

Modelagem de Fornos Micro-Ondas no Contexto da Qualidade de Energia Elétrica

Lucas Rodrigues de Almeida, Antônio Carlos Delaiba
Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT
Uberlândia/MG, Brasil
lucas_rodrigues@uol.com.br, delaiba@ufu.br

Resumo--Este artigo apresenta um estudo sobre fornos micro-ondas, bastante utilizados em aplicações residenciais e industriais, sua modelagem computacional no programa ATP (*Alternative Transients Program*) e validação experimental em condições normais de suprimento. Além do desenvolvimento da modelagem computacional, este trabalho tem o objetivo de analisar as particularidades dos fornos micro-ondas e o impacto desse tipo de carga na qualidade da energia elétrica. Adicionalmente, este trabalho segue na direção de subsidiar os aspectos relacionados com o dimensionamento de condutores conforme a norma NBR 5410, principalmente em fornos micro-ondas industriais de elevada potência.

Palavras-chave--Fornos Micro-ondas, Modelagem Computacional, Distorções Harmônicas, Qualidade de Energia Elétrica.

I. INTRODUÇÃO

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas que se encontram na faixa de 300 MHz a 300 GHz, apresentando comprimento de ondas de 1 metro a 1 milímetro [1]. A tecnologia de micro-ondas foi desenvolvida na Segