura 4.6 ilustra essa situação.

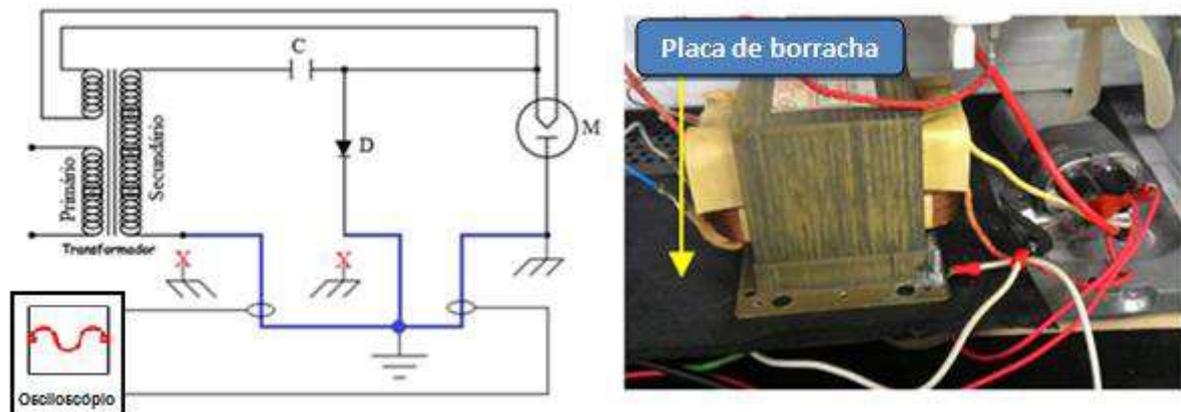


Figura 4.6 - Arranjo para medição de corrente no transformador e magnétron do forno micro-ondas.

### 4.3 Análises de desempenho do forno micro-ondas doméstico

Os estudos selecionados para apresentação e discussão visam atender às análises de desempenho do forno micro-ondas em condições ideais e não ideais de suprimento. O desempenho do equipamento é avaliado em diversas situações operacionais, refletindo a manifestação de perturbações que podem ocorrer em um sistema elétrico, e que comprometem sua qualidade de energia. Os estudos compreendem a obtenção de informações dos ensaios experimentais e sua comparação com simulações computacionais, a fim de correlacionar e validar o modelo desenvolvido.

Os distúrbios da qualidade de energia elétrica considerados neste estudo são: variação de tensão de curta duração (VTCD), interrupção de energia, flutuação de tensão e distorção harmônica de tensão. A Tabela 4.1 consolida os casos estudados, com uma breve descrição das características dos distúrbios aplicados.

Tabela 4.1 - Quadro resumo dos casos analisados.

Caso	Características
1 - Condição ideal	Tensão nominal de 220V, fase-fase, eficaz
2 - Elevação de tensão	Elevação para 110% da tensão nominal Duração do evento: 10 ciclos

Caso	Características
3 - Afundamento de tensão	Tensão nominal de 220V, fase-fase, eficaz Afundamento para 85% da tensão nominal Duração do evento: 10 ciclos
4 - Interrupção de tensão	Tensão nominal de 220V, fase-fase, eficaz Interrupção da tensão Duração do evento: 10 ciclos
5 - Flutuação de tensão	Tensão nominal de 220V, fase-fase, eficaz PST = 5 pu
6 - Distorção harmônica	Tensão nominal de 220V, fase-fase, eficaz DTT (Distorção Harmônica Total de Tensão) = 20%

Para cada situação mencionada, as seguintes grandezas são consideradas para as análises comparativas entre os desempenhos computacional e experimental:

- Tensão de alimentação do equipamento;
- Corrente de entrada do equipamento;
- Tensão no enrolamento secundário do transformador de alta tensão;
- Corrente no enrolamento secundário do transformador de alta tensão;
- Tensão na entrada da válvula magnétron;
- Corrente na entrada da válvula magnétron.

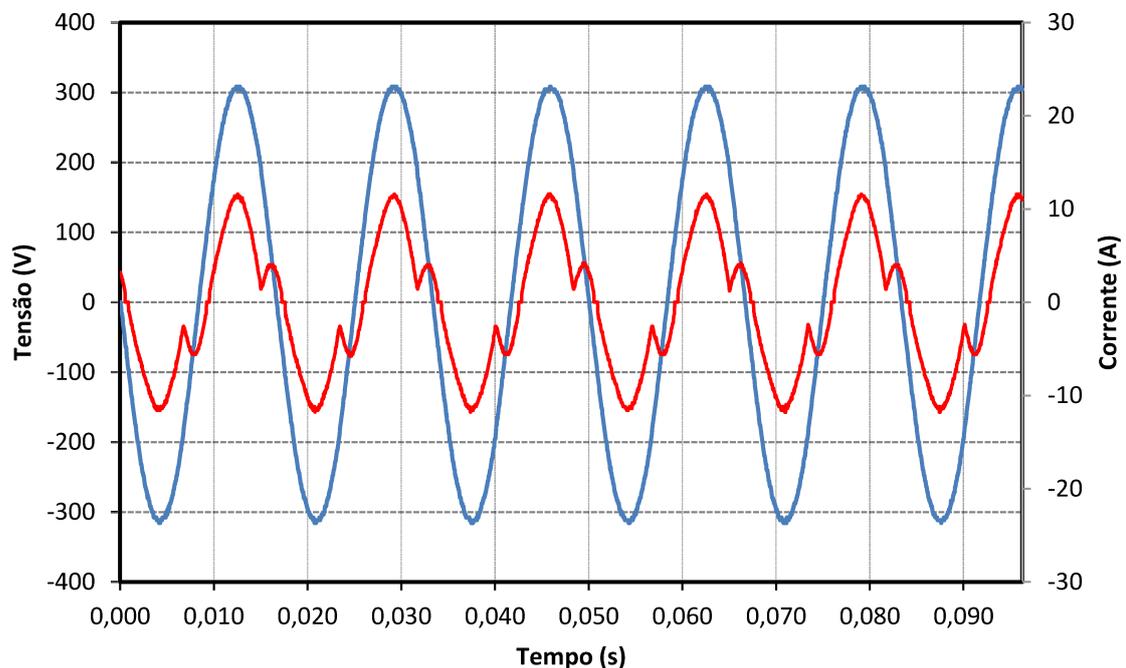
Os resultados experimentais são primeiramente apresentados. A título de comparação, mostram-se, também, os resultados obtidos computacionalmente, tomando-se como base os estudos desenvolvidos no capítulo anterior. Padronizou-se a cor azul para a forma de onda de tensão e a cor vermelha para a forma de onda da corrente.

#### 4.3.1 Caso 1: Suprimento com características ideais

Esta condição operativa tem por objetivo, validar o modelo computacional proposto, uma vez que se aplicam as condições nominais de suprimento para as quais o

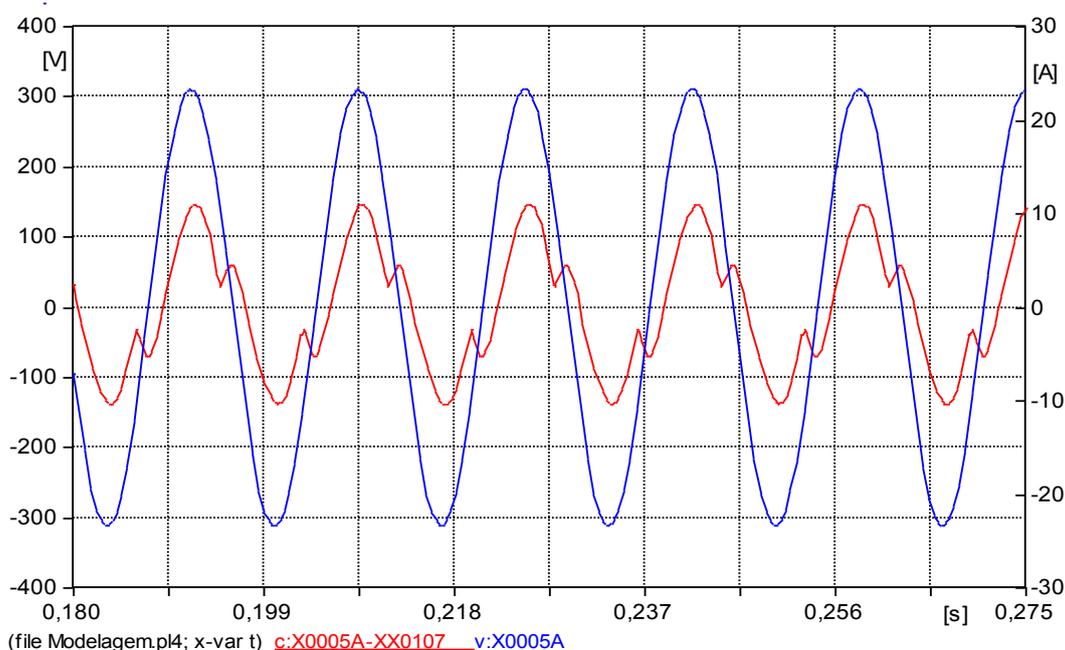
forno micro-ondas foi projetado. Essa validação é realizada por meio da comparação das grandezas elétricas obtidas na entrada e internamente ao forno micro-ondas estudado. Os resultados obtidos, na forma de tensões e correntes, permitem o estabelecimento de uma base de dados para comparação entre o desempenho laboratorial e computacional, permitindo, assim, validar a representação do modelo computacional ao funcionamento real do forno micro-ondas.

Com o auxílio da fonte programável descrita neste trabalho, uma tensão de alimentação, com características muito próximas da ideal, foi aplicada ao forno micro-ondas, com valor eficaz de 220 V, fase-fase, 60 Hz. A Figura 4.7 apresenta as formas de onda da tensão de alimentação e das correntes na entrada do equipamento. Observa-se que, mesmo com uma alimentação senoidal, a forma de onda da corrente de entrada se mostra com um nível de distorção harmônica, ou seja, configurando o forno micro-ondas como uma carga de natureza não linear.



**Figura 4.7 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.  
Caso 1 - Experimental**

Da mesma forma, seguindo as características da tensão de alimentação, a Figura 4.8 mostra as formas de onda obtidas computacionalmente, por meio do simulador ATP.



**Figura 4.8 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. Caso 1 - Computacional**

Desta forma, observa-se que há uma boa semelhança entre as respostas obtidas experimental e computacionalmente. A Tabela 4.2 sintetiza os valores das correntes encontradas na entrada do equipamento, em que podem ser comparados os resultados numéricos extraídos.

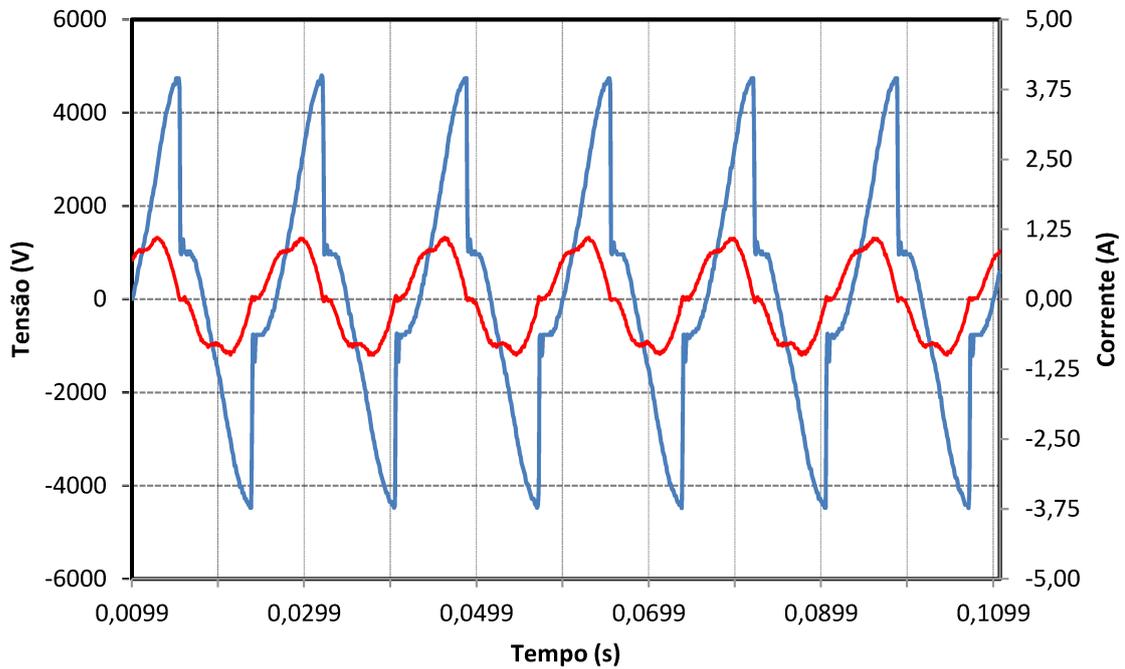
**Tabela 4.2 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as correntes de entrada do forno micro-ondas - Caso 1**

	Experimental	Computacional	Erro
<b>Corrente de pico (A)</b>	11,60	11,02	5,00%
<b>Corrente eficaz (A)</b>	7,04	6,68	5,11%
<b>DHTi (%)</b>	28,20	29,48	4,54%
<b>I<sub>h</sub> fundamental (A)</b>	6,788	6,402	5,69%
<b>I<sub>h</sub> 2<sup>a</sup> (A)</b>	0,269	0,277	2,97%
<b>I<sub>h</sub> 3<sup>a</sup> (A)</b>	1,709	1,690	1,11%

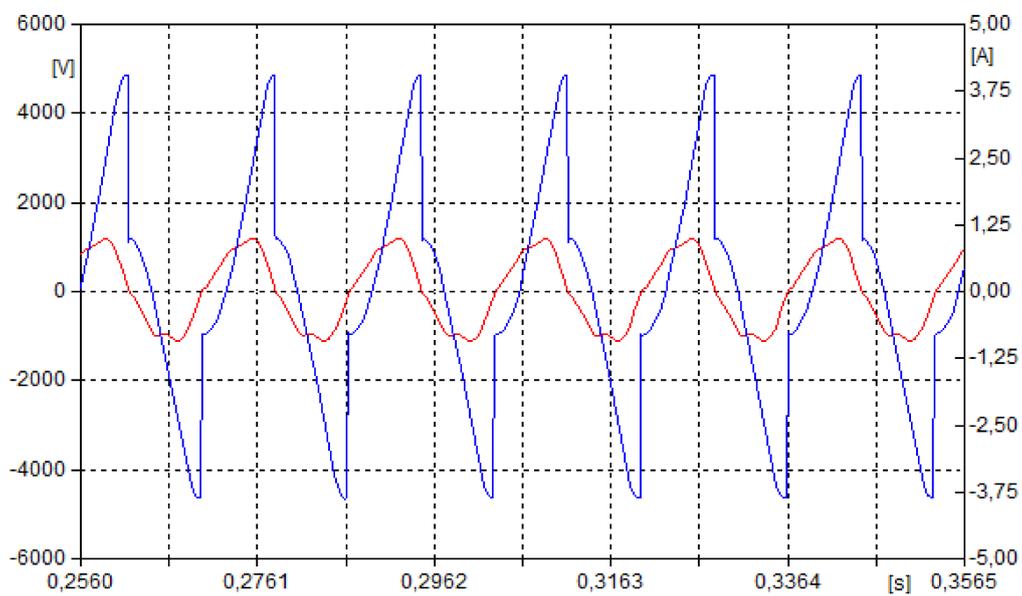
	<b>Experimental</b>	<b>Computacional</b>	<b>Erro</b>
<b>I<sub>h</sub> 5<sup>a</sup> (A)</b>	0,742	0,728	1,89%
<b>I<sub>h</sub> 7<sup>a</sup> (A)</b>	0,297	0,284	4,38%
<b>I<sub>h</sub> 9<sup>a</sup> (A)</b>	0,182	0,139	23,63%

Conforme observado anteriormente, nas formas de onda de corrente, constata-se, por meio da tabela anterior, um considerável conteúdo harmônico inerente ao forno micro-ondas. Observa-se, também, boa correlação entre os resultados numéricos experimentais e computacionais.

Ainda, para a mesma condição anteriormente apresentada, foram obtidas as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas. As formas de onda da tensão e da corrente medidas no enrolamento secundário do transformador de alta tensão podem ser observadas na Figura 4.9, enquanto os resultados computacionais para a mesma situação pode ser vista na Figura 4.10. Ficam evidenciados os elevados valores de tensão encontrados no circuito interno do forno micro-ondas, motivo pelo qual se necessitou da confecção de ponteiras de alta tensão utilizando divisor resistivo para realização das medições. Mais uma vez, percebe-se grande semelhança entre as formas de onda experimentais e computacionais.



**Figura 4.9 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.  
Caso 1 - Experimental**



**Figura 4.10 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.  
Caso 1 - Computacional**

A Tabela 4.3 mostra os valores de pico da tensão e da corrente no secundário do transformador de alta tensão, onde podem ser comparados os resultados numéricos referentes às figuras apresentadas anteriormente.

Tabela 4.3 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no secundário do transformado de alta tensão - Caso 1

	Experimental	Computacional	Erro
Tensão de pico (V)	4800	4870	1,46%
Corrente de pico (A)	1,08	1,00	7,41%

Por fim, as formas de onda da tensão e da corrente medidas na entrada do magnétron são apresentadas na Figura 4.11. Analisando os gráficos, fica evidenciada a característica do circuito dobrador de tensão de meia onda, que, conforme estudado nos capítulos anteriores, dobra a tensão proveniente do transformador para obter a tensão de aproximadamente -4000 Vcc para alimentar a válvula magnétron. Devido à característica de retificação, sua forma de onda de tensão é quadrada e pulsante. Tal fato justifica, também, a considerável presença de correntes harmônicas observadas na entrada do forno micro-ondas.

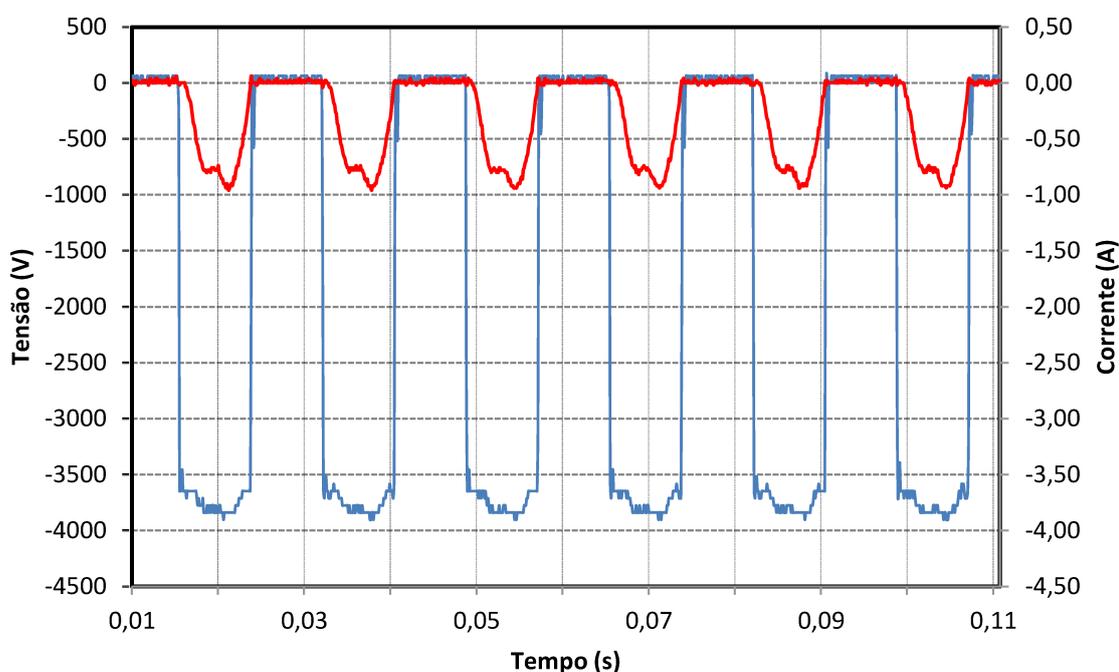
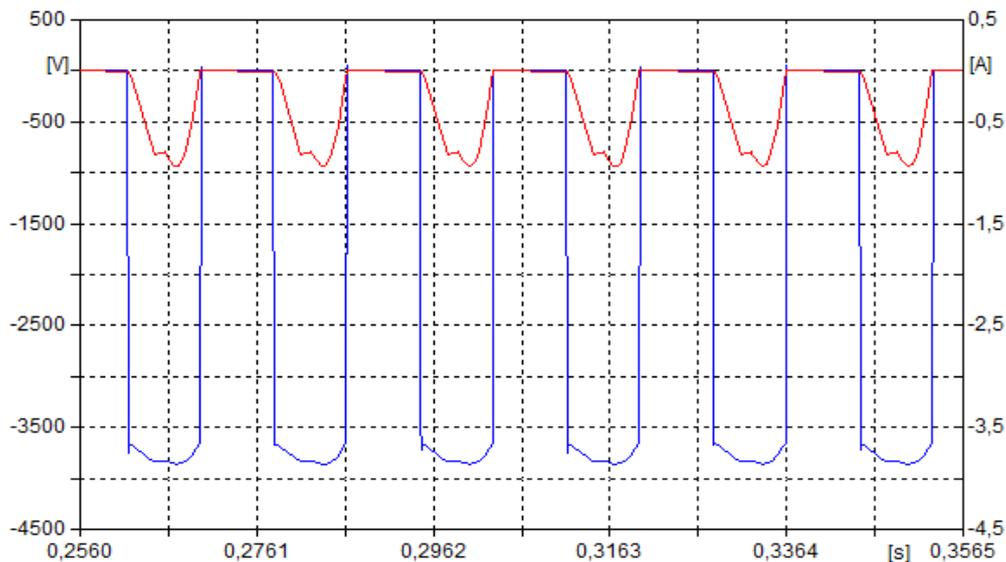


Figura 4.11 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.

**Caso 1 - Experimental**

As formas de onda de tensão e corrente no magnétron, obtidas computacionalmente, apresentam resultados bem próximos dos resultados extraídos dos ensaios experimentais e podem ser vistos na Figura 4.12.



**Figura 4.12 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.**

**Caso 1 - Computacional**

Os resultados numéricos são sintetizados por meio da Tabela 4.4, apontando, mais uma vez, uma boa correlação entre os ensaios experimentais e computacionais.

**Tabela 4.4 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada da válvula magnétron - Caso 1**

	<b>Experimental</b>	<b>Computacional</b>	<b>Erro</b>
<b>Tensão de pico (V)</b>	-3904	-3860	1,13%
<b>Corrente de pico (A)</b>	-0,95	-0,94	1,05%

Diante do exposto, e da consistência entre os desempenhos obtidos em laboratório e nas simulações computacionais, para as condições de suprimento ideais, verifica-se que o modelo computacional implementado na plataforma ATP se mostra adequado aos propósitos deste trabalho. Na sequência, o desempenho do modelo computacional será avaliado em condições não ideais de suprimento, no sentido de

consolidar o modelo do forno micro-ondas diante dos distúrbios da qualidade de energia comuns em um sistema elétrico.

### 4.3.2 Caso 2: Elevação de tensão de curta duração

Este item tem como objetivo verificar o desempenho do forno micro-ondas durante uma elevação momentânea de tensão. As Figuras 4.13 e 4.14 ilustram os oscilogramas experimental e computacional, respectivamente, apresentando o comportamento da corrente de entrada do equipamento frente a uma elevação de tensão para 110% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental.

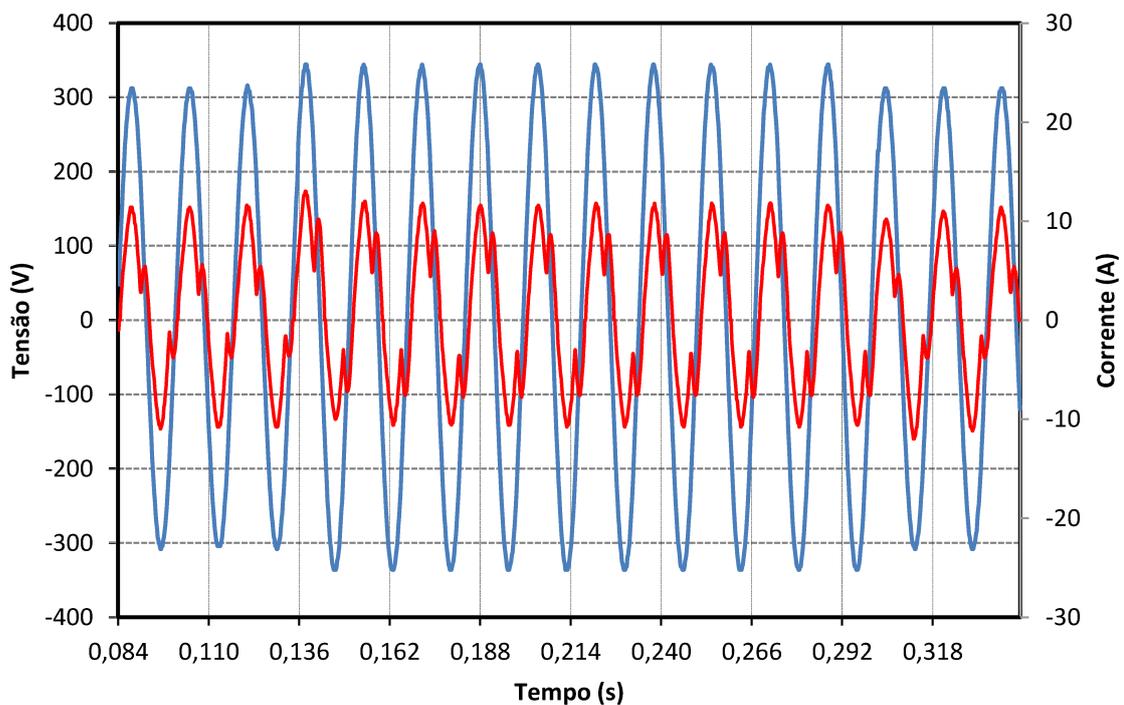
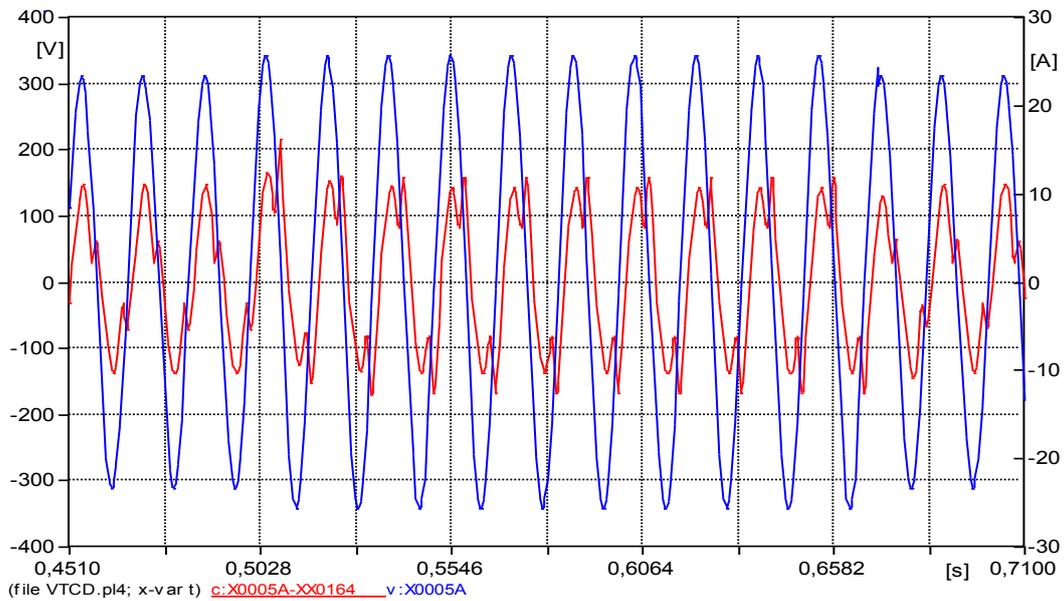


Figura 4.13 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.  
Caso 2 - Experimental



**Figura 4.14 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. Caso 2 - Computacional**

Verifica-se, no início do distúrbio aplicado, um pequeno transitório de corrente, além de um aumento de corrente e alterações em sua forma de onda durante os 10 ciclos de aplicação do evento. A Tabela 4.5 apresenta a comparação entre os resultados obtidos. Percebe-se que os valores numéricos experimentais são parecidos com os valores computacionais.

**Tabela 4.5 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada do forno micro-ondas - Caso 2**

		Tensão (V)			Corrente (A)		
		Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
<b>Valores de pico:</b>	Durante	344,0	342,2	0,52%	12,00	11,90	0,83%
	Pré-evento	220,6	220,0	0,26%	6,95	6,68	3,88%
<b>Valores eficazes:</b>	Durante	243,1	242,0	0,45%	7,48	8,16	9,09%

Da mesma forma feita para as condições de suprimento ideais, as tensões e correntes do circuito de alta tensão do forno micro-ondas foram avaliadas em condições de distúrbios. As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam as formas de onda da tensão e da

corrente no enrolamento secundário do transformador de alta tensão, experimental e computacionalmente, respectivamente.

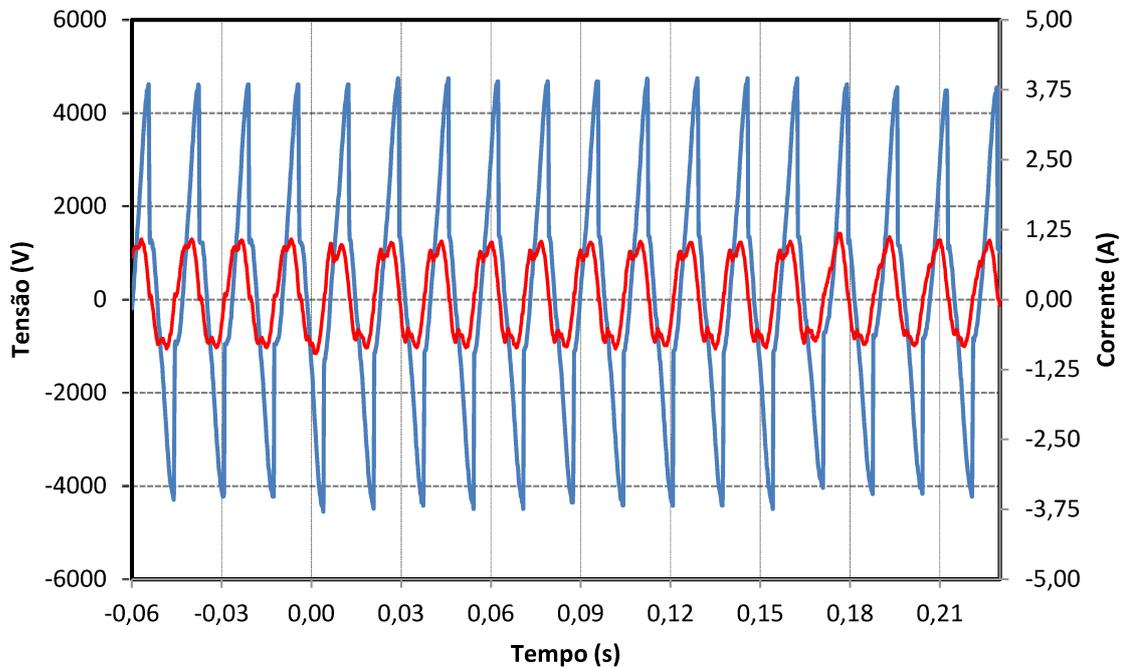


Figura 4.15 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.

Caso 2 - Experimental

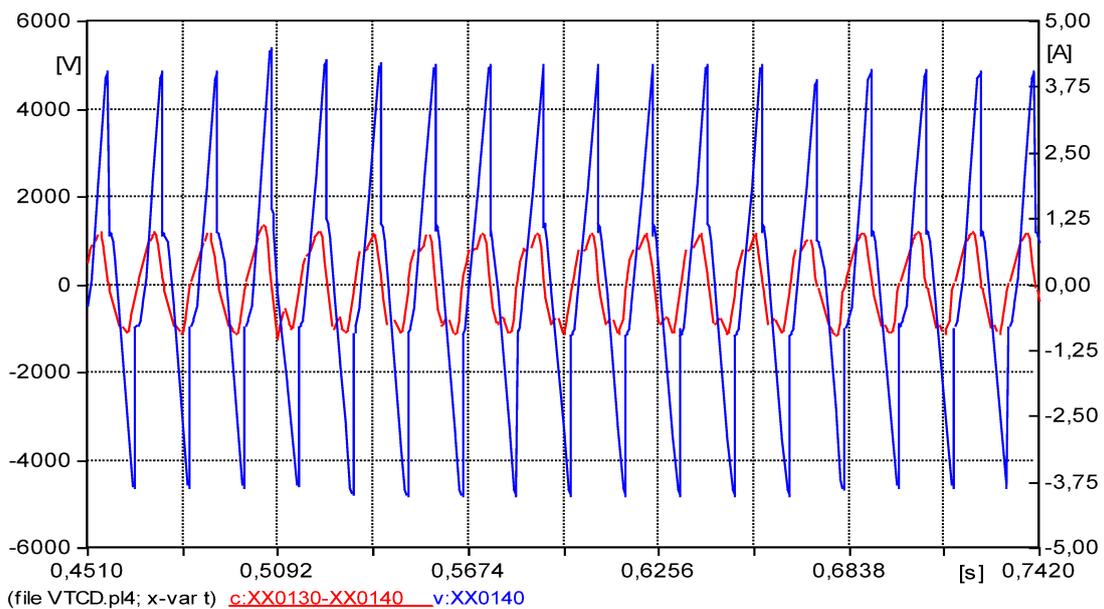
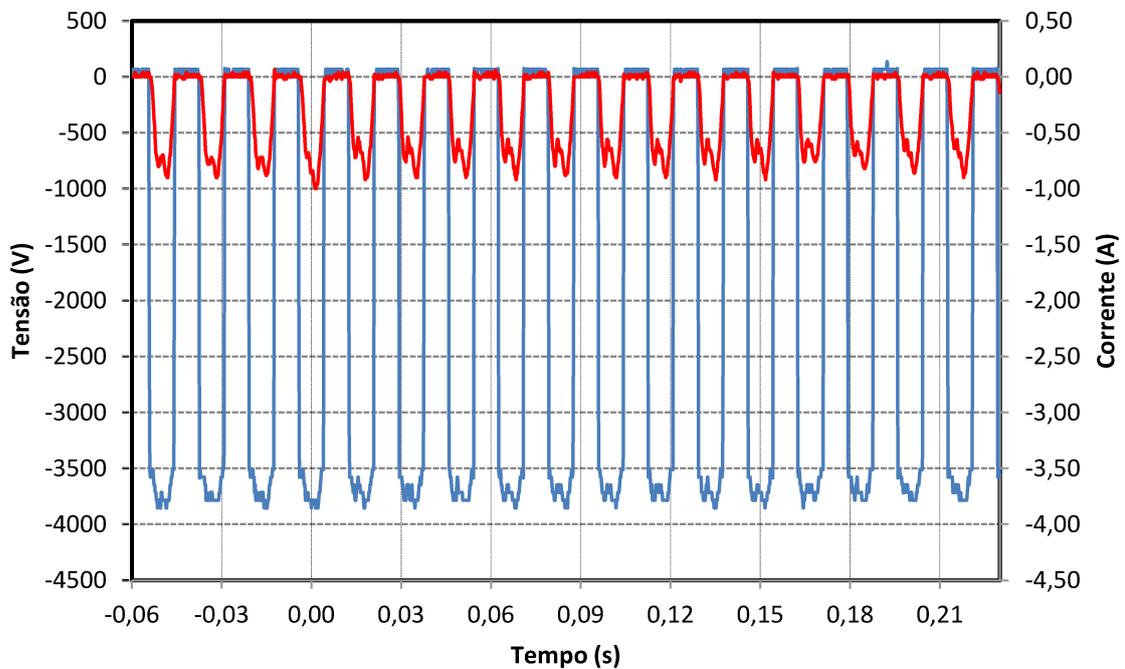


Figura 4.16 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.

**Caso 2 - Computacional**

Com base na análise dos gráficos anteriormente apresentados, percebe-se que a elevação de tensão que ocorre na entrada do equipamento é refletida para seu circuito interno, causando uma pequena elevação de tensão no secundário do transformador e, conseqüentemente, também, algumas variações nas formas de onda de sua corrente. O mesmo pode ser observado nas Figuras 4.17 e 4.18, que mostram os resultados experimentais e computacionais, respectivamente, para as formas de onda da tensão e da corrente na entrada da válvula magnétron.



**Figura 4.17 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.**

**Caso 2 - Experimental**

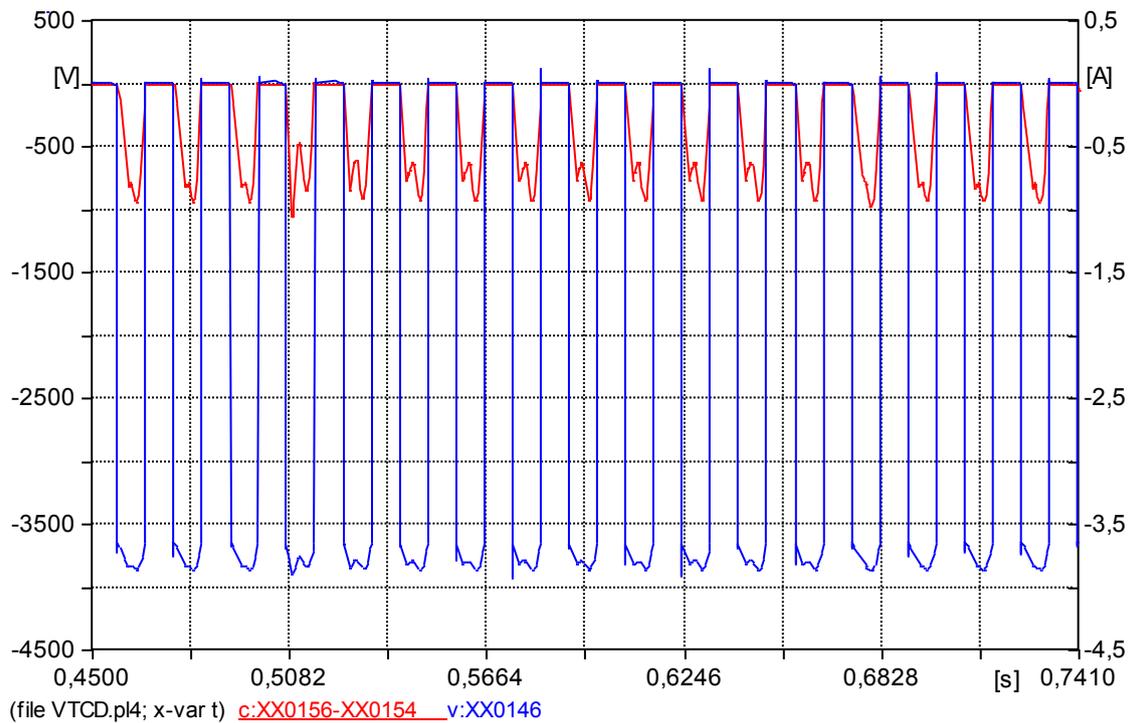


Figura 4.18 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.

Caso 2 - Computacional

A Tabela 4.6 sintetiza os principais resultados numéricos obtidos internamente ao forno micro-ondas para o caso estudado.

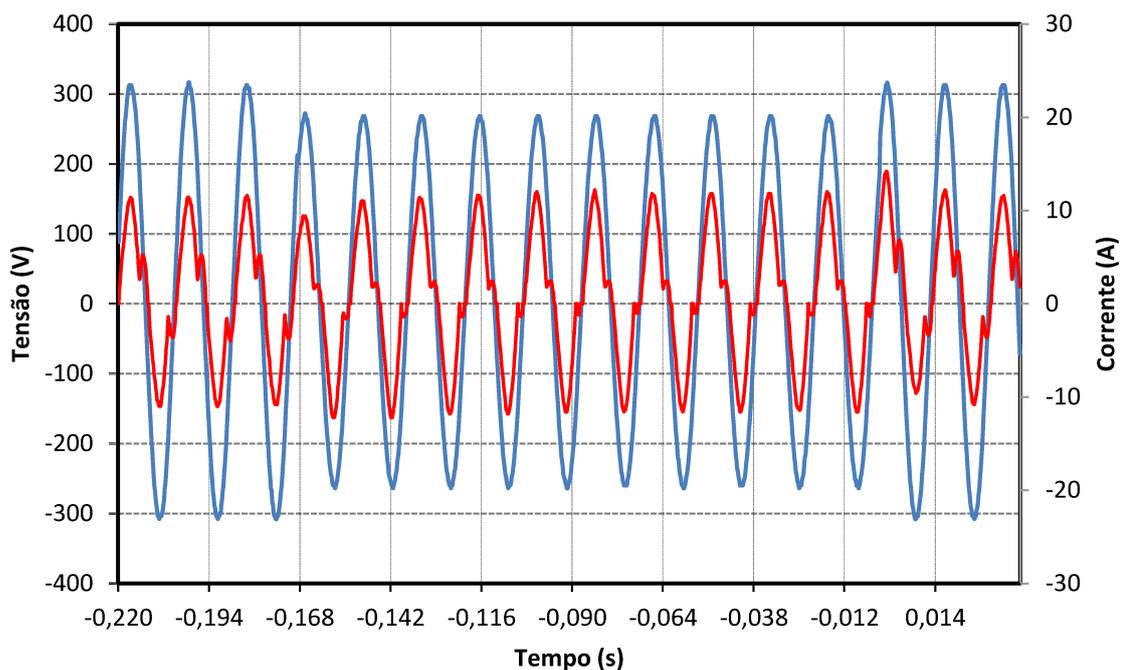
Tabela 4.6 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas - Caso 2

	Secundário Trafo			Magnétron		
	Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
<b>Tensão de pico</b>	-4480	-4830	7,81%	-3763	-3833	1,86%
<b>Corrente de pico</b>	1,04	0,97	6,73%	-0,92	-0,93	1,09%

De forma geral, os resultados computacionais obtidos frente a elevações de tensão de curta duração se mostram bem próximos dos resultados experimentais. Deste modo, verifica-se que o desempenho do modelo computacional implementado se mostra também adequado para este caso analisado.

### 4.3.3 Caso 3: Afundamento de tensão de curta duração

Os ensaios experimentais envolvendo afundamentos de tensão foram realizados diante de mais de um nível de tensão de suprimento, porém, apenas um dos casos é apresentado neste trabalho. O caso selecionado apresenta o desempenho do forno micro-ondas frente a um afundamento de tensão para 85% da tensão nominal, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental. As Figuras 4.19 (experimental) e 4.20 (computacional) mostram as formas de onda da tensão e corrente de entrada do equipamento frente ao distúrbio anteriormente mencionado. Durante a ocorrência do evento há um leve aumento nos picos de corrente do semiciclo negativo, além de alterações em sua forma de onda. Tais observações são apresentadas nos resultados experimentais e computacionais, consolidando a eficácia do modelo para tal situação.



**Figura 4.19 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. Caso 3 - Experimental**

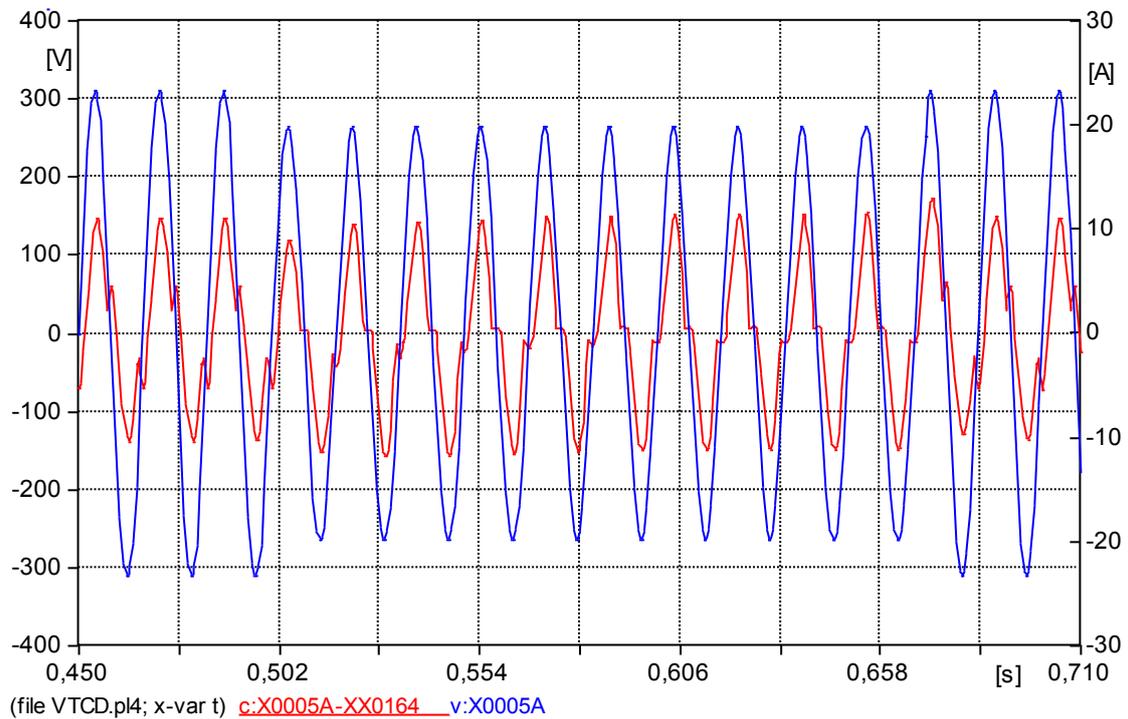


Figura 4.20 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. Caso 3 - Computacional

Verifica-se, ainda, no primeiro semiciclo positivo do afundamento de tensão, uma pequena redução do pico de corrente, enquanto, no restabelecimento da tensão nominal, um pequeno aumento do pico de corrente é observado. Esses detalhes podem ser melhor visualizados por meio da corrente eficaz apresentada na Figura 4.21. Complementarmente, a Tabela 4.7 apresenta os valores numéricos obtidos.

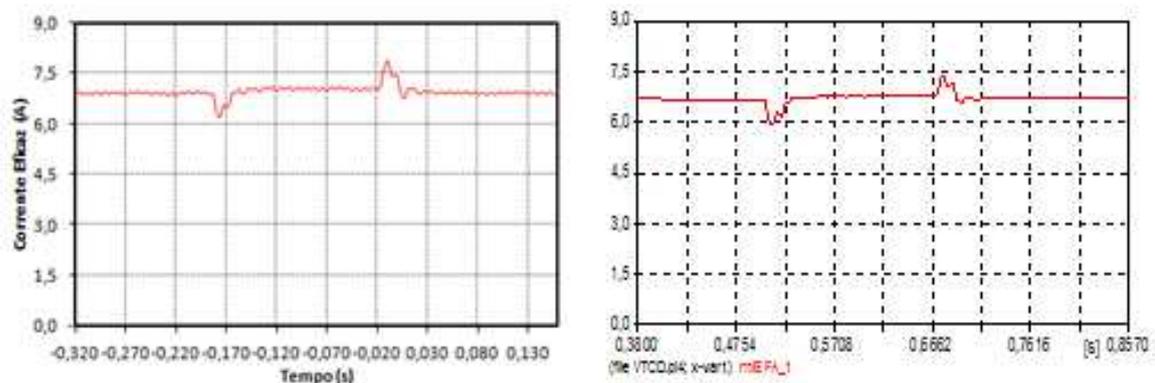


Figura 4.21 - Corrente eficaz experimental (esquerda) e computacional (direita) na entrada do forno micro-ondas, para a ocorrência do afundamento de tensão - Caso 3

Tabela4.7 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada do forno micro-ondas - Caso 3

		Tensão (V)			Corrente (A)		
		Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
<b>Valores de pico:</b>	Durante	268,0	264,4	1,34%	12,00	11,90	0,83%
	Pré-evento	220,9	220,0	0,41%	6,95	6,68	3,88%
<b>Valores eficazes:</b>	Durante	187,9	187,0	0,48%	7,05	6,80	3,55%

O comportamento das tensões e correntes no secundário do transformador, durante o afundamento de tensão, pode ser visto nas Figuras 4.22 e 4.23, por meio de suas formas de onda.

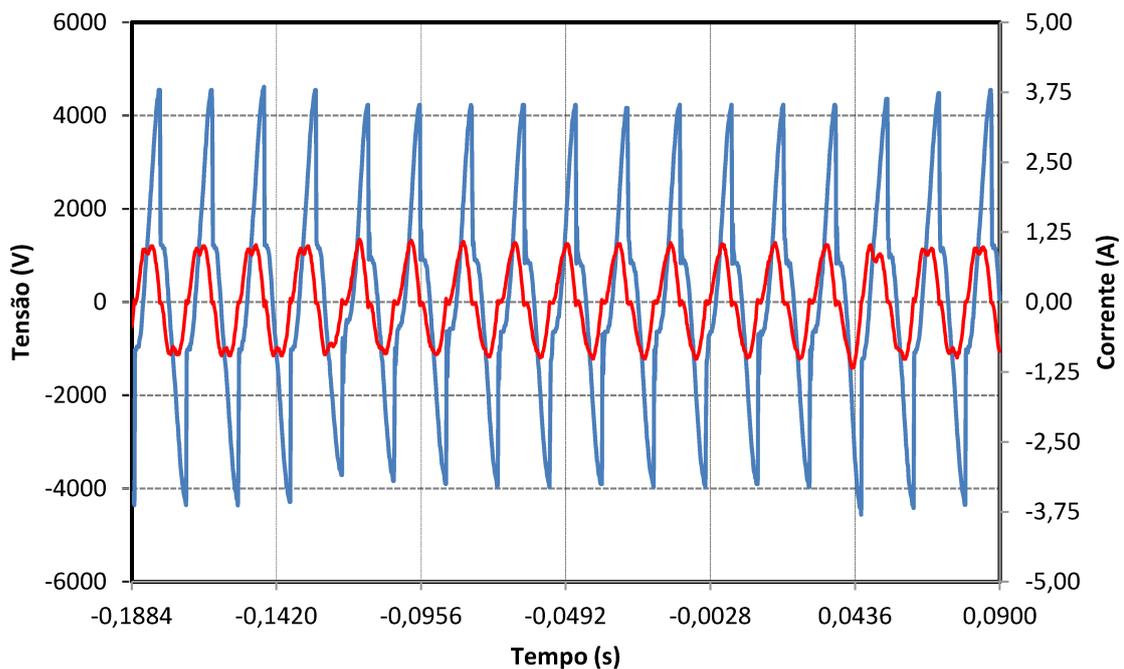


Figura 4.22 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.  
Caso 3 - Experimental

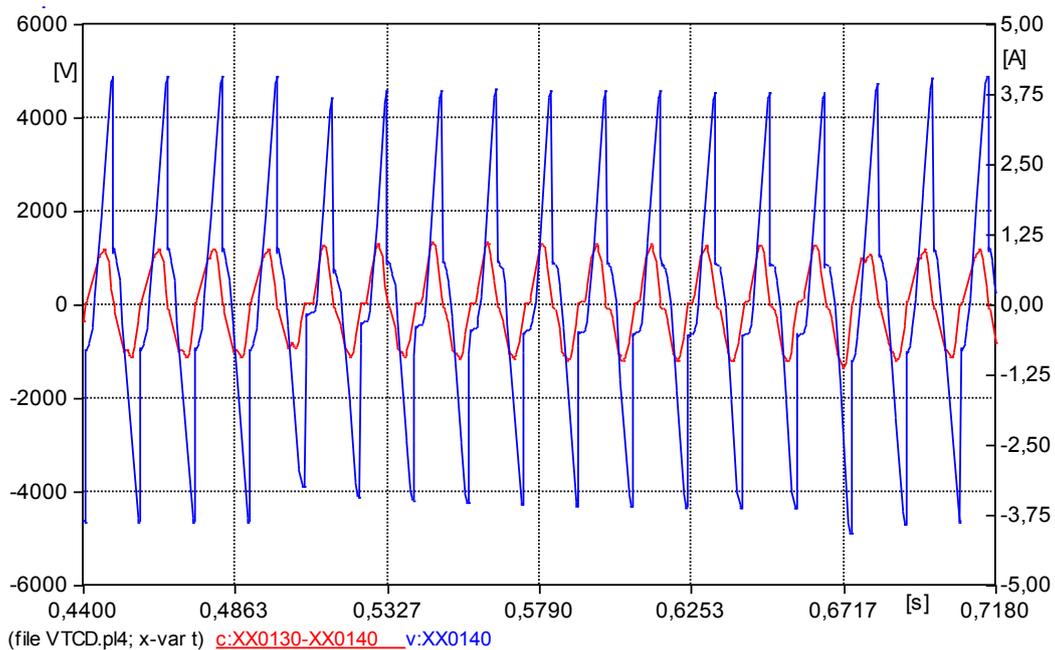


Figura 4.23 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.

### Caso 3 - Computacional

Mais uma vez, observa-se que o distúrbio ocorrido na entrada do equipamento é refletido em seu circuito interno. Ou seja, com o afundamento de tensão para 85% da tensão nominal de entrada, houve um afundamento para aproximadamente 92% da tensão do secundário do transformador, causando um pequeno aumento no valor de pico de sua corrente durante o evento. Já no magnétron, a tensão não foi alterada diante do afundamento, enquanto sua corrente sofreu pequenas variações, do mesmo modo ocorrido no transformador. Suas formas de onda podem ser vistas nas Figuras 4.24 e 4.25.

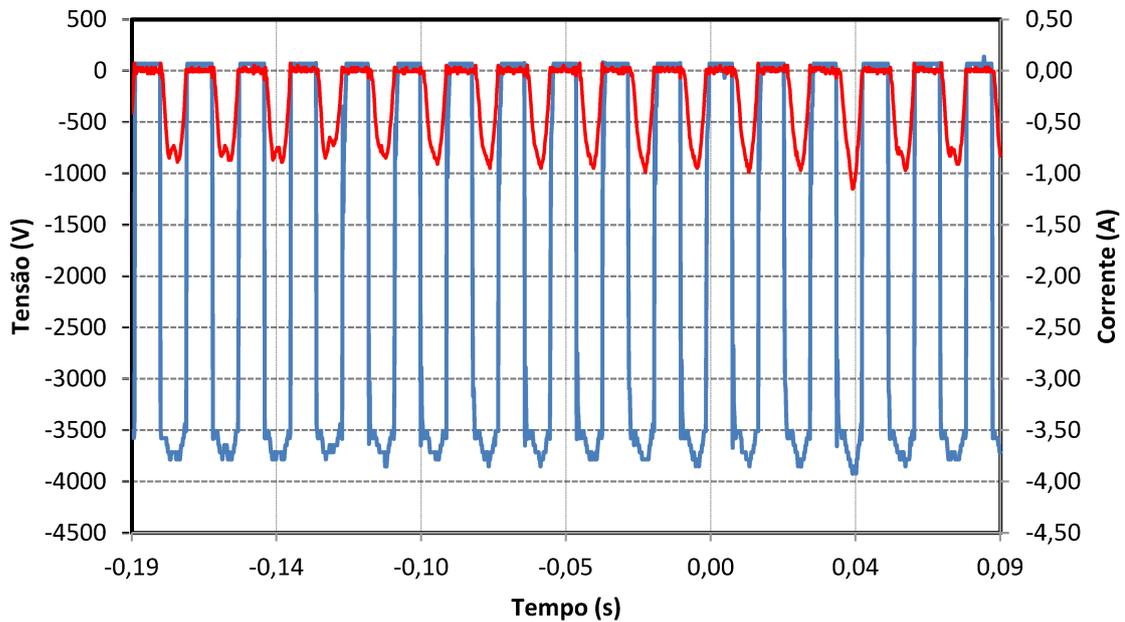


Figura 4.24 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.

Caso 3 - Experimental

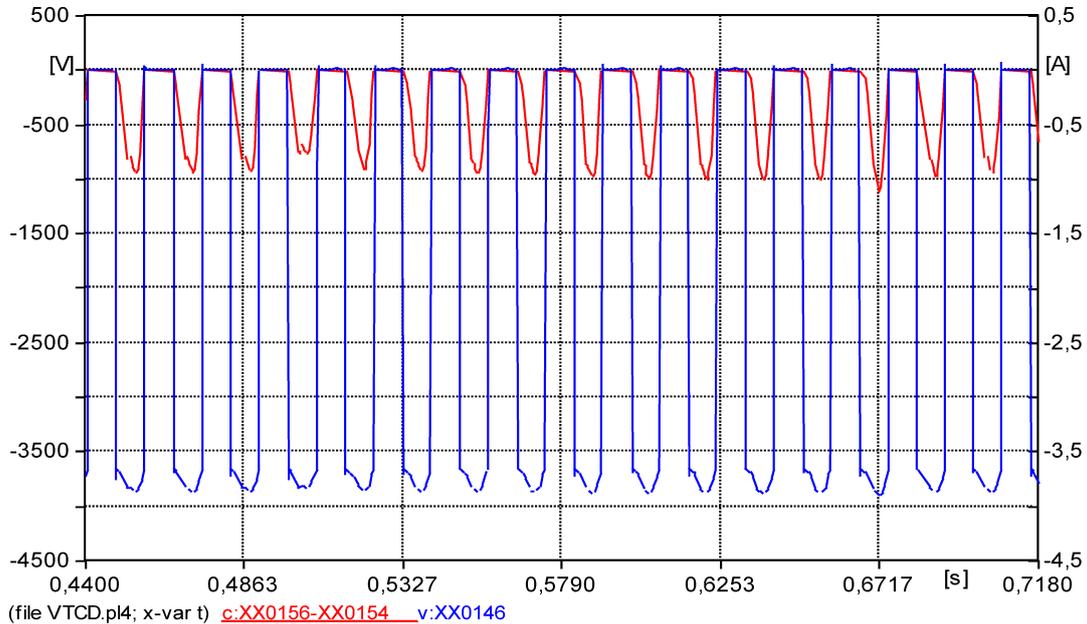


Figura 4.25 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.

Caso 3 - Computacional

A Tabela 4.8 apresenta a comparação dos resultados numéricos relacionados às medições e simulações referentes ao secundário do transformador e magnétron do equipamento.

**Tabela 4.8 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas - Caso 3**

	Secundário Trafo			Magnétron		
	Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
<b>Tensão de pico</b>	4224	4600	8,90%	-3852	-3872	0,52%
<b>Corrente de pico</b>	-1,18	-1,12	5,08%	-1,15	-1,12	2,61%

Novamente, os resultados obtidos evidenciam uma boa representação do desempenho do forno micro-ondas modelado no ATP, tanto para as medições e simulações referentes à entrada, quanto internamente ao equipamento.

#### **4.3.4 Caso 4: Interrupção de tensão**

Este item tem como objetivo, verificar o desempenho do forno micro-ondas frente a uma situação de interrupção no fornecimento de energia elétrica. Esse tipo de evento compreende reduções de tensão de maneira que seu valor remanescente seja igual ou menor a 0,1 pu da tensão nominal.

O caso estudado nesta seção compreende uma interrupção plena de tensão, com duração de 10 ciclos da frequência fundamental. As Figuras 4.26 e 4.27 ilustram o comportamento experimental e computacional, respectivamente, da tensão e corrente de entrada do forno micro-ondas durante o evento citado. Como verificado, durante a aplicação da interrupção de tensão, a corrente no equipamento se anula totalmente. Observa-se, ainda, que, passado o distúrbio, com a tensão voltando para seu valor nominal, ocorre um pico de corrente. Após comparação e análise dos oscilogramas, percebe-se boa semelhança entre os resultados provenientes das simulações e medições.

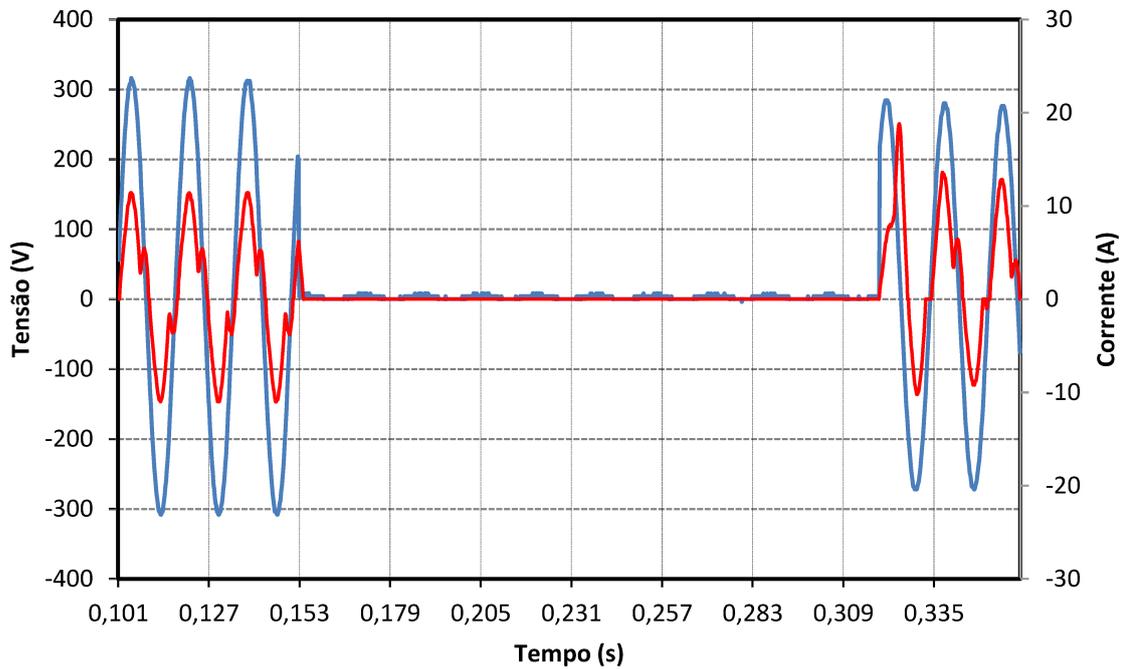


Figura 4.26 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.  
Caso 4 - Experimental

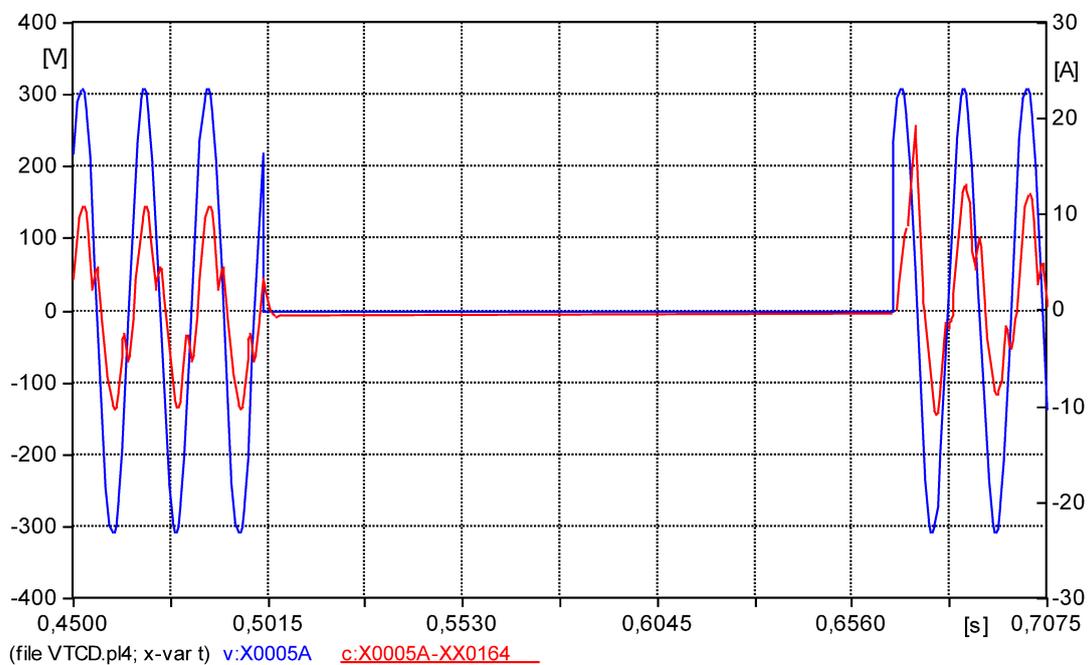


Figura 4.27 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.  
Caso 4 - Computacional

De forma a complementar as análises feitas anteriormente, as Figuras 4.28 e 4.29 mostram o comportamento da tensão e corrente eficazes para a ocorrência da interrupção de tensão, obtidas dos ensaios experimentais e computacionais, respectivamente.

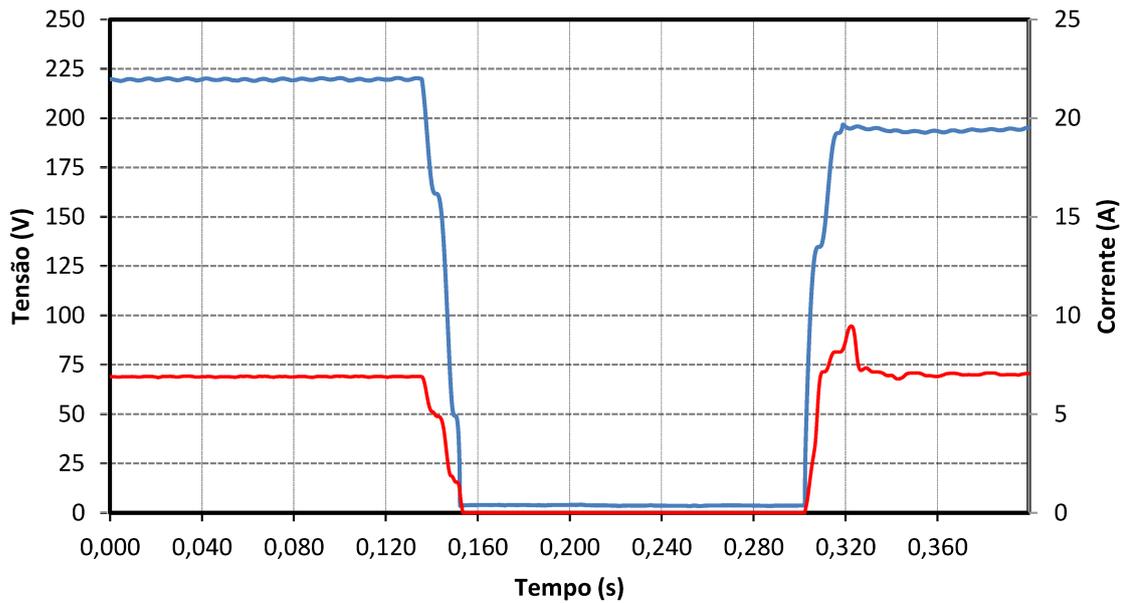


Figura 4.28 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente de entrada eficaz (vermelho).

Caso 4 - Experimental

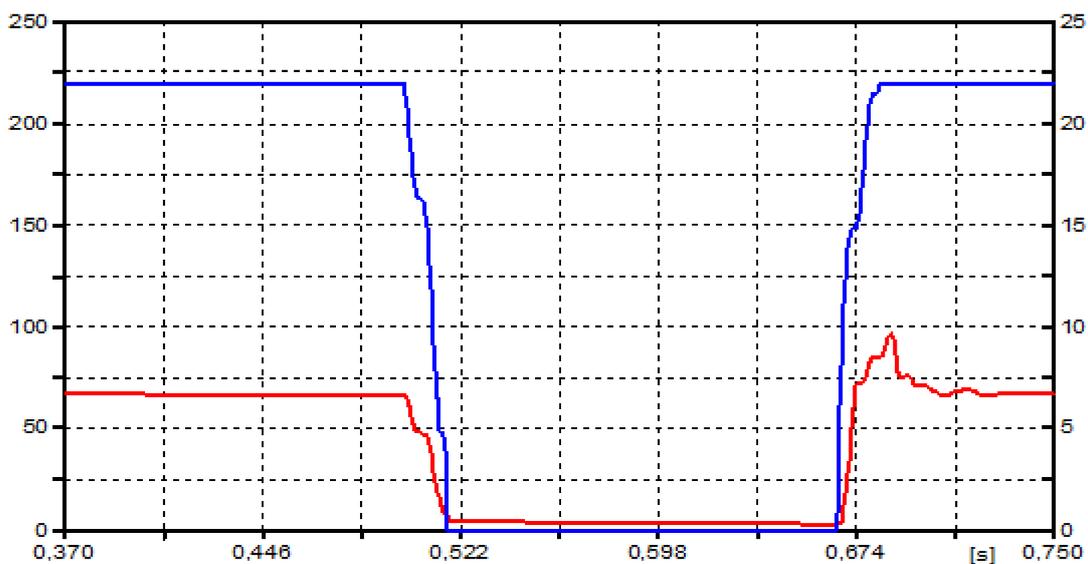


Figura 4.29 - Tensão de alimentação eficaz (azul) e corrente de entrada eficaz (vermelho).

Caso 4 - Computacional

Deve-se esclarecer o motivo pelo qual as tensões das Figuras 4.26 e 4.28 não foram restabelecidas em seu valor nominal, após a ocorrência do evento. Esta situação foi provocada pelas limitações da fonte programável de 4,5 kVA, que não consegue manter sua tensão nominal perante a solicitações de correntes mais altas. Observa-se, portanto, nas Figuras 4.27 e 4.29, que esse fato não ocorre por se tratarem de resultados computacionais em que não há limitações em suas fontes de alimentação. Adicionalmente, percebe-se, por meio da Figura 4.29 (computacional), boa correlação com os resultados da Figura 4.28 (experimental). Destaca-se, ainda, que, durante a interrupção de tensão por 10 ciclos, não houve o desligamento do forno micro-ondas. Apesar de o equipamento continuar funcionando, algumas interferências foram observadas em sua operação, tais como: ruído sonoro diferente, enfraquecimento da luminosidade da lâmpada interna e variação da velocidade do motor do prato giratório. Para consolidar o exposto até este ponto da seção, a Tabela 4.9 apresenta a comparação numérica entre os resultados experimentais e computacionais.

**Tabela4.9 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes na entrada do forno micro-ondas - Caso 4**

		Tensão (V)			Corrente (A)		
		Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
<b>Valores de pico:</b>	Durante	8,0	0,0	-	0,0	0,0	-
	Pré-evento	220,1	220,0	0,05%	6,90	6,68	3,19%
<b>Valores eficazes:</b>	Durante	3,8	0,0	-	0,0	0,27	-

Os oscilogramas das tensões e correntes no enrolamento secundário do transformador, durante a interrupção de tensão, podem ser vistos nas Figuras 4.30 e 4.31.

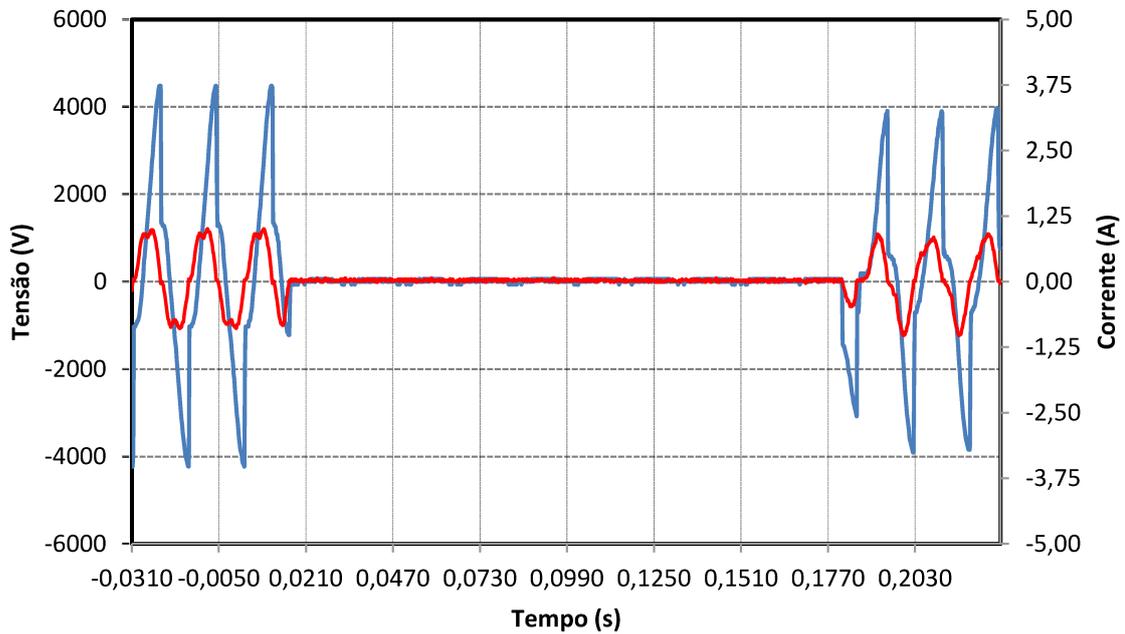


Figura 3.30 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.  
Caso 4 - Experimental

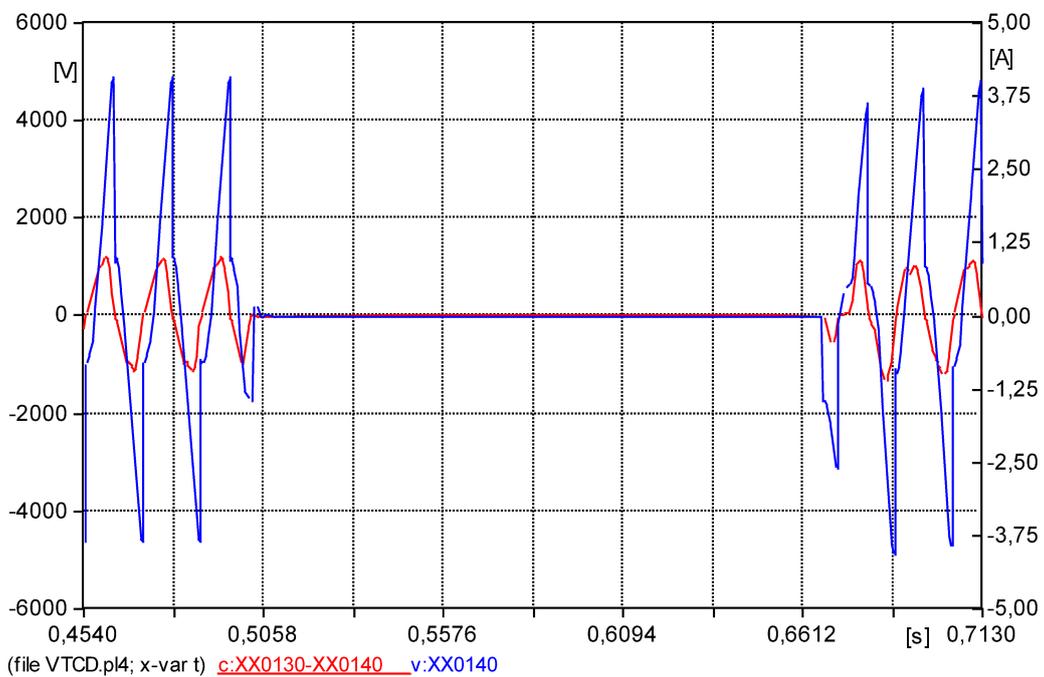
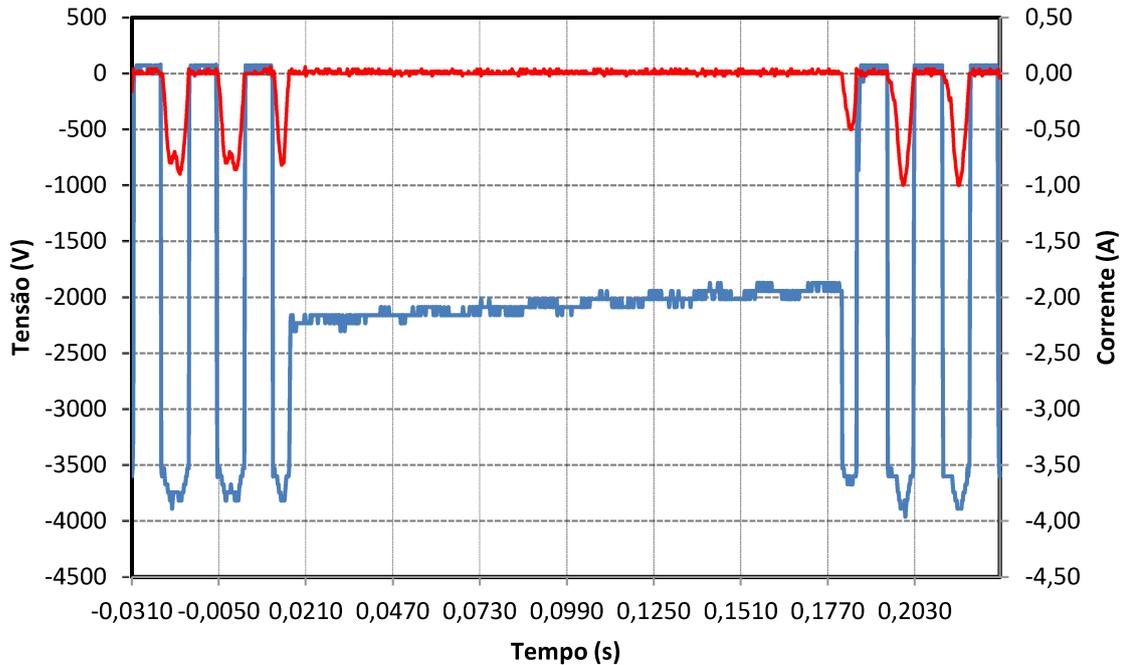
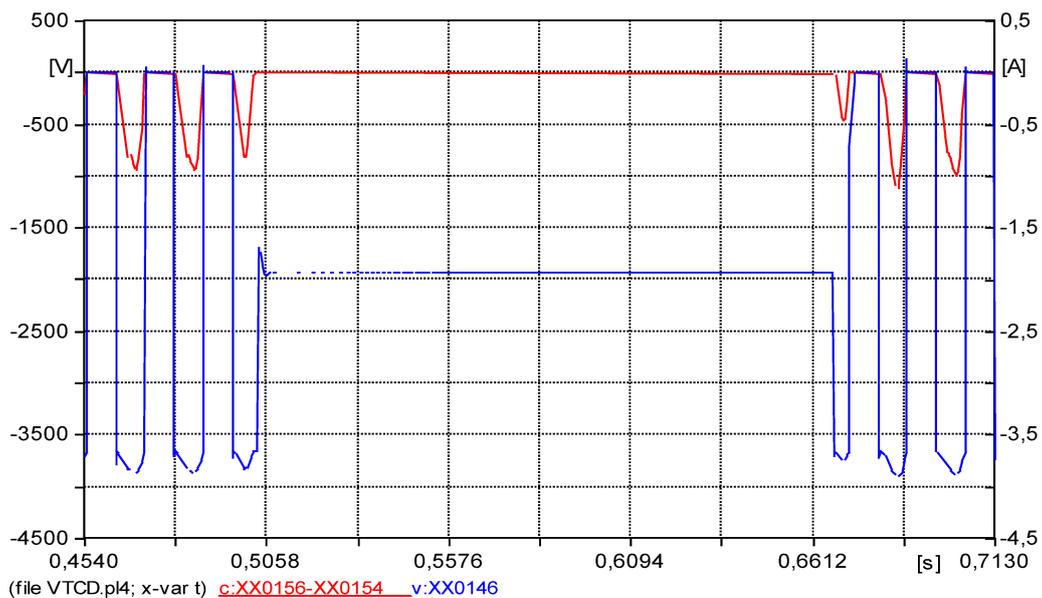


Figura 4.31 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) no secundário do transformador de alta tensão.  
Caso 4 - Computacional

Já as Figuras 4.32 e 4.33 apresentam os oscilogramas experimental e computacional, respectivamente, das tensões e correntes na entrada da válvula magnétron.



**Figura 4.32 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.  
Caso 4 - Experimental**



**Figura 4.33 - Tensão (azul) e corrente (vermelho) na entrada da válvula magnétron.  
Caso 4 - Computacional**

A Tabela 4.10 sintetiza alguns resultados numéricos referentes ao circuito de alta tensão do forno micro-ondas.

**Tabela 4.10 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as tensões e correntes no circuito de alta tensão do forno micro-ondas - Caso 4**

	Secundário Trafo			Magnétron		
	Exper.	Comput.	Erro	Exper.	Comput.	Erro
<b>Tensão de pico</b>	0,0	0,0	-	-2088	-1930	7,57%
<b>Corrente de pico</b>	0,0	0,0	-	0,0	0,0	-

Após mais um caso estudado, em que o distúrbio considerado foi a interrupção de tensão, os resultados, novamente, se mostram satisfatórios, apresentando valores computacionais bem próximos dos resultados experimentais.

#### 4.3.5 Caso 5: Flutuação de tensão

A análise a seguir trata sobre o desempenho do forno micro-ondas frente à flutuação de tensão. Esse distúrbio é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica no valor eficaz ou amplitude da tensão. Em geral, é provocado pelas alterações bruscas nas potências ativas e reativas das cargas elétricas. Ressalta-se que o caso selecionado corresponde a uma condição mais severa do que aquelas comumente encontradas nos sistemas elétricos. No entanto, sua avaliação é válida no sentido de verificar o desempenho do equipamento para essas condições, visto que, para índices menores, a influência seria menos perceptível. O parâmetro de flutuação de tensão utilizado neste estudo é o PST (*Probability Short Term*), que indica a severidade de *flicker* de curto prazo, e está relacionado ao incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa nas pessoas [4].

As condições adotadas para este caso contemplam flutuação de tensão com PST = 5 pu e frequência da moduladora de 13,5 Hz. As Figuras 4.34 e 4.35 evidenciam os oscilogramas da tensão e corrente na entrada do forno micro-ondas, obtidos experimentalmente e computacionalmente, respectivamente.

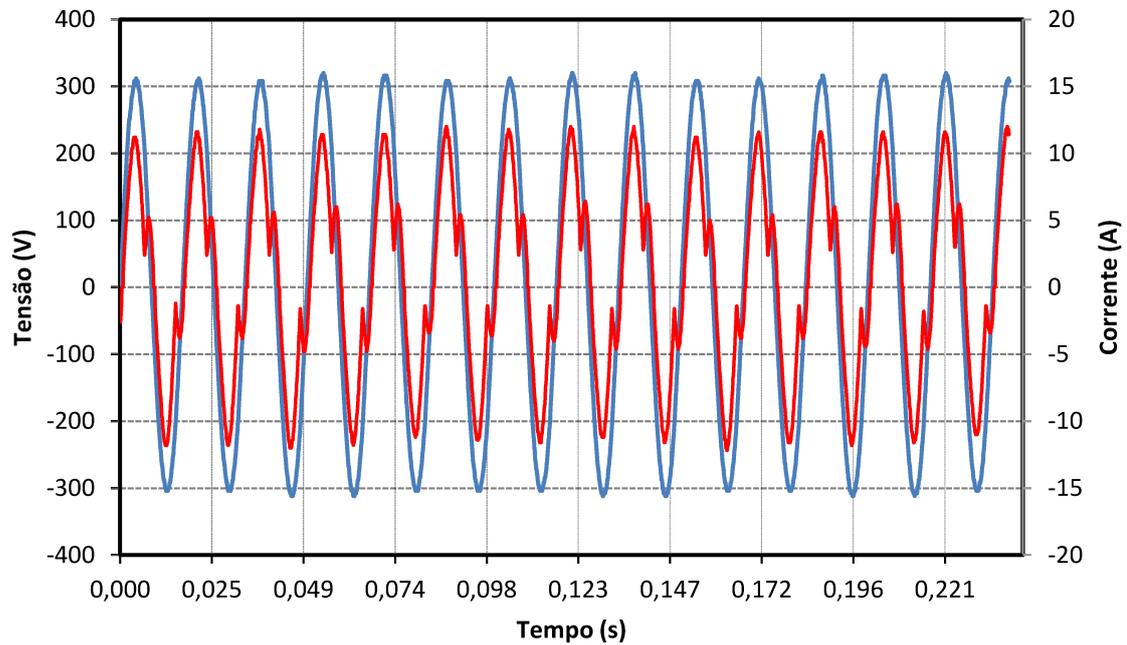


Figura 4.34 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.  
Caso 5 - Experimental

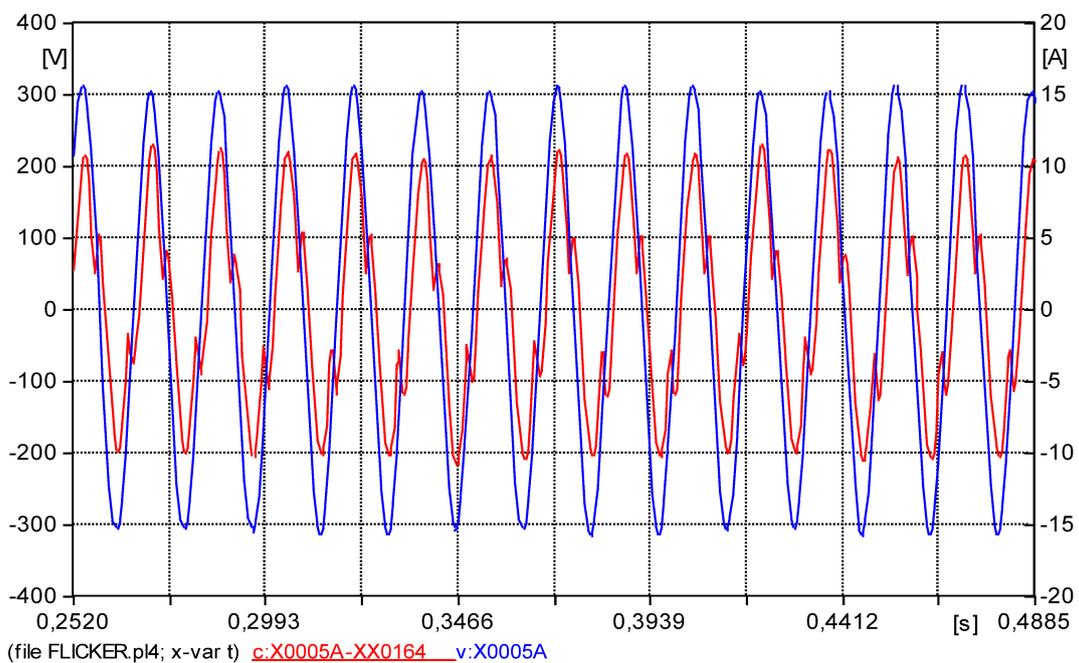
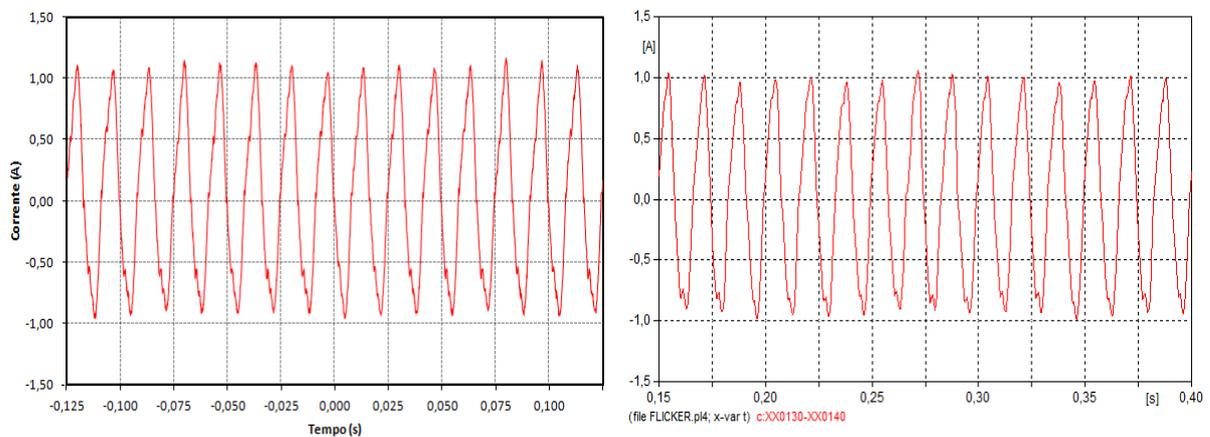
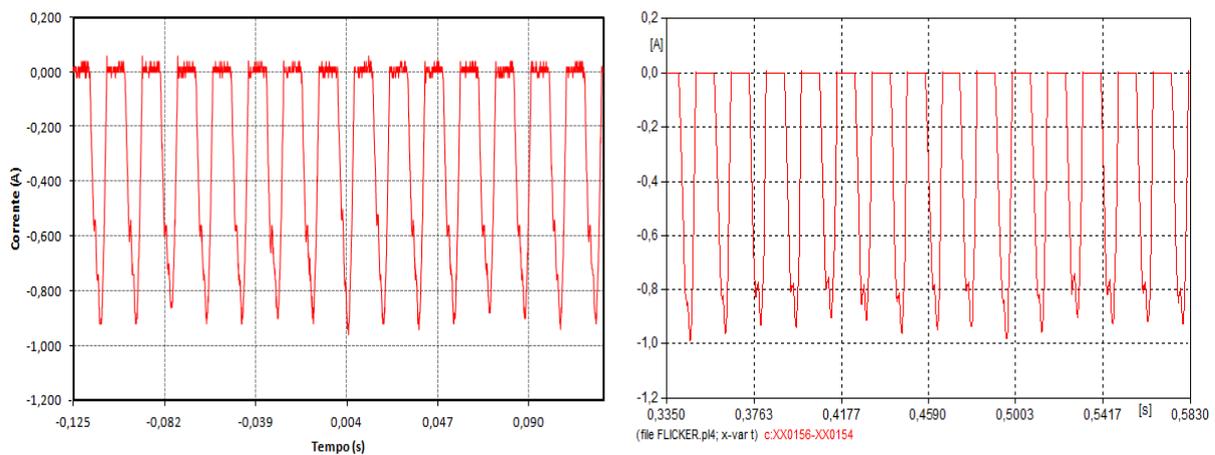


Figura 4.35 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.  
Caso 5 - Computacional

Analisando os oscilogramas anteriores, percebe-se boa semelhança entre os resultados experimentais e computacionais, porém, no que se refere a impactos nos resultados, ocasionados por esse tipo de distúrbio, pouco se nota, apresentando valores bem próximos dos resultados em condições ideais. Avaliando os resultados refletidos para as grandezas elétricas no interior do forno, também, poucas variações são percebidas, principalmente em relação às tensões no secundário do transformador e no magnétron. Por isso, a seguir são apresentadas apenas as respostas referentes às correntes no secundário do transformador de alta tensão (Figura 4.36) e na válvula magnétron (Figura 4.37).



**Figura 4.36 - Corrente experimental (esquerda) e computacional (direita) no secundário do transformador, para a ocorrência de flutuação de tensão - Caso 5**



**Figura 4.37 - Corrente experimental (esquerda) e computacional (direita) no magnétron, para a ocorrência de flutuação de tensão - Caso 5**

Analisando, comparativamente, as formas de onda apresentadas nesta seção, afirma-se que seus desempenhos foram satisfatórios para os objetivos deste trabalho, reforçando a consistência da modelagem proposta nesta dissertação.

#### 4.3.6 Caso 6: Distorções harmônicas de tensão

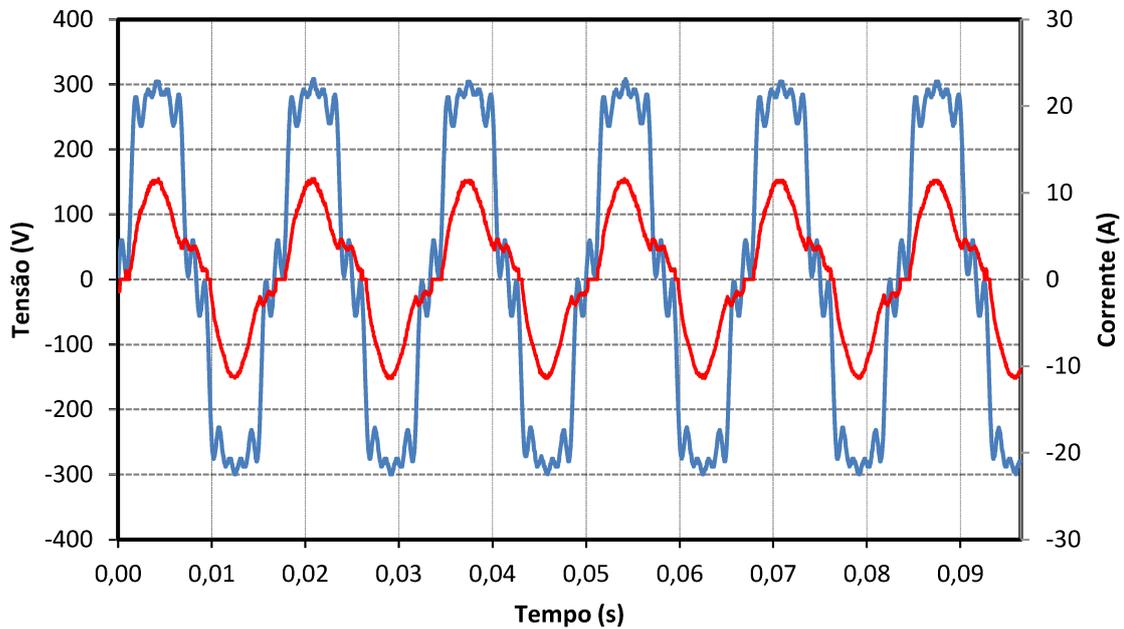
Por fim, esta seção contempla os resultados quantitativos e qualitativos dos estudos voltados à análise do desempenho do forno micro-ondas frente ao suprimento de energia elétrica contendo distorções harmônicas. O estudo compreendeu a aplicação de uma distorção harmônica total de tensão (DTT) de 20%.

A Tabela 4.11 detalha os valores percentuais de harmônicos individuais, assim como, o nível de distorção harmônica total a qual o equipamento foi submetido.

**Tabela 4.11 - Distorções harmônicas individuais e total aplicadas ao forno micro-ondas**

<b>Harmônicas de tensão</b>	<b>Valor</b>
5ª ordem	10,0%
7ª ordem	10,0%
11ª ordem	10,0%
13ª ordem	10,0%
DTT	20,0%

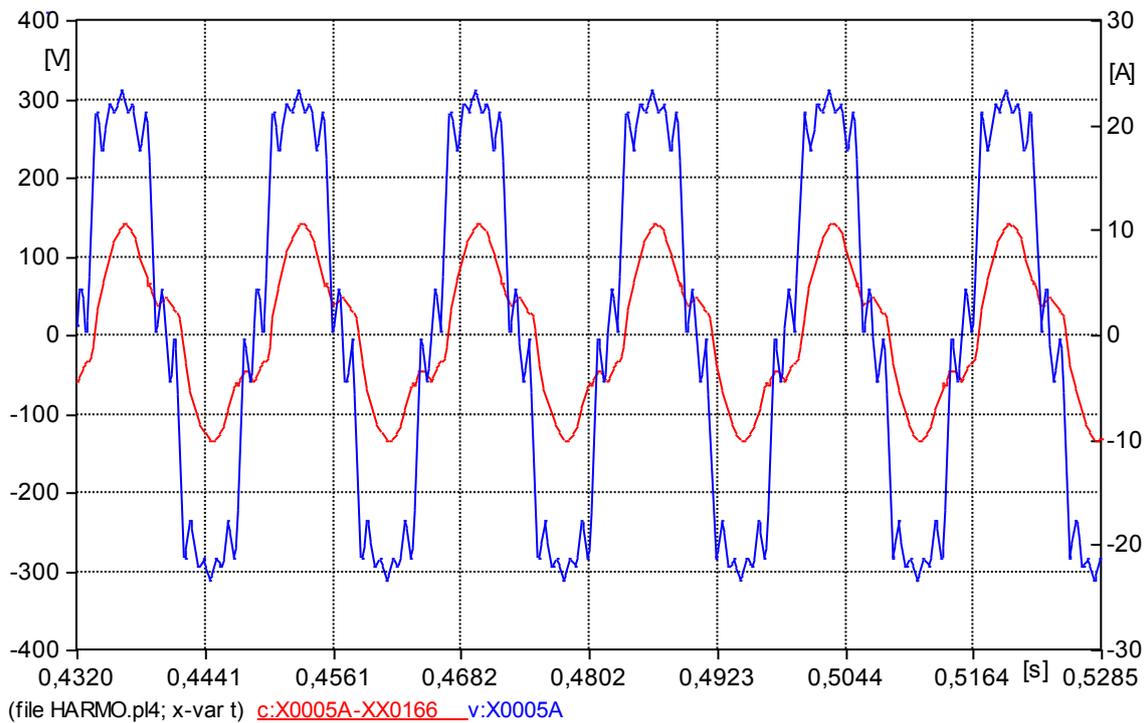
A Figura 4.38 ilustra os oscilogramas da tensão distorcida, aplicada ao forno micro-ondas, e da corrente absorvida pelo equipamento frente a esse distúrbio.



**Figura 4.38 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas. Caso 6 - Experimental**

Referente ao funcionamento do equipamento durante a aplicação da perturbação, não foi observado nenhuma alteração perceptível, como ruídos audíveis e vibrações diferentes daquelas constatadas durante condições de suprimento ideais.

As formas de onda de tensão e corrente com distorções harmônicas, obtidas computacionalmente, podem ser visualizadas na Figura 4.39.



**Figura 4.39 - Tensão de alimentação (azul) e corrente de entrada (vermelho) do forno micro-ondas.**

#### **Caso 6 - Computacional**

Verifica-se boa concordância entre os oscilogramas experimentais e computacionais de tensão e corrente. Percebem-se, também, variações nas formas de onda de corrente, além de uma redução em seu valor eficaz, quando comparado com o caso de suprimento de energia em condições ideais.

A Figura 4.40 apresenta a comparação entre os espectros harmônicos das correntes obtidas por meio dos ensaios experimentais e simulações computacionais.

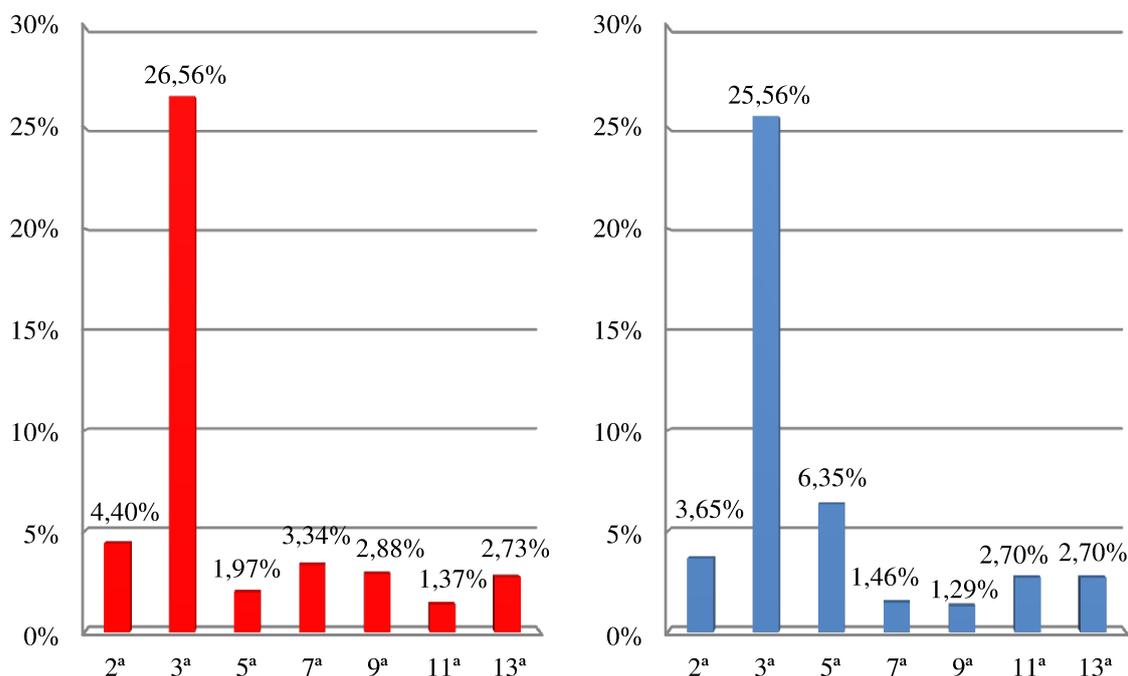


Figura 4.40 - Espectro harmônico da corrente de entrada do forno micro-ondas, experimental (vermelho) e computacional (azul) - Caso 6

Embora algumas harmônicas individuais de corrente tenham apresentado discrepâncias maiores, de forma geral, pode-se dizer, que, baseado nos propósitos deste trabalho, são aceitáveis.

A Tabela 4.12 mostra a comparação entre os resultados numéricos experimentais e computacionais para a corrente de entrada do forno micro-ondas com suprimento de tensão contendo as distorções harmônicas.

Tabela 4.12 - Comparação entre os resultados experimentais e computacionais para as correntes de entrada do forno micro-ondas com suprimento de tensão contendo distorções harmônicas - Caso 6

	Experimental	Computacional	Erro
Corrente de pico (A)	11,20	10,67	4,73%
Corrente eficaz (A)	6,83	6,52	4,54%
DHTi (%)	27,52	26,93	2,14%
I <sub>h</sub> fundamental (A)	6,59	6,30	4,40%
I <sub>h</sub> 2 <sup>a</sup> (A)	0,29	0,23	20,69%
I <sub>h</sub> 3 <sup>a</sup> (A)	1,75	1,61	8,00%

	Experimental	Computacional	Erro
I <sub>h</sub> 5 <sup>a</sup> (A)	0,13	0,40	-
I <sub>h</sub> 7 <sup>a</sup> (A)	0,22	0,09	-
I <sub>h</sub> 9 <sup>a</sup> (A)	0,19	0,08	-
I <sub>h</sub> 11 <sup>a</sup> (A)	0,09	0,17	-
I <sub>h</sub> 13 <sup>a</sup> (A)	0,18	0,17	5,56%

Adicionalmente aos demais casos estudados, o modelo computacional apresentou boa resposta frente às distorções harmônicas de tensão, apontando eficácia na representação do desempenho do forno micro-ondas estudado.

Além dos estudos realizados na investigação das grandezas elétricas na entrada do forno micro-ondas, foram obtidos resultados para o circuito interno de alta tensão. Porém, após análise dos dados, verifica-se praticamente nenhuma variação em suas formas de ondas e valores numéricos, em relação à condição de suprimento ideal. Devido a isso, seus resultados não são apresentados nesta seção, de forma a evitar a repetição.

#### 4.4 Considerações finais

Neste capítulo, os esforços foram concentrados em atividades voltadas para o processo de validação do modelo computacional do forno micro-ondas em estudo. Assim, em um primeiro momento, apresentou-se, de forma detalhada, a estrutura laboratorial para a realização dos ensaios experimentais e, em seguida, foram estabelecidas as condições operacionais em que o forno micro-ondas seria submetido. Tais condições abordam a alimentação do forno doméstico com tensão senoidal ideal, elevação de tensão, afundamento de tensão, interrupção, flutuação e distorções harmônicas. Cada uma das condições impostas produziu um conjunto de resultados envolvendo as grandezas elétricas de entrada e internas ao fornos micro-ondas, tanto experimentais quanto computacionais, por meio de seus oscilogramas.

Em todos os casos estudados, verificou-se grande semelhança entre os resultados experimentais e computacionais, validando, assim, a modelagem utilizada, tanto para condições ideais quanto para condições não ideais de suprimento. Maiores

evidências sobre essa afirmativa podem ser verificadas por meio das análises qualitativas das formas de ondas de tensão e corrente obtidas em cada caso considerado, além das análises quantitativas, por meio dos resultados numéricos sintetizados nas tabelas comparativas.

## CAPÍTULO V

---

# Avaliação do impacto da operação de um forno micro-ondas industrial real na qualidade de energia elétrica

## 5.1 Considerações iniciais

Conforme abordado no capítulo 2, os fornos micro-ondas vêm sendo bastante utilizados em aplicações industriais, apresentando inúmeras vantagens em relação aos fornos convencionais. Porém, conforme verificado no capítulo 4, percebe-se uma elevada distorção harmônica de corrente (DHTi) inerente ao equipamento, sobretudo sua componente de terceira ordem. Tal fato permite levantar uma questão a respeito da possibilidade de um forno micro-ondas industrial de elevada potência causar algum impacto na qualidade da energia elétrica de seu sistema de suprimento. Com base nisso, este capítulo tem por objetivo, apresentar um estudo sobre o impacto de um forno micro-ondas industrial no contexto da qualidade de energia elétrica. Deve-se salientar que essas análises serão realizadas a partir da implementação e simulações computacionais na plataforma ATP.

Sabe-se que em uma configuração típica de fornos micro-ondas industriais de elevada potência são utilizadas várias unidades monofásicas semelhantes aos fornos micro-ondas domésticos anteriormente estudados, contendo um transformador de alta tensão, um circuito dobrador de tensão, composto por um capacitor e um diodo de alta tensão, e a parte fundamental do forno é constituída pela válvula magnétron. Esses

fornos são geralmente alimentados por sistemas trifásicos e sua potência pode ser definida pela quantidade de unidades monofásicas distribuídas nas fases A, B e C. Deve-se salientar também, que o número de unidades é definido em função da necessidade do processo que ocorre na sua câmara de aquecimento.

A modelagem computacional desenvolvida neste capítulo se baseia em um forno micro-ondas industrial real composto por 320 unidades monofásicas, que serão denominadas neste trabalho como módulos emissores de micro-ondas. As seções seguintes abordam a configuração do sistema elétrico em que o forno micro-ondas industrial é inserido, bem como seu diagrama unifilar e sua implementação no programa ATP. Seus resultados serão obtidos por meio de quatro estudos de caso: três considerando o forno micro-ondas industrial operando com todos módulos emissores de micro-ondas ligados, em regime permanente, com diferentes valores de resistência de aterramento, e outro considerando o forno com carga desequilibrada, provocada pela operação de uma quantidade maior de módulos monofásicos em uma das fases. Em ambos os casos os resultados serão avaliados com base nos impactos que podem causar na qualidade de energia do sistema elétrico.

## **5.2 Identificação da instalação em estudo**

Antes de fazer a implementação do forno micro-ondas industrial no programa ATP, as características básicas de seu sistema de suprimento são apresentadas nesta seção. Uma representação de seu diagrama unifilar pode ser observada na Figura 5.1.

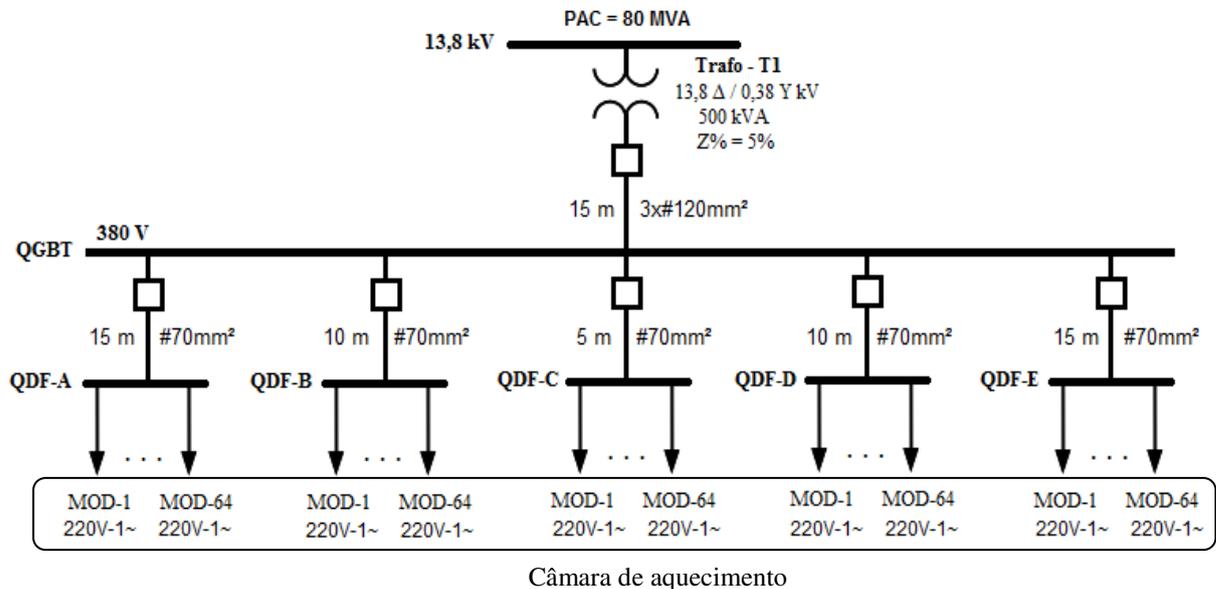


Figura 5.1 Representação do diagrama unifilar da instalação elétrica do forno micro-ondas industrial.

O forno industrial estudado contém 320 módulos emissores de micro-ondas monofásicos, alimentados por uma rede elétrica trifásica a quatro fios, 380/220V, por meio de um transformador de 500 kVA - 5% - 13,8Δ / 0,38Y kV. O nível de curto-circuito trifásico no ponto de entrega é de 80 MVA. Após o transformador há um quadro geral de baixa tensão (QGBT) que alimenta outros cinco quadros de distribuição de força (QDF- A ao E). Os alimentadores dos QDFs são compostos por condutores fase e neutro de 70mm². Já o alimentador geral do QGBT é composto por um circuito com três condutores por fase de 120mm², com condutores neutros de mesma seção nominal, dispostos em trifólio. Cada QDF é responsável pela alimentação e proteção de 64 unidades monofásicas de módulos emissores de micro-ondas distribuídas ao longo da câmara de aquecimento do forno, totalizando as 320 unidades já mencionadas.

### 5.3 Implementação computacional do forno micro-ondas industrial no ATP

Na seção anterior o diagrama unifilar da instalação elétrica foi apresentado para, juntamente com a modelagem computacional do forno micro-ondas doméstico apresentado no capítulo 3, dar subsídio para a implementação computacional do forno

micro-ondas industrial na plataforma ATP. A Tabela 5.1 apresenta, de forma resumida, os principais parâmetros representativos da instalação elétrica em estudo a serem utilizados na modelagem.

**Tabela 5.1 - Características da instalação elétrica do forno industrial**

<b>Concessionária</b>		
Tensão nominal	13,8 kV	
Potência de curto-circuito	80 MVA	
<b>Transformador de alimentação do forno industrial</b>		
Potência nominal	500 kVA	
Tensões AT / BT	13,8 / 0,38 kV	
Tipo de conexão	Delta / Estrela	
Impedância percentual	5%	
<b>Alimentador do QGBT</b>		
	Rp (mΩ / m)	XLp (mΩ / m)
Cabo CA XLPE 120mm <sup>2</sup>	0,1868	0,1076
<b>Alimentadores dos QDFs</b>		
	Rp (mΩ / m)	XLp (mΩ / m)
Cabo CA XLPE 70mm <sup>2</sup>	0,3184	0,1096
<b>Carga (módulos emissores de micro-ondas)</b>		
QDF-A	64 unidades monofásicas	
QDF-B	64 unidades monofásicas	
QDF-C	64 unidades monofásicas	
QDF-D	64 unidades monofásicas	
QDF-E	64 unidades monofásicas	
QGBT (Total)	320 unidades monofásicas	

Baseado nos dados do diagrama unifilar e nas características técnicas informadas anteriormente, o modelo computacional é, então, desenvolvido e implementado na plataforma ATP conforme apresentado na Figura 5.2.

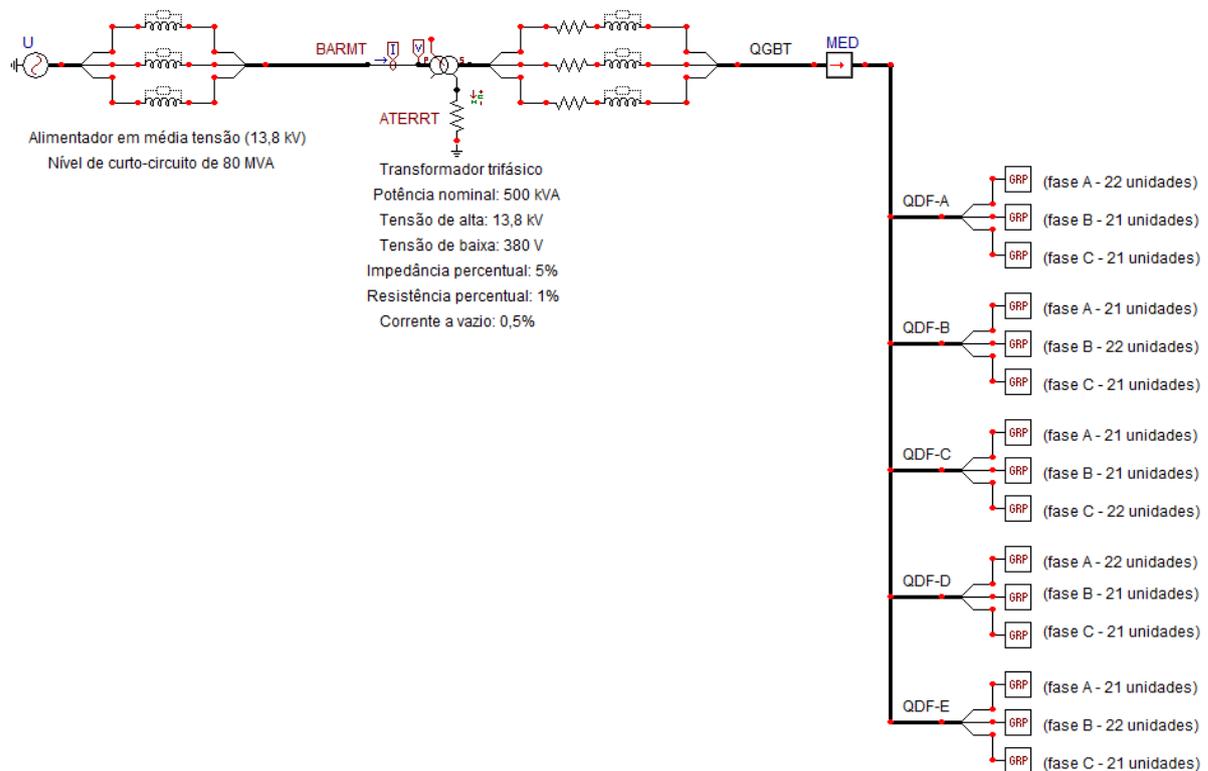


Figura 5.2 - Implementação computacional do forno micro-ondas industrial na plataforma ATP.

A modelagem consiste no agrupamento dos módulos emissores de micro-ondas em cinco barramentos distintos, localizados em seus respectivos quadros elétricos (QDF- A ao E). Cada quadro é responsável pela alimentação de 64 módulos emissores de micro-ondas distribuídos entre as fases A, B e C. Dessa forma, para a operação do forno industrial com carga nominal, sempre haverá um módulo a mais por fase em cada QDF, o que pode acarretar um pequeno desequilíbrio de corrente. Apesar da carga instalada em cada QDF ser desequilibrada, o que define, realmente, o desequilíbrio de corrente é o acionamento dos módulos, que pode ocorrer de forma aleatória devido à operação do processo industrial, tendo a probabilidade de haver uma quantidade maior de módulos acionados em uma das fases.

## 5.4 Estudos de casos

De forma a analisar o impacto do forno micro-ondas industrial na qualidade de energia elétrica, serão desenvolvidos quatro estudos de caso. O primeiro compreende o

comportamento em regime permanente do forno industrial com todos seus módulos de emissão de micro-ondas acionados e o secundário do transformador de potência solidamente aterrado em uma malha de aterramento de baixo valor ôhmico. Esse estudo permite verificar as características nominais do forno micro-ondas industrial, bem como, analisar os possíveis impactos desta carga na qualidade da energia elétrica do seu sistema de suprimento. Já no segundo e terceiro casos, um estudo semelhante será feito, considerando o secundário do transformador de potência solidamente aterrado em uma malha de aterramento de 1 e 10 ohms, respectivamente. Por fim, no quarto caso, será estudado o acionamento de alguns módulos monofásicos de tal forma que possa configurar um desequilíbrio de carga, verificando, também, a possibilidade de afetar a qualidade de sua energia elétrica de suprimento.

#### **5.4.1 Caso 1: Análise com a carga total em regime permanente ( $R_{malha} \cong 0\Omega$ )**

Dentro do exposto anteriormente, este primeiro caso estuda o comportamento do forno micro-ondas industrial desprezando o valor da malha de aterramento. A Figura 5.3 apresenta as correntes eficazes nas fases A, B e C do forno micro-ondas industrial, obtidas pela simulação computacional no programa ATP. Seus valores foram medidos no QGBT, considerando a carga total alimentada por esse painel. Percebe-se que com a totalidade das cargas energizadas, resulta em uma operação equivalente a um carregamento de 85% da potência aparente do transformador. Deve-se salientar que na fase C a corrente é ligeiramente inferior às outras fases, pois existe uma pequena distribuição desigual de módulos emissores de micro-ondas nas fases A, B e C.

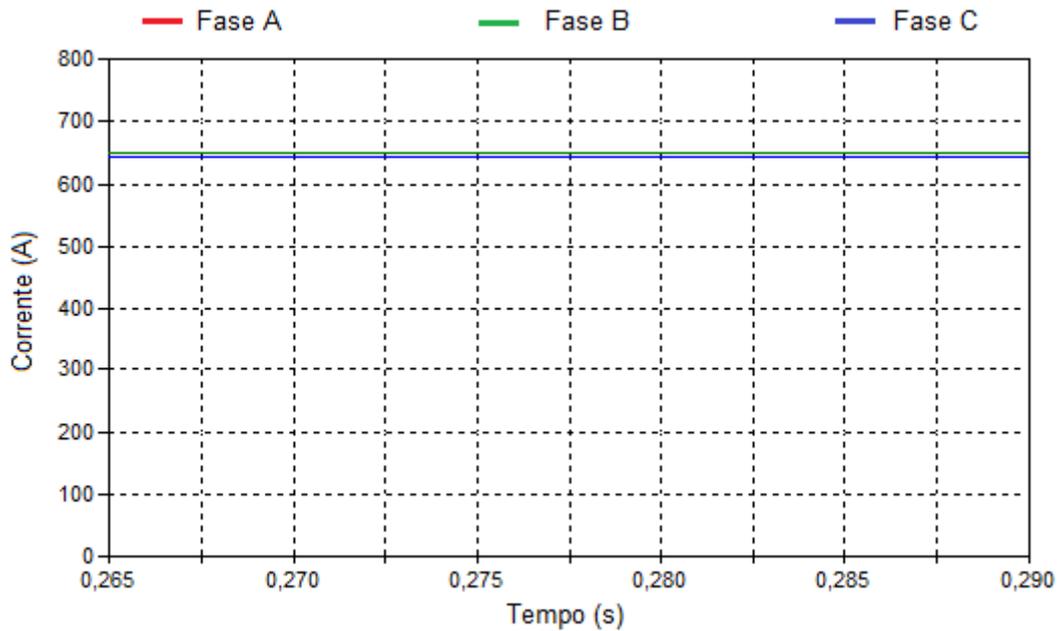


Figura 5.3 - Correntes eficazes nas fases A, B e C em condições nominais de operação - Caso 1.

Por outro lado, a forma de onda da corrente de alimentação no QGBT e seus espectros harmônicos podem ser observados nas Figuras 5.4 e 5.5, respectivamente.

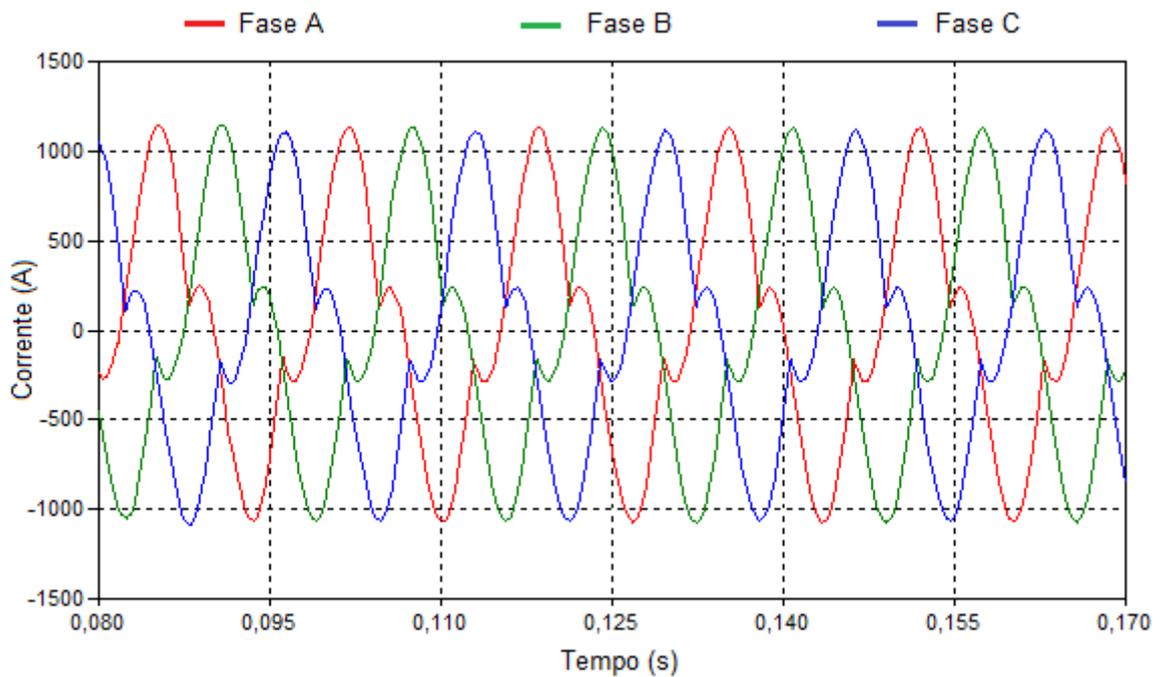


Figura 5.4 - Forma de onda da corrente total no QGBT - Caso 1.

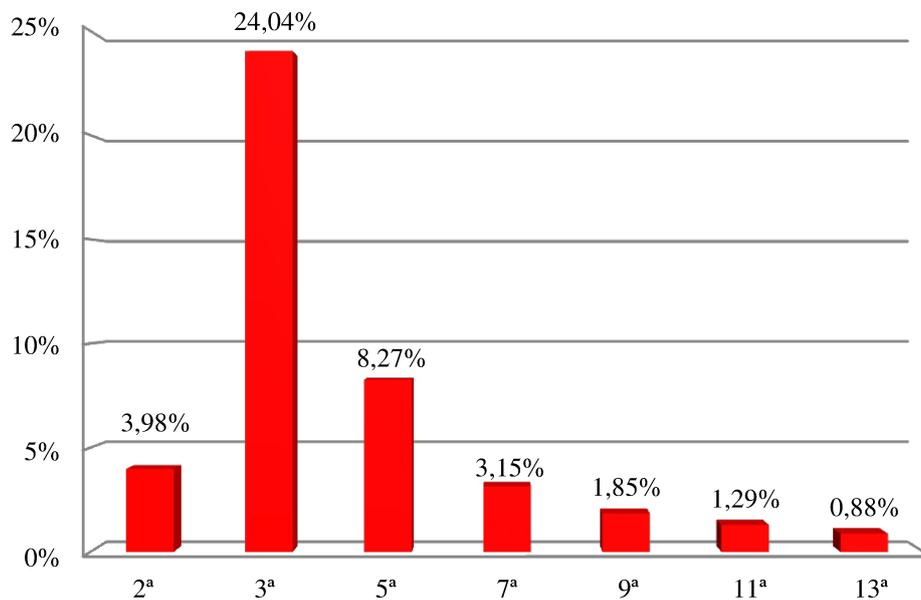


Figura 5.5 - Espectro harmônico da corrente total no QGBT - Caso 1.

Mais uma vez, ilustra-se na Figura 5.5 um elevado conteúdo harmônico de corrente de terceira ordem no forno micro-ondas industrial, obtendo uma distorção harmônica de corrente individual mais significativa e total de, respectivamente, 24,04% e 26,04%.

Apresenta-se na Figura 5.6 as formas de onda de tensão no barramento do QGBT.

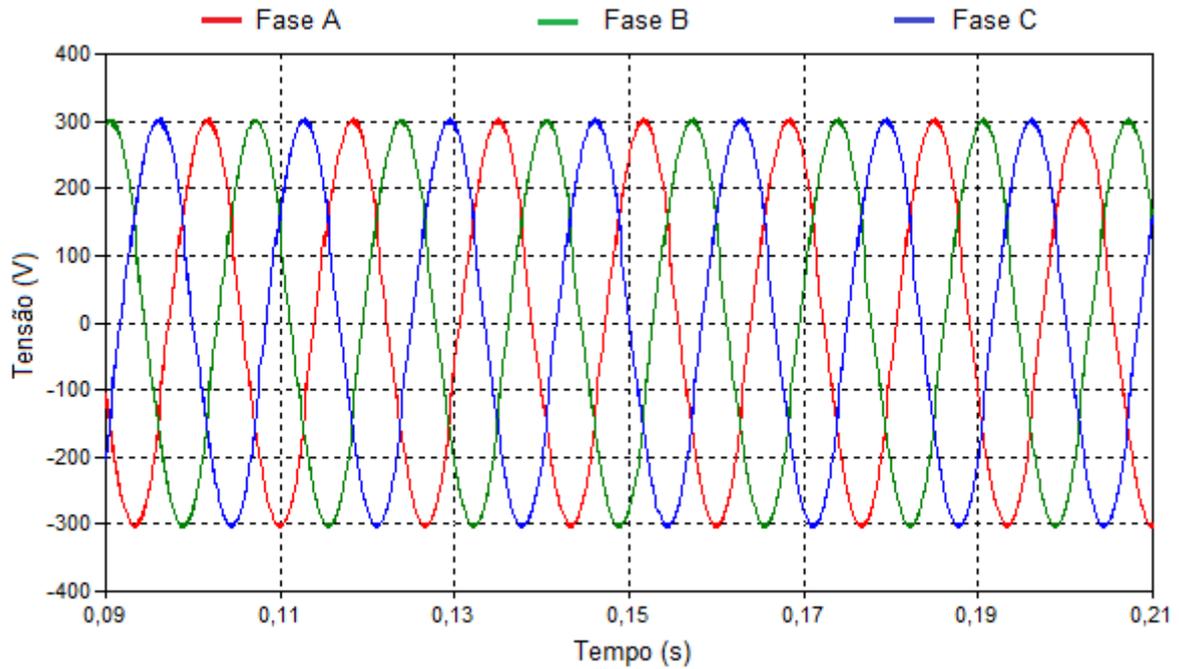


Figura 5.6 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 1.

Complementarmente, o espectro harmônico da tensão no QGBT pode ser identificado na Figura 5.7. Desta forma, a distorção harmônica total de tensão (DTT) é de 4,28%, sendo a terceira harmônica a mais significativa, a qual apresenta um valor de 3,24%.

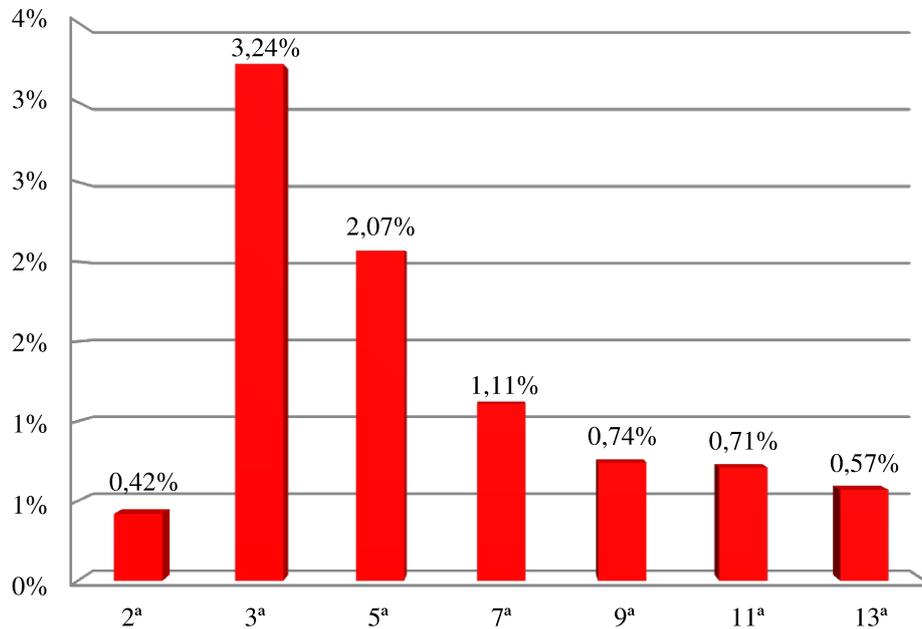
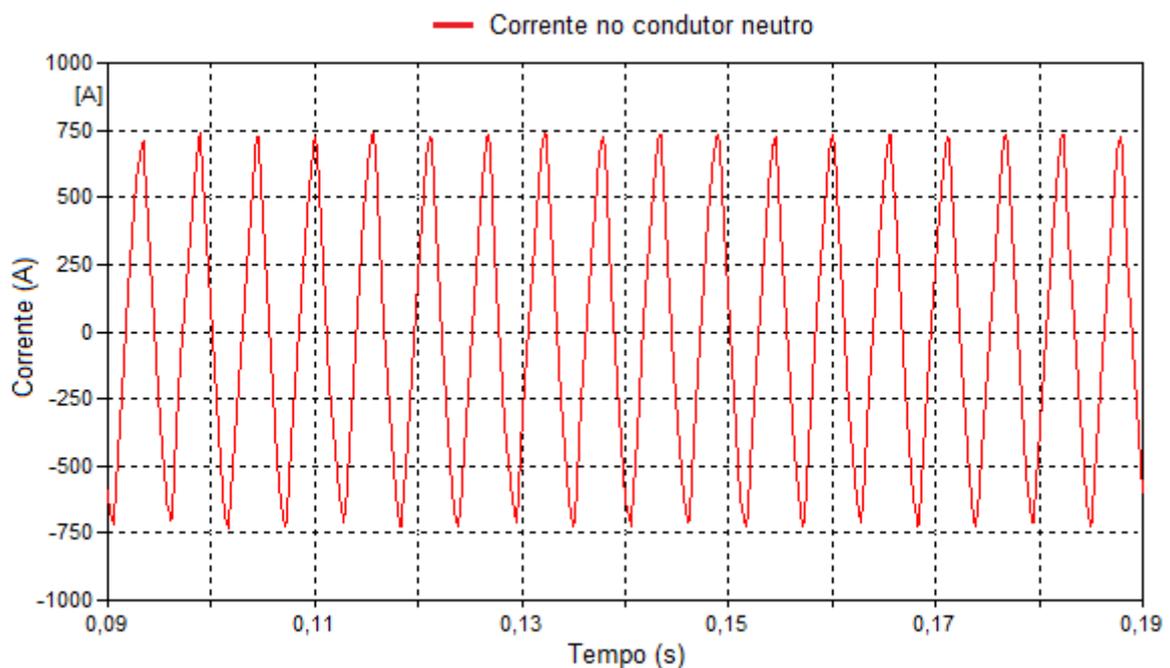


Figura 5.7 - Espectro harmônico da tensão no QGBT - Caso 1.

Com base nas informações obtidas anteriormente, analisa-se a seguir os valores encontrados sob as recomendações impostas pela legislação nacional vinculada com o tema qualidade de energia elétrica. No que se refere a orientações contidas em documentos sobre qualidade de energia elétrica no Brasil, o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em seu módulo 8, trata sobre valores de referência relacionados às distorções harmônicas. De acordo com a Tabela 3, Item 4 (Harmônicos), Seção 8.1 (Qualidade do Produto), do referido documento, o valor de referência para a distorção harmônica total de tensão (DTT) para barramentos com tensões nominais menores ou iguais a 1 kV é de 10%. Percebe-se que o valor da distorção harmônica total de tensão encontrado no barramento do QGBT (4,28%) se encontra dentro do valor de referência estabelecido no PRODIST. Já a Tabela 4, do mesmo item e seção mencionados anteriormente, estabelece os níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (DITH) em percentagem da tensão fundamental, sendo que o valor de referência estabelecido para a harmônica de terceira ordem é de 6,5 %, para tensões menores ou iguais a 1 kV. Percebe-se, mais uma vez,

que o nível de referência não é ultrapassado, visto que a tensão harmônica de terceira ordem obtida na simulação é de 3,24%.

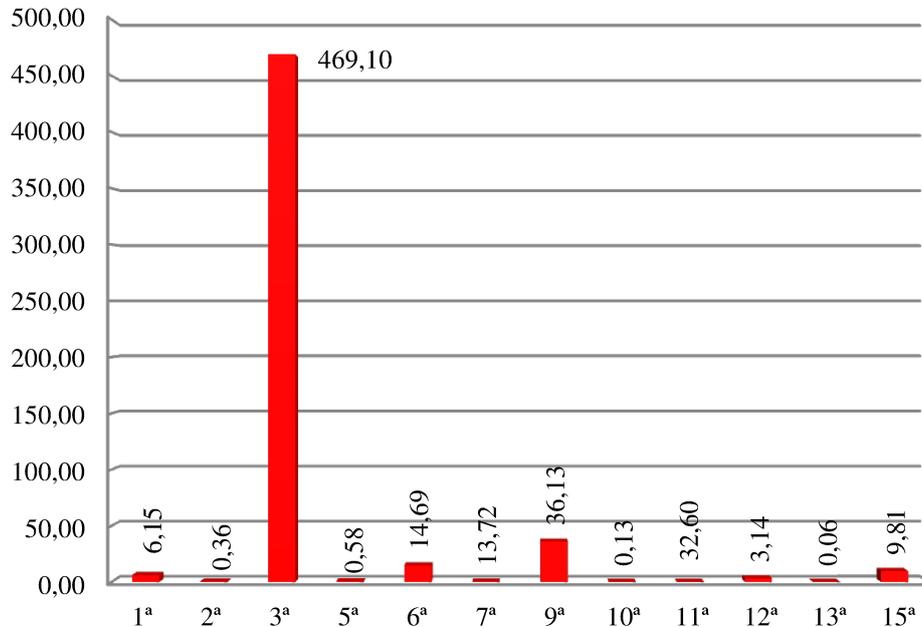
Ainda em relação ao elevado índice de distorções harmônicas de terceira ordem inerente aos módulos emissores de micro-ondas monofásicos, uma consideração especial é feita devido a seu sistema de suprimento em baixa tensão estar conectado a uma rede trifásica a quatro fios por meio de um transformador 13,8 $\Delta$  / 0,38Y kV. É sabido que as correntes harmônicas múltiplas de três podem ser representadas por componentes simétricas de sequência zero, e em um sistema trifásico equilibrado a quatro fios essas correntes se somam no condutor neutro, podendo assumir altos valores. Tal fato pode provocar uma sobrecarga no condutor neutro da instalação elétrica e em seus demais equipamentos, se não forem devidamente dimensionados para a situação anteriormente abordada. Dessa forma, a Figura 5.8 mostra a forma de onda da corrente no condutor neutro do alimentador do QGBT.



**Figura 5.8 - Forma de onda da corrente no condutor neutro do QGBT - Caso 1.**

Pode-se perceber que a forma de onda da corrente no condutor neutro apresenta uma frequência de 180 Hz, ou seja, a componente de terceira ordem é a componente mais significativa que se encontra nesse condutor, se sobrepondo às demais ordens que

se encontram presentes. Essa comprovação pode ser feita por meio do espectro harmônico de corrente no condutor neutro, apresentado na Figura 5.9.



**Figura 5.9 - Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do QGBT (valores eficazes em ampere) - Caso 1.**

Percebe-se, também, que, além da terceira ordem, as outras ordens harmônicas múltiplas de três apresentam valores maiores que as demais. Dessa forma, a corrente eficaz presente no condutor neutro é de 470,87 A, considerando todos os módulos emissores de micro-ondas ligados e um sistema com pouco desequilíbrio de carga. Assim, a grande parcela dessa corrente encontrada no condutor neutro se deve às distorções harmônicas de corrente múltiplas de três, sobretudo a corrente de terceira ordem.

A forma de conexão do transformador de 500 kVA da instalação tem um significativo impacto no fluxo das correntes harmônicas múltiplas de três no sistema elétrico. Devido a sua conexão  $13,8\Delta / 0,38Y$  kV, essas correntes de sequência zero presentes na conexão estrela (Y) do transformador são canceladas em sua conexão delta ( $\Delta$ ), impedindo-as de circularem para a linha, no lado de 13,8 kV do transformador. Esse efeito pode ser visto nas Figuras 5.10 e 5.11, em que a corrente no lado de média

tensão do transformador e seu espectro harmônico, respectivamente, são obtidos por meio de simulações no ATP.

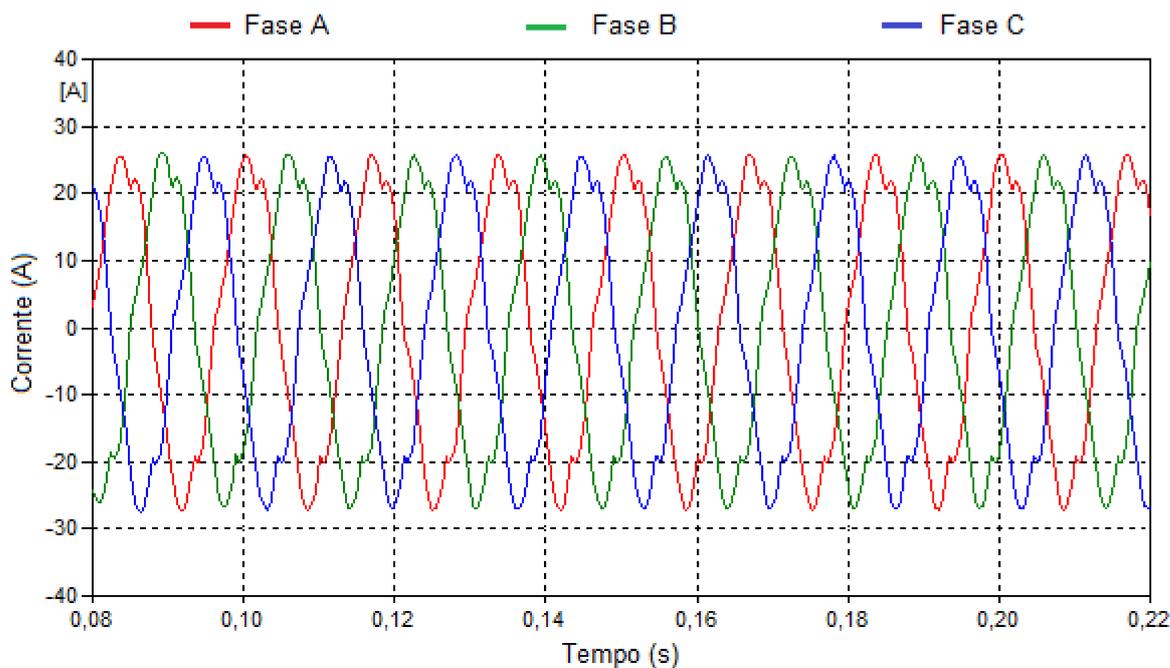


Figura 5.10 - Forma de onda da corrente no lado de MT do transformador - Caso 1.

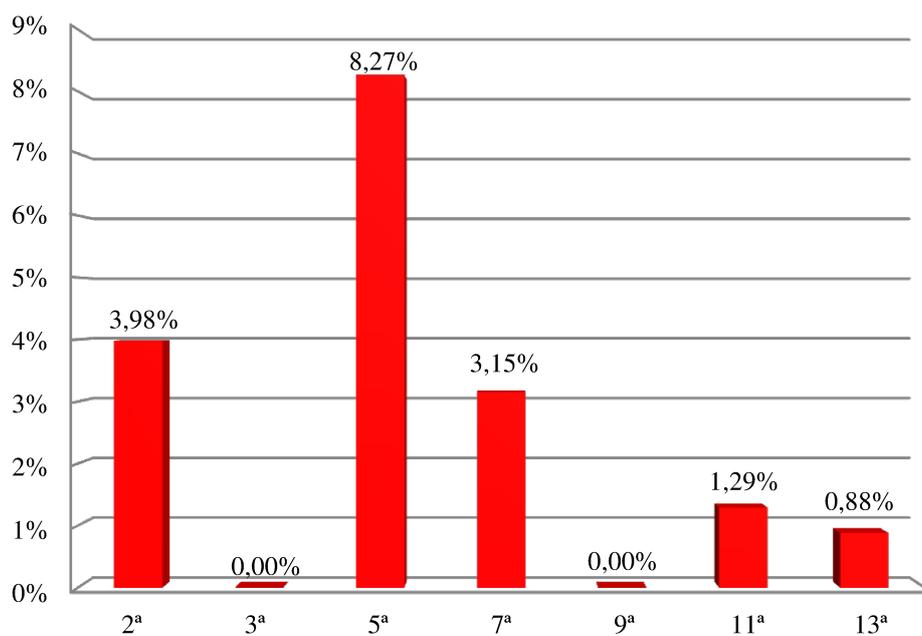


Figura 5.11 - Espectro harmônico da corrente no lado de MT do transformador - Caso 1.

Pode-se observar, então, que as harmônicas de corrente múltiplas de três foram consideravelmente atenuadas pelo fato de se ter uma conexão em delta ( $\Delta$ ) no primário do transformador. Uma comparação pode ser feita entre as Figuras 5.5 e 5.11, observando que as harmônicas de corrente não múltiplas de três apresentam praticamente os mesmos valores percentuais no alimentador de baixa e alta tensão, enquanto suas componentes de sequência zero foram praticamente anuladas. Dessa forma, a distorção harmônica total de corrente (DHTi) passou de 26,04, na baixa tensão, para 9,88% na média tensão.

Por fim, nas Figuras 5.12 e 5.13, apresentam-se, respectivamente, as formas de onda da tensão e seu espectro harmônico, obtidos na média tensão.

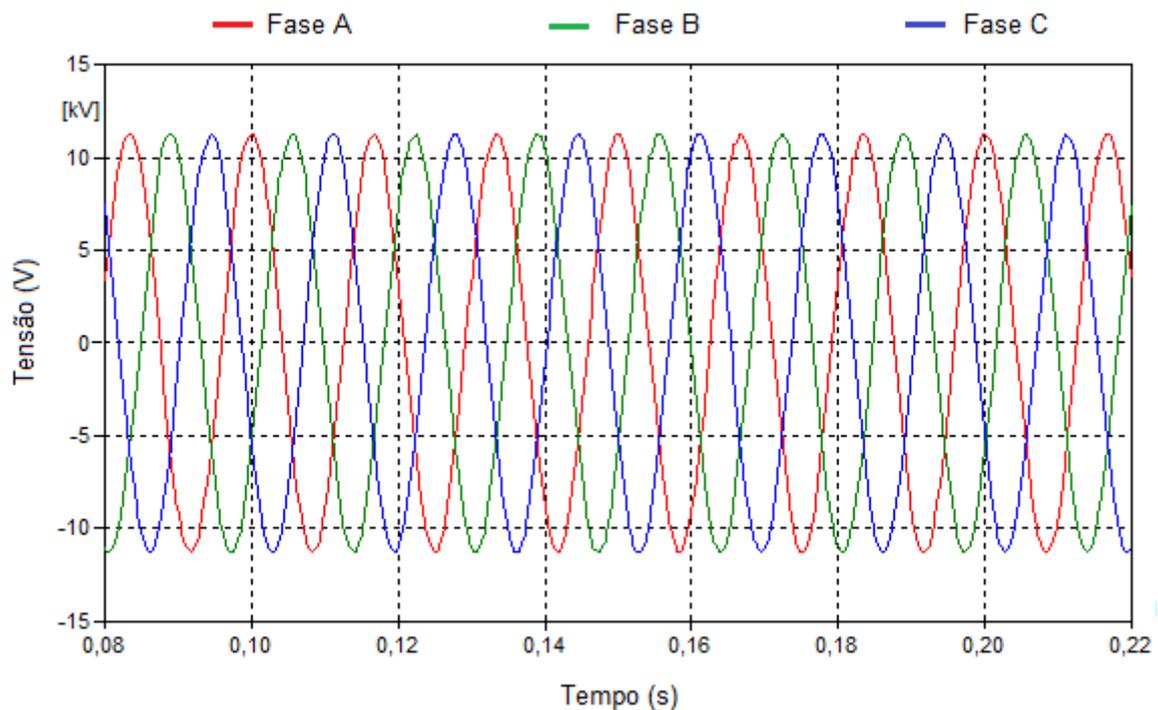


Figura 5.12 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 1.

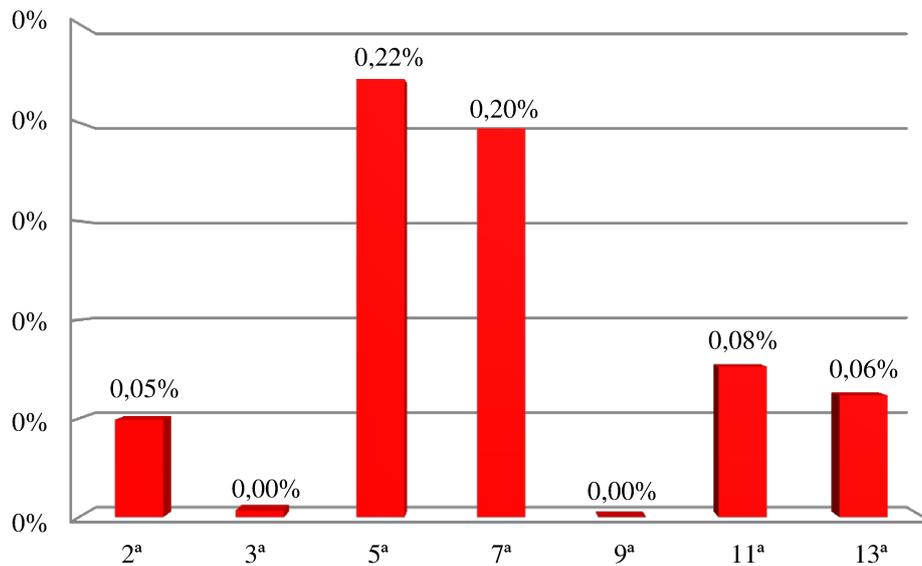


Figura 5.13 - Espectro harmônico da tensão no lado de MT do transformador - Caso 1.

Observa-se que a forma de onda de tensão no lado de média tensão do transformador se apresenta praticamente senoidal, refletindo, então, em seu espectro harmônico, que apresenta valores próximos de zero.

De uma forma semelhante ao que foi realizado no lado de baixa tensão, os valores obtidos são comparados com os valores de referência estabelecidos no PRODIST (módulo 8). De acordo com a Tabela 3 do referido documento, a qual já foi utilizada nessa seção, a distorção harmônica total de tensão (DTT) para barramentos com tensões nominais maiores que 1 kV e menores ou iguais a 13,8 kV é de 8%, enquanto o valor obtido na simulação é de 0,29 %. Da mesma forma, nenhuma distorção harmônica individual de tensão (DITH) excede os valores de referências estabelecidos na Tabela 4 do PRODIST (módulo 8).

Observa-se, então, nesse estudo de caso, que, apesar das elevadas distorções harmônicas de corrente totais e de terceira ordem obtidas no barramento de baixa tensão do forno micro-ondas industrial o mesmo efeito não é refletido para o barramento de média tensão. No que se refere a distorções harmônicas de tensão, tanto os valores obtidos no lado de baixa tensão quanto na média tensão do transformador se encontram dentro dos valores de referência estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, ao se desprezar a resistência da malha de aterramento.

### **5.4.2 Caso 2: Análise com a carga total em regime permanente ( $R_{malha} = 1\Omega$ )**

O primeiro estudo de caso, devido a fins didáticos, apresenta o comportamento do forno micro-ondas industrial desprezando o valor da malha de aterramento. Conforme visto na seção anterior, o forno micro-ondas industrial apresenta elevadas correntes de terceira harmônica e suas múltiplas. Essas correntes de sequência zero presentes no sistema trifásico a quatro fios com transformador  $\Delta / Y$  aterrada, circulam pelo condutor neutro e pela malha de aterramento, causando uma queda de tensão nesse ponto, podendo interferir nas tensões de fase do sistema. Devido a esse fato, o segundo e o terceiro estudos de caso têm por objetivo, investigar a influência do valor da malha de aterramento frente às harmônicas características do forno micro-ondas industrial, além de avaliar seus impactos na qualidade de energia elétrica de suprimento. Ressalta-se ainda que as simulações apresentadas nesta seção contemplam apenas os resultados referentes às tensões, devido ao PRODIST tratar apenas dos valores de referência estabelecidos para distorções de tensão.

Dessa forma, a Figura 5.14 apresenta as formas de onda de tensão no barramento do QGBT considerando uma malha de aterramento de valor igual a 1 ohm. Complementarmente, seu espectro harmônico pode ser visto na Figura 5.15.

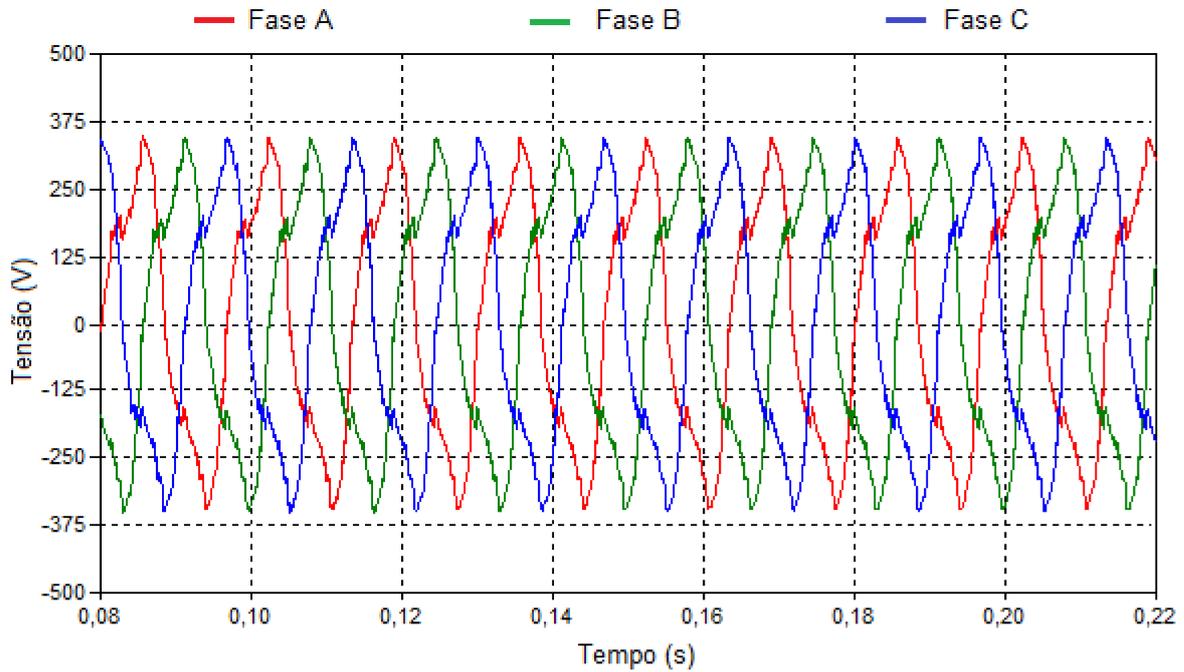


Figura 5.14 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 2.

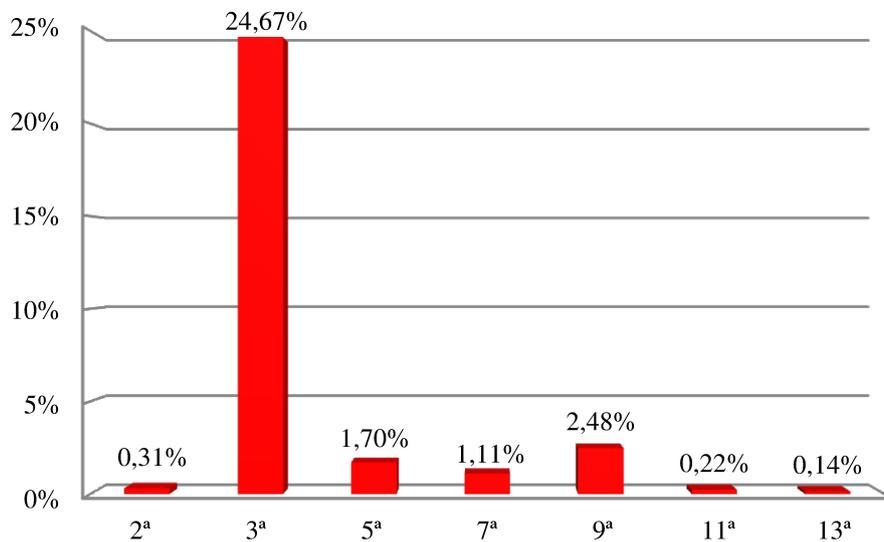


Figura 5.15 - Espectro harmônico da tensão no QGBT - Caso 2.

Com base nas figuras exibidas anteriormente, percebem-se elevados valores nas distorções das tensões de fase, configurando uma distorção harmônica total de tensão (DTT) de 25,13%, sendo a terceira ordem a mais significativa, apresentando valor de 24,67%.

Os resultados obtidos para as tensões de fase demonstram a grande influência da resistência da malha de aterramento na presença das correntes de sequência zero inerentes ao forno micro-ondas industrial. Diferentemente do caso 1 estudado, o valor da distorção harmônica total (DTT) de tensão encontrado no barramento do QGBT se encontra acima dos 10% estabelecidos no PRODIST para tensões nominais menores ou iguais a 1 kV. Da mesma forma, a distorção harmônica de terceira ordem também ultrapassa o valor de referência de 6,5% do referido documento.

A Figura 5.16 mostra a forma de onda da tensão obtida no lado de média tensão do transformador de potência. Conforme observado na seção anterior, as tensões no lado  $\Delta$  do transformador não apresentam componentes de sequência zero. Como as distorções de correntes e tensões mais significativas presentes na lado de baixa tensão eram as de sequência zero, as tensões obtidas no primário são praticamente senoidais, apresentando distorção harmônica total (DTT) de 0,2%. Portanto, os valores presentes na média tensão se encontram bem abaixo dos valores de referência do PRODIST (módulo 8).

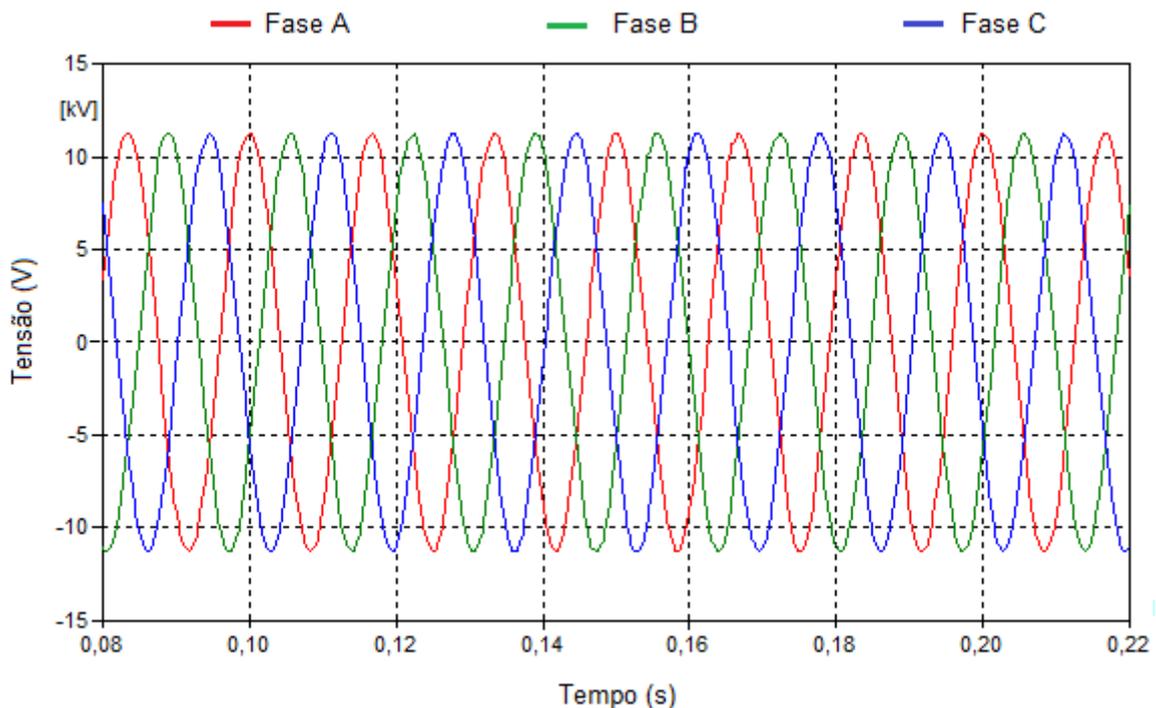


Figura 5.16 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 2.

Percebe-se, com base no segundo estudo de caso, que a resistência da malha de aterramento influencia significativamente na qualidade da tensão obtida no barramento de baixa tensão do forno micro-ondas industrial, excedendo valores de referências estabelecidos no módulo 8 do PRODIST. Apesar de ter apresentado elevados valores de distorções harmônicas de tensão na baixa tensão, os valores refletidos para o lado de média tensão são praticamente insignificantes, não provocando impactos na qualidade da energia elétrica de suprimento da concessionária e nem excedendo os valores estabelecidos no PRODIST.

### **5.4.3 Caso 3: Análise com a carga total em regime permanente ( $R_{malha} = 10\Omega$ )**

Assim como no segundo estudo de caso, este terceiro estudo contempla as simulações com a presença da resistência da malha de aterramento. As simulações se assemelham bastante com as apresentadas na seção anterior, porém, o valor da resistência da malha de aterramento para este caso é de 10 ohms, valor tipicamente encontrado nas normas e documentos de referência para malha de aterramento das concessionárias brasileiras. Adicionalmente, o valor estabelecido para este terceiro caso pode servir de parâmetro de comparação com o caso anterior na avaliação dos impactos na qualidade de energia elétrica.

Dessa forma, a Figura 5.17 apresenta as formas de onda de tensão no barramento do QGBT considerando a malha de 10 ohms anteriormente mencionada. Já seu espectro harmônico é ilustrado na Figura 5.18.

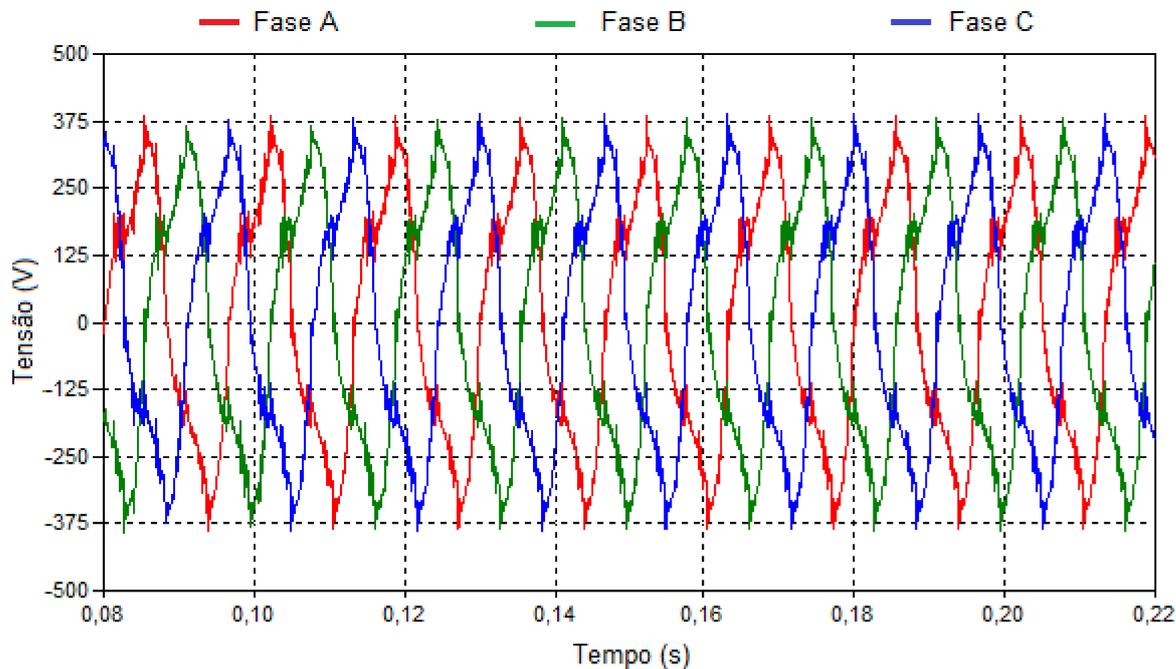


Figura 5.17 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 3.

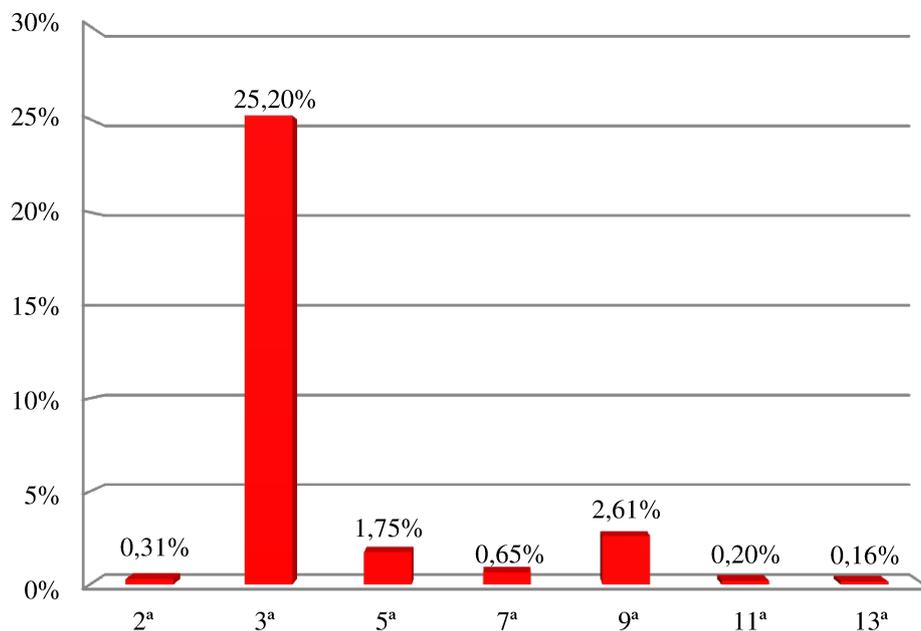
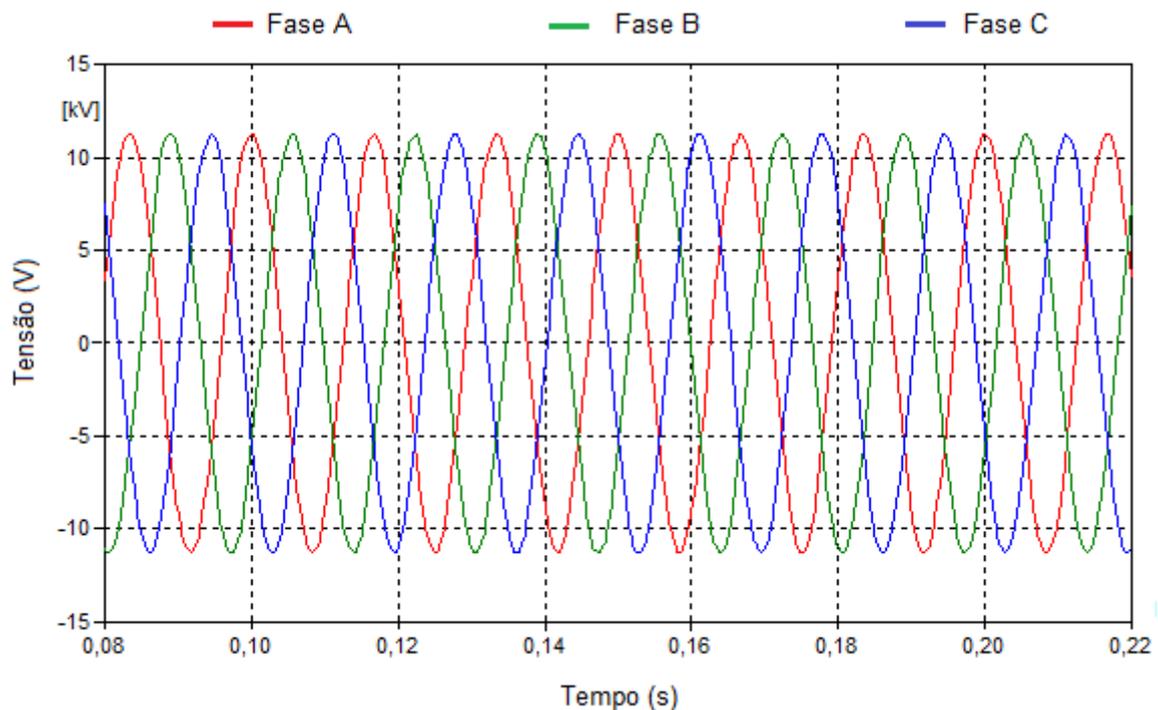


Figura 5.18 - Espectro harmônico da tensão no QGBT - Caso 3.

Mais uma vez percebem-se elevados valores nas distorções das tensões de fase, configurando uma distorção harmônica total de tensão (DTT) de 25,83%, sendo a terceira ordem a mais significativa, apresentando valor de 25,2%.

Conforme visto no estudo de caso 2, os resultados obtidos demonstram a grande influência da resistência da malha de aterramento nas distorções harmônicas nas tensões de fase. Outro detalhe que pode ser observado é a pequena variação encontrada entre os resultados para a malha de aterramento de 1 e 10 ohms. Novamente, o valor da distorção harmônica total (DTT) de tensão encontrado no barramento do QGBT se encontra acima dos 10% estabelecidos no PRODIST para tensões nominais menores ou iguais a 1 kV, assim como a distorção harmônica de terceira ordem também ultrapassa o valor de referência de 6,5% .

A Figura 5.19 mostra a forma de onda da tensão obtida no lado de média tensão do transformador de potência. Outra vez, as tensões encontradas no primário se apresentam praticamente senoidais, com distorção harmônica total (DTT) de 0,2%, encontrando-se abaixo dos valores de referência estabelecidos pelo PRODIST.



**Figura 5.19 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 3.**

Constata-se que, baseado nas respostas das simulações, não houve grandes divergências nas respostas entre as resistências de 1 e 10 ohms e que um pequeno valor de resistência de aterramento já é suficiente para causar distorções harmônicas nas

tensões de fase. Devido à semelhança de resultados, as demais conclusões verificadas para o segundo estudo de caso se aplicam para o caso 3.

#### 5.4.4 Caso 4: Análise com a carga desequilibrada

O controle de potência e temperatura do forno micro-ondas industrial estudado é feito por meio da modulação do acionamento de suas unidades monofásicas. Assim, um sistema de controle manipula a quantidade de módulos emissores de micro-ondas que estarão ligados naquele momento, bem como seu período de tempo. Essa situação operativa causa o acionamento dos módulos monofásicos de forma aleatória, podendo gerar um desequilíbrio de carga se o carregamento de uma das fases for maior. Desse modo, este quarto estudo de caso visa avaliar se a operação do forno micro-ondas industrial com desequilíbrio de carga pode afetar sua qualidade de energia elétrica de suprimento.

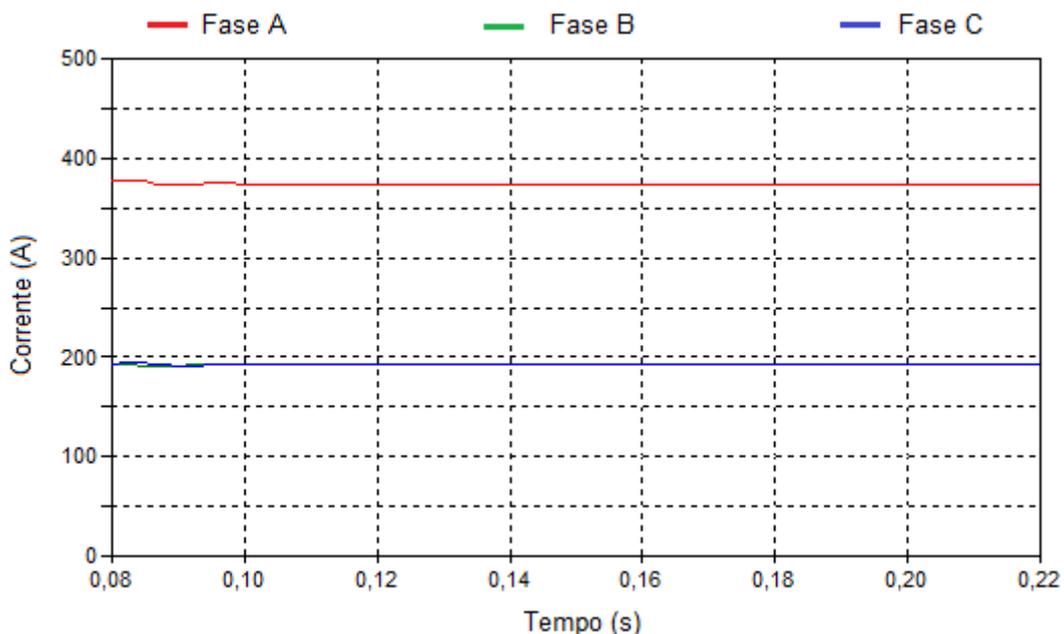
O acionamento dos módulos emissores de micro-ondas é feito por meio de chaves contadoras tetrapolares localizadas nos QDFs. Em cada um dos polos de uma chave contadora é conectado um módulo monofásico, totalizando quatro módulos por chave, cujas fases de alimentação são distribuídas de forma alternada (A, B, C e A para a primeira chave, por exemplo). A Figura 5.20 mostra um esboço da condição operativa utilizada neste estudo de caso, em que são apresentados os 64 módulos presentes em um QDF e suas respectivas fases de alimentação.

Figura 5.20 - Condição operativa dos módulos emissores de micro-ondas de um QDF. A cor vermelha representa o módulo ligado e a cor verde representa o módulo desligado.

Os módulos representados na cor vermelha são considerados em operação e os módulos representados na cor verde são considerados desligados. A figura apresentada

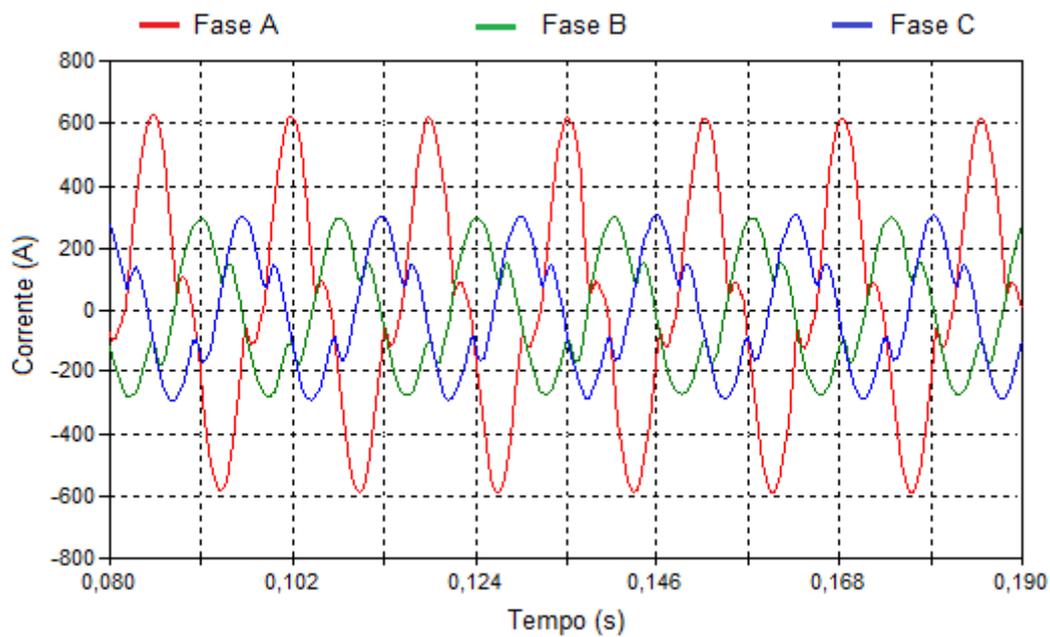
supõe um caso com o acionamento de seis chaves contadoras configurando um carregamento maior da fase A (12 módulos na fase A, 6 módulos na fase B e 6 módulos na fase C). Para o estudo feito nesta seção, essa mesma configuração é repetida para os demais QDFs, totalizando 60 módulos na fase A, 30 módulos na fase B e 30 módulos na fase C. O valor da resistência da malha de aterramento considerado nas simulações é de 0,1 ohm, pois, conforme visto nas seções anteriores, o aumento da resistência de aterramento influencia significativamente na distorção das tensões de fase na baixa tensão. Ressalta-se, ainda, que as simulações foram feitas em diversas condições, porém, como o propósito dessa seção é apresentar os efeitos dos desequilíbrios no sistema, o valor da resistência considerada foi definida de tal forma que não interferisse tanto na análise dos desequilíbrios propriamente ditos e, ainda, mantivesse os efeitos intrínsecos ao forno micro-ondas industrial estudado.

A Figura 5.21 apresenta as correntes eficazes nas fases A, B e C do QGBT na situação anteriormente mencionada, obtidas pela simulação computacional no ATP. Observa-se, então, o maior carregamento na fase A.



**Figura 5.21 - Correntes eficazes nas fases A, B e C em condições de desequilíbrio de carga - Caso 4.**

Da mesma maneira, a forma de onda da corrente de alimentação no QGBT pode ser observada na Figura 5.22.



**Figura 5.22 - Forma de onda da corrente total no QGBT - Caso 4.**

Mais uma vez, é verificada a elevada corrente na fase A, configurando um desequilíbrio de corrente ( $I_- / I_+$ ) de 27%. Esse desequilíbrio de corrente na fase A provoca, também, uma queda de tensão maior nessa fase. Tal fato é evidenciado na Figura 5.23, que apresenta a forma de onda de tensão obtida no QGBT.

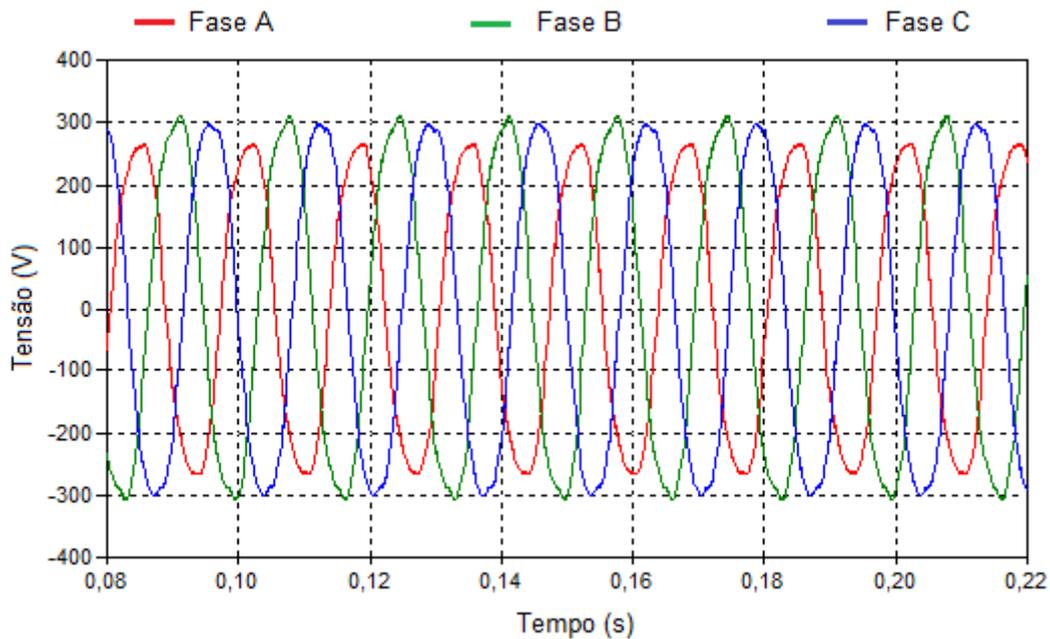
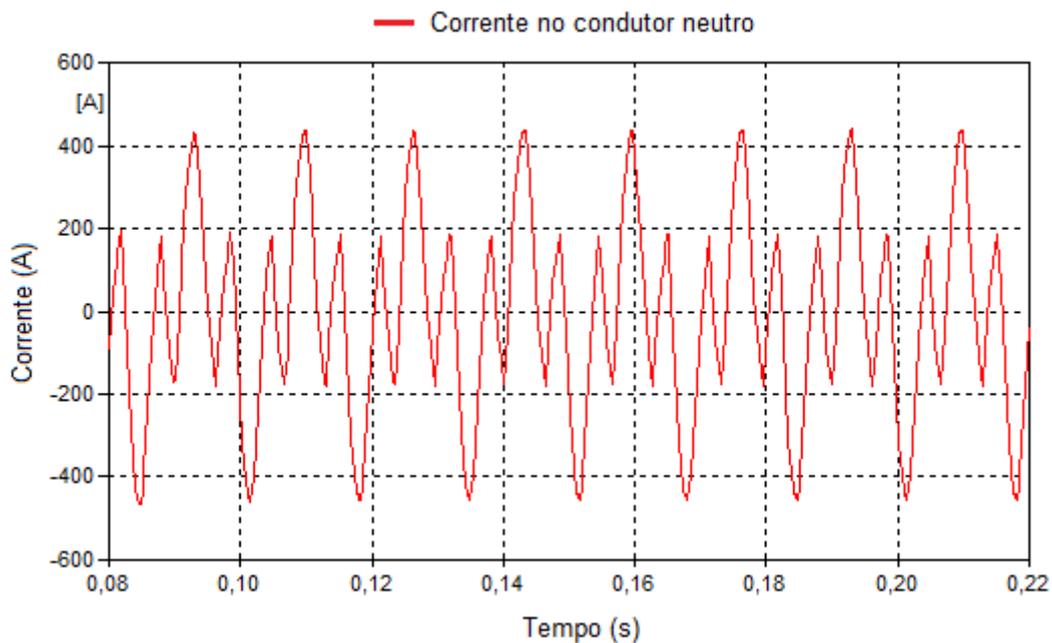


Figura 5.23 - Forma de onda da tensão no QGBT - Caso 4.

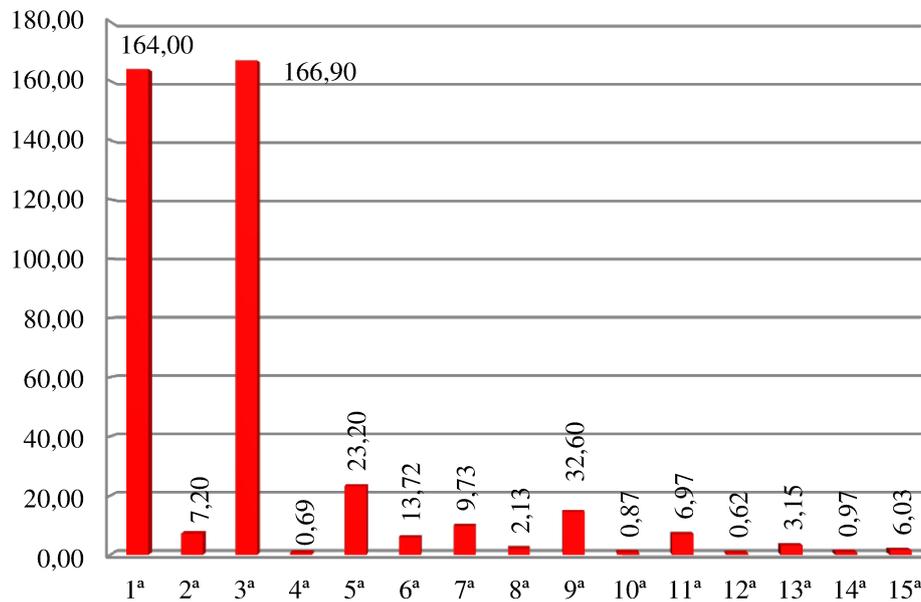
Assim como feito para os estudos de caso anteriores, os valores de desequilíbrio encontrados neste segundo estudo são comparados com os valores de referência estabelecidos no módulo 8 do PRODIST. Em sua Seção 8.1, Item 5, é estabelecido o valor de referência de 2% para desequilíbrios de tensão nos barramentos do sistema de distribuição em média tensão. Porém, por não haver um valor de referência específico para barramentos de baixa tensão, o mesmo valor foi considerado para esse caso. De qualquer forma, o valor do desequilíbrio de tensão ( $V^- / V^+$ ) calculado para o barramento do QGBT foi de 0,09%, mostrando que as tensões obtidas se encontram em conformidade com o PRODIST. Ressalta-se que as metodologias de cálculo presentes nesse documento são baseados na relação entre as tensões de sequência negativa e positiva. Porém, devido à presença das componentes harmônicas múltiplas de três no forno micro-ondas industrial, sua tensão apresenta considerável valor de componentes de sequência zero que não são contempladas nos cálculos. Já a norma IEC 61000-4-30 aborda sobre desequilíbrios de tensão contemplando, além das componentes de sequência negativa, as componentes de sequência zero. Ao considerá-las, o fator de desequilíbrio ( $V_0 / V^+$ ) encontrado foi de 7,44%, justificando, assim, a discrepância entre os valores de tensão obtidos analisando visualmente as formas de

onda de tensão e o fator de desequilíbrio calculado considerando apenas as componentes de sequência negativa e positiva.

No estudo de caso 1, foi apresentada a corrente no condutor neutro considerando a carga praticamente equilibrada e apenas o efeito das distorções harmônicas inerentes ao forno micro-ondas industrial. Este caso, por sua vez, apresenta os efeitos das distorções harmônicas inerentes ao equipamento, adicionalmente ao considerável desequilíbrio de carga. Assim, as Figuras 5.24 e 5.25 ilustram a forma de onda da corrente no condutor neutro do alimentador do QGBT e seu espectro de frequências, respectivamente.



**Figura 5.24 - Forma de onda da corrente no condutor neutro do QGBT - Caso 4.**



**Figura 5.25 - Espectro harmônico da corrente no condutor neutro do QGBT (valores eficazes em ampere) - Caso 4.**

Diferentemente do primeiro caso, a corrente no condutor neutro apresenta um valor significativo para a componente fundamental, devido ao desequilíbrio de carga imposto. A corrente eficaz presente nesse condutor apresenta o valor de 236,11 A, ou seja, valor superior às correntes que circulam nos condutores da fase B e C (aproximadamente 200 A).

As Figuras 5.26 e 5.27 mostram as formas de onda de corrente no primário do transformador e seu espectro harmônico, respectivamente.

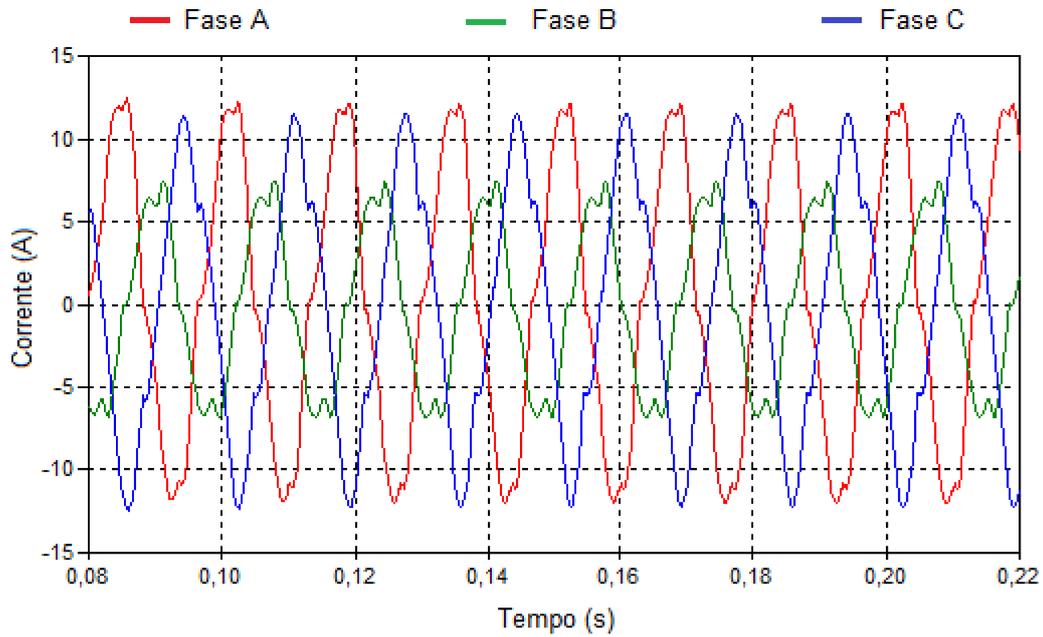


Figura 5.26 - Forma de onda da corrente no lado de MT do transformador - Caso 4.

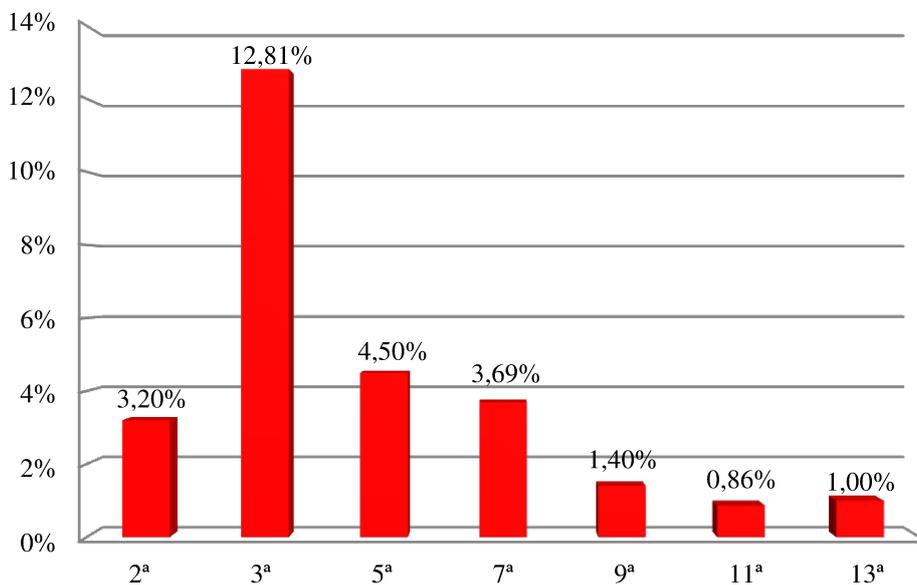
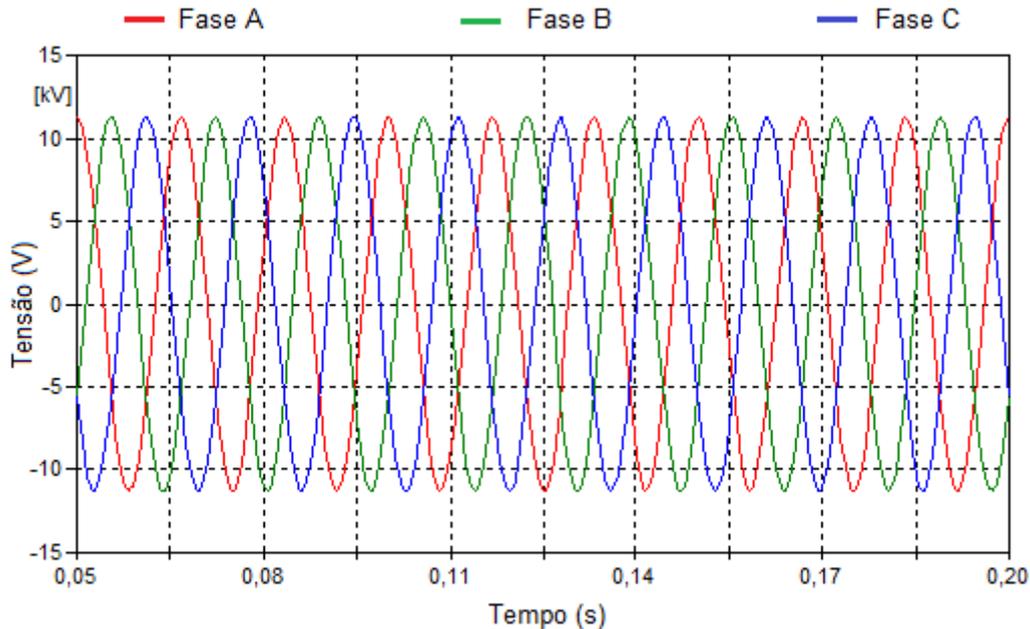


Figura 5.27 - Espectro harmônico da corrente no lado de MT do transformador - Caso 4.

Como as correntes harmônicas múltiplas de três em um sistema desequilibrado podem assumir componentes que não a de sequência zero, o fato de ter um transformador  $\Delta / Y$  não evita a presença de harmônicas de terceira ordem no lado de conexão  $\Delta$  de média tensão do transformador, conforme pode ser visto no espectro

harmônico de corrente da figura anterior. O fator de desequilíbrio da corrente na média tensão é de 18,9%.

Por fim, na Figura 5.28, apresenta-se as formas de onda da tensão obtidos na média tensão.



**Figura 5.28 - Forma de onda da tensão no lado de MT do transformador - Caso 4.**

Pode-se perceber que a forma de onda de tensão no lado de média tensão do transformador se apresenta de forma senoidal e com valores praticamente iguais entre as fases. Dessa forma, no que se refere aos valores de referência estabelecidos no Item 5 do módulo 8 do PRODIST, pode-se concluir que o fator de desequilíbrio de tensões na média tensão é praticamente nulo e não ocasionará em problemas para o sistema elétrico.

Observa-se, então, nesse último estudo de caso, que, apesar da diferença de tensão encontrada entre as fases A, B e C do QGBT, seu fator de desequilíbrio, segundo prescrições contidas no PRODIST, estão dentro de seus padrões de referência, uma vez que são consideradas apenas as componentes de sequência negativa e positiva. Dessa forma, segundo a referida normalização, os valores de desequilíbrio de tensão

encontrados tanto na baixa tensão quanto na média tensão estão abaixo do valor de referência de 2%.

## 5.5 Considerações finais

Este capítulo contemplou um estudo sobre o impacto de um forno micro-ondas industrial real de elevada potência na qualidade da energia elétrica por meio de implementação e simulações computacionais na plataforma ATP. Para isso, foi representado o sistema elétrico em que o forno industrial é inserido, baseado em seu diagrama unifilar, juntamente com os módulos emissores de micro-ondas monofásicos distribuídos ao longo das fases A, B e C. Seus resultados foram obtidos por meio de estudos de caso considerando o forno micro-ondas industrial operando com todos módulos monofásicos ligados, em regime permanente, com diferentes valores de resistência de aterramento, e, também, considerando o forno com carga desequilibrada, provocada pela operação de uma quantidade maior de módulos na fase A. Destaca-se que várias simulações foram feitas em diversas condições de operação do forno micro-ondas industrial, porém, buscando objetividade, apenas alguns casos foram apresentados nessa dissertação.

Percebe-se que os resultados das simulações são bastante influenciados pela resistência de aterramento. Pode-se observar que no primeiro caso, em que a resistência de aterramento é desprezada, há uma pequena distorção harmônica presente nas tensões de fase do QGBT, quando comparada com as distorções das tensões dos casos 2 e 3, em que as resistências de aterramento são 1 e 10 ohms, respectivamente. Nesses dois últimos casos mencionados, as distorções harmônicas de tensão, tanto total (DTT) quanto de terceira ordem (DIT<sub>3</sub>), apresentaram valores superiores aos níveis de referência estabelecidos no módulo 8 do PRODIST.

De forma geral, equipamentos alimentados por tensões harmônicas altas apresenta um grande aumento em suas perdas, o que leva à uma redução considerável de sua vida útil. Ainda, alguns equipamentos de controle, como PLCs, podem apresentar mau funcionamento ou até provocar a parada de equipamentos importantes em um processo produtivo.

Muito embora as distorções de tensão encontradas na baixa tensão serem elevadas, ao se avaliar as tensões no primário do transformador, o mesmo não ocorre, apresentando valores de distorções de tensão bem baixos. Isso se deve à conexão  $\Delta$  no primário do transformador, que anula as componentes de sequência zero que estavam presentes na conexão Y do secundário.

Outro efeito observado nos resultados das simulações computacionais está relacionado com os altos valores de corrente encontradas no condutor neutro, visto que as harmônicas de corrente de sequência zero irão circular por esse condutor. Com isso, um cuidado especial é necessário no dimensionamento do condutor neutro e dos demais componentes das instalações elétricas que apresentam esse efeito. No que se refere à normalização brasileira sobre esse assunto, a ABNT NBR 5410 apresenta as prescrições relacionadas ao dimensionamento de condutores e equipamentos em instalações sujeitas à essas condições. Dentro do exposto, simulações computacionais se mostram como excelente ferramenta no auxílio aos projetistas no dimensionamento de instalações elétricas.

No que se refere ao último caso estudado, baseado nas prescrições estabelecidas no PRODIST para desequilíbrio de tensão, os resultados obtidos das simulações se mostraram satisfatórios. Porém, o método de cálculo do fator de desequilíbrio de tensão no referido documento é baseado nas tensões de sequência positiva e negativa. Por outro lado, sabe-se que as componentes de sequência zero estão fortemente presentes nos resultados obtidos para o forno micro-ondas industrial, e que não são considerados nos cálculos, podendo trazer uma interpretação errônea do desequilíbrio de tensão real encontrado. Ressalta-se que, diferentemente do PRODIST, a norma IEC 61000-4-30 aborda sobre o cálculo de desequilíbrio de tensão baseado nas componentes de sequência zero ( $V_0 / V_+$ ).

# CAPÍTULO VI

---

## Conclusões gerais

Apesar dos comentários e considerações finais apresentados em cada capítulo desta dissertação, esta última seção tem o objetivo de sintetizar os principais pontos abordados, seus resultados mais significativos e principais contribuições, de maneira a proporcionar ao leitor uma visão completa das atividades desenvolvidas. Por fim, destacam-se, ainda, algumas sugestões para pesquisas futuras.

O capítulo 1 apresentou uma contextualização dos temas principais deste trabalho, abordando, em linhas gerais, a importância da qualidade de energia elétrica e sua relação com as concessionárias e consumidores. Em seguida ressalta-se a importância dos Módulos 8 e 9 do PRODIST, além da norma ABNT NBR 5410, relacionando os problemas de qualidade de energia elétrica e o desempenho de equipamentos frente a esses distúrbios. Dentro desse contexto, é abordada a importância das ferramentas computacionais no auxílio às análises por meio de modelagens e simulações. Na sequência, foi apresentado o estado da arte, no qual os principais resultados das pesquisas bibliográficas são expostos. Ainda, a partir da consulta à literatura, ficaram evidenciadas as lacunas e carências no campo da representação de fornos micro-ondas no contexto da qualidade de energia elétrica. Dessa forma, o capítulo é finalizado após a descrição das principais contribuições deste trabalho e a estrutura completa da dissertação.

O capítulo 2 abordou, primeiramente, as considerações gerais sobre as micro-ondas e o princípio de transformação da energia eletromagnética em calor. Em seguida, suas principais aplicações são destacadas, compreendendo fornos domésticos e industriais para os mais diversos fins, apresentando, em alguns casos, várias vantagens

em relação aos métodos convencionais de aquecimento. Sua composição e princípio de funcionamento são abordados, tendo como principais componentes o transformador de alta tensão, o circuito dobrador de tensão, composto por um capacitor e um diodo de alta tensão, e a válvula magnétron, responsável pela emissão das micro-ondas eletromagnéticas. Destaca-se, nesse capítulo, a grande quantidade de informações sobre fornos micro-ondas, tanto no que se refere às partes elétricas constituintes, quanto aos seus demais componentes mecânicos, de controle, proteção, segurança e características operacionais gerais.

No capítulo 3, foram identificados os principais componentes do forno micro-ondas em estudo, assim como suas características técnicas, a fim de se obter um modelo elétrico representativo. Em seguida, é feita a modelagem matemática e implementação computacional no programa ATP de cada um dos componentes do circuito elétrico principal do forno micro-ondas. Por fim, os modelos desenvolvidos são integrados para a representação do forno micro-ondas doméstico como um todo. Por questões de facilidade para o leitor, os resultados das simulações computacionais foram apresentados no capítulo 4, em que puderam ser comparados diretamente com os resultados oriundos dos ensaios laboratoriais. As principais contribuições desse capítulo estão relacionadas com a implementação computacional, no domínio do tempo, de um forno micro-ondas doméstico, contemplando tanto seus aspectos de entrada quanto suas características internas.

No capítulo 4, os esforços foram concentrados na validação do modelo computacional do forno micro-ondas em condições ideais e não ideais de suprimento. Iniciou-se apresentando, de forma detalhada, a estrutura laboratorial para a realização dos ensaios experimentais. Em seguida, foram estabelecidas as condições operacionais em que o forno micro-ondas seria submetido, sendo elas: condição senoidal ideal, elevação de tensão para 110% com duração de 10 ciclos, afundamento de tensão para 85% com duração de 10 ciclos, interrupção de tensão com duração de 10 ciclos, flutuação de tensão relacionada com um PST igual a 5 e, por fim, distorções harmônicas de tensão em 20%. Em ambos os casos, as grandezas consideradas por meio da comparação entre os resultados experimentais e computacionais foram: tensão e corrente de alimentação na entrada do equipamento, tensão e corrente no enrolamento secundário do transformador de alta tensão e tensão e corrente na entrada da válvula

magnétron. Verificou-se grande semelhança entre os resultados experimentais e computacionais para todos os casos estudados, validando, assim, a modelagem utilizada, tanto para condições ideais, quanto para condições não ideais de suprimento. Pode-se destacar, nesse capítulo, a principal contribuição desta dissertação, relacionada ao estudo de desempenho de fornos micro-ondas no contexto da qualidade de energia elétrica, assunto para o qual foi percebido uma certa carência de referências bibliográficas. Adicionalmente, ressalta-se que o desenvolvimento obtido neste trabalho segue na direção de subsidiar estudos voltados para a área de pedidos de ressarcimento por danos elétricos envolvendo fornos micro-ondas domésticos.

Uma vez que o modelo do forno micro-ondas é validado no capítulo 4, foi implementado, no capítulo 5, por meio do programa ATP, o modelo de um forno micro-ondas industrial real, baseado em seu diagrama unifilar e demais dados técnicos de sua instalação elétrica. Conforme visto durante os estudos do capítulo 4, as correntes dos fornos micro-ondas apresentam um elevado conteúdo harmônico, sobretudo a harmônica de terceira ordem. Devido a essa característica inerente aos fornos micro-ondas e à elevada potência desse forno industrial, o objetivo desse estudo se apoia na possibilidade de haver impactos na qualidade da energia elétrica do seu sistema de suprimento. De forma a analisar os possíveis impactos mencionados anteriormente, foram desenvolvidos quatro estudos de caso. Os três primeiros estudos abordam o comportamento do forno industrial com todos seus módulos emissores de micro-ondas acionados e analisa a influência da resistência da malha de aterramento na distorção das tensões. Por meio dos resultados das simulações, percebeu-se que, ao se desprezar o valor da resistência da malha de aterramento, uma pequena influência na distorção de tensão no barramento de baixa tensão é observada. Por outro lado, até mesmo para baixos valores de resistência de aterramento, foram encontradas distorções de tensão significativas no mesmo barramento, superando os valores de referência estabelecidos no módulo 8 do PRODIST. No entanto, observou-se ainda, que os valores das distorções de tensão sofreram poucas alterações para resistências de aterramento na faixa de 1 a 10 ohms. Muito embora as distorções de tensão encontradas na baixa tensão serem superiores aos valores de referência, ao observar os resultados obtidos no barramento de média tensão, o mesmo não ocorre, apresentando valores de distorções bem baixos. Isso se deve à conexão  $\Delta$  no primário do transformador, que anula as

componentes de sequência zero que estavam fortemente presentes na conexão Y do secundário. Por fim, no caso 4 foi estudada a operação do forno industrial com o acionamento desigual de módulos emissores de micro-ondas monofásicos, de tal forma a configurar um desequilíbrio de carga. Dessa forma, avaliou-se, então, a possibilidade desse desequilíbrio de carga provocar algum impacto na qualidade de energia elétrica, mais especificamente relacionado a um desequilíbrio de tensão em seu sistema de suprimento. Baseado nas prescrições estabelecidas no módulo 8 do PRODIST para desequilíbrios de tensão, os resultados das simulações se mostram satisfatórios, não configurando nenhum problema no sistema elétrico de suprimento para esse último caso. Por outro lado, sabe-se que as componentes de sequência zero estão fortemente presentes nos resultados obtidos para o forno micro-ondas industrial, e que não são considerados no PRODIST, podendo trazer uma interpretação errônea do desequilíbrio de tensão real encontrado. Algumas contribuições desse capítulo estão vinculadas ao desenvolvimento embasado na legislação e recomendações brasileiras referentes ao assunto, tais como os módulos 8 e 9 do PRODIST e a norma ABNT NBR 5410. Ainda no que se diz respeito às prescrições contidas nessa última norma anteriormente citada, destaca-se uma base de informações para subsídio a projetistas quanto ao correto dimensionamento dos condutores fase e neutro de instalações elétricas de baixa tensão.

Após desenvolvimentos e discussões feitos ao longo deste trabalho, ficaram evidentes algumas contribuições e avanços oferecidos por esta dissertação. Não obstante a esse fato, ainda existem lacunas a serem preenchidas. Dessa forma, como sugestões para pesquisas futuras, podem ser destacados os seguintes pontos:

- Estudos mais abrangentes envolvendo outros fornos micro-ondas domésticos, com uma gama diferente de potência, modelos e fabricantes, de maneira a possibilitar procedimentos estatísticos para comparação de desempenhos diante aos distúrbios da qualidade de energia elétrica;
- Extensão da modelagem computacional e validação experimental para fornos micro-ondas domésticos que empregam a tecnologia de fontes de alta tensão chaveadas;
- Estudos de suportabilidade de fornos micro-ondas frente a distúrbios na qualidade de energia elétrica, voltados para a área de pedidos de

ressarcimento por danos elétricos, e sua inserção em aplicativos computacionais dessa natureza;

- Validação de resultados computacionais para fornos micro-ondas industriais baseada em medições elétricas em fornos reais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN R. C., MCGRANAGHAN M. F., SANTOSO S., BEATY H. W., "Electrical Power Systems Quality", 2nd Edition, McGraw-Hill, Nova York, 2003.
- [2] JUCÁ A. S., "Avaliação do relacionamento entre consumidores e concessionárias na solução de conflitos por danos elétricos: proposta de adequação", Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo/SP, 2003.
- [3] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em junho de 2016.
- [4] PRODIST - Procedimento de Distribuição de Energia no Sistema de Distribuição Nacional - "Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica", Revisão 7.
- [5] PRODIST - Procedimento de Distribuição de Energia no Sistema de Distribuição Nacional - "Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos", Revisão 0.
- [6] REZENDE P. H. O., "Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar split visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2012.
- [7] MENDONÇA M. V. B., TAVARES C. E., GONDIM I. N., OLIVEIRA J. C., DELAIBA A. C., RODRIGUES K. D., SILVA R. M. T., "Modelagem de Equipamentos Eletroeletrônicos Utilizando Fontes Lineares e Chaveadas sob Condições Não Ideais de Alimentação na Plataforma ATP", VII CBQEE, Santos/SP, Agosto de 2007.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-5410: Instalações elétricas em baixa tensão. Rio de Janeiro, 2005. 128p.
- [9] BOLLEN M. H. J., "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", Piscataway, IEEE Press, 2000.
- [10] SANTOS A. C. D., "Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade de Energia Elétrica", SANTOS A. C. D., "Desempenho de Fontes Lineares e Chaveadas no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2001.

- [11] CARVALHO C. B., "Desempenho de Aparelho Condicionador de Ar no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2002.
- [12] AZEVEDO A. C., "Desempenho de Refrigeradores Domésticos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2002.
- [13] MAGALHÃES R. N., "Controlador Lógico Programável no Contexto da Qualidade da Energia", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2003.
- [14] TEIXEIRA M. D., "Uma Estrutura Laboratorial para Testes de Desempenho de Equipamentos no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2003.
- [15] TAVARES C. E., "Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos Diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Televisor, VCRs e Som", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2004.
- [16] PENICHE R. A., "Modelagem e Análise de Desempenho de Equipamentos Eletroeletrônicos Diante de Distúrbios da Qualidade da Energia - Enfoque: Aparelhos de DVD, Fax e Telefone sem fio", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2004.
- [17] BACCA I. A., "Modelagem para Análise de Desempenho de Eletrodomésticos à Força-Motriz Diante de Distúrbios de Qualidade da Energia", Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), UFU, Uberlândia/MG, 2008.
- [18] BELHAIBA A., GHAZAL N., CHRAYGANE M., BAHANI B., AHMEDOU M. O., FERFRA M., "Modeling of a power Balance for microwaves generator with one magnetron", Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2012 International Conference on Tangier, 2012, pp. 1024-1028.
- [19] AHMEDOU M. O., FERFRA M., NOURI R., CHRAYGANE M., "Improved  $\pi$  model of the leakage flux transformer used for magnetrons," Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2011 International Conference on, Ouarzazate, 2011, pp. 1-6.

- [20] BELHAIBA A., BOUZIT A., ELGHAZAL N., FERFRA M., BOUSSETA M., CHRAYGANE M., BAHANI B., "Comparative Studies of Electrical Functioning of Magnetron Power Supply for One Magnetron", Journal of Engineering Science and Technology Review , Vol. 6 No.3. pp 229-238 2013.
- [21] ELGHAZAL N., AHMEDOU M. O., CHRAYGANE M., FERFRA M., BELHAIBA A., "Optimization of high voltage power supply for industrial microwave generators for one magnetron", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 46, N0.1, pp.001 – 010, December 2012.
- [22] BOUZIT A., CHRAYGANE M., ELGHAZAL N., FADEL M., FERFRA M., BASSOUI M., "Modeling of New Single-Phase High Voltage Power Supply for Industrial Microwave Generators for N=2 Magnetrons", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE) Vol. 4, No. 2, April 2014, pp. 223~230.
- [23] AHMEDOU M. O., FERFRA M., ELGHAZAL N., CHRAYGANE M., MAAFOUFI M., "Implementation and Optimization Under Matlab Code Of A HV Power Transformer for Microwave Generators Supplying two Magnetrons", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 30th November 2011. Vol. 33 No.2.
- [24] ELGHAZAL N., BELHAIBA A., CHRAYGANE M., BAHANI B., FERFRA M., "New Simulation Method of New HV Power Supply for Industrial Microwave Generators with N=2 Magnetrons", (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 4, No. 12, 2013.
- [25] BAHANI B., BOUZIT A., CHRAYGANE M., FERFRA M., ELGHAZAL N., BELHAIBA A., "Modeling of a New High Voltage Power Supply for Microwave Generators with Three Magnetrons", International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol. 3, No. 2, April 2013, pp. 164~170.
- [26] CHRAYGANE M., ELGHAZAL N., FADEL M., BAHANI B., BELHAIBA A., FERFRA M., BASSOUI M., "Improved modeling of new three-phase high voltage transformer with magnetic shunts", Archives of Electrical Engineering. Volume 64, Issue 1, Pages 157–172, March 2015.

- [27] BASSOUI M., FERFRA M., CHRAYGANE M., AHMEDOU M. O., ELGHAZAL N., BELHAIBA A., "Optimization of a New Three-Phase High Voltage Power Supply for Industrial Microwaves Generators with N Magnetrons by Phase (Treated Case N=1)", World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:7, No:11, 2013.
- [28] CARVALHO R. P., "Microondas – Temas Atuais de Física", Editora Livraria da Física, São Paulo, 2005.
- [29] MAI I., "Utilizando um forno de micro-ondas e um disco rígido de um computador como laboratório de física", Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2008.
- [30] SANSEVERINO A. M., "Microondas em síntese orgânica", Quím. Nova, São Paulo , v. 25, n. 4, p. 660-667, July 2002.
- [31] TAGLIARI C., "Estudo da aplicação de microondas no processo de secagem industrial de borracha sintética", Dissertação de Mestrado, UNISC, Santa Cruz do Sul/RS, 2012.
- [32] HASANIEN B. M., SAYED K. F. A., "Current source ZCS PFM DC-DC converter for magnetron power supply", Power System Conference, 2008. MEPCON 2008. 12th International Middle-East, Aswan, 2008, pp. 464-469.
- [33] MOURA B. S., "Transesterificação alcalina de óleos vegetais para produção de biodiesel: Avaliação técnica e econômica", Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica/RJ, 2010.
- [34] JÚNIO I. P., "Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração", Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2014.
- [35] PEREIRA M. S., "Aplicação de Secagem por microondas no tratamento de cascalho de perfuração", Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2013.

- [36] LEGGIERI A., PAOLO F., PASSI D., "Key-Holes Magnetron Design and Multiphysics Simulation", Comsol Conference 2013 Rotterdam.
- [37] YANG Y. R., "A Magnetron Power Supply with Transition-Mode Zero-Voltage-Switching Inverter", Journal of Energy and Power Engineering 7 (2013) 1571-1577.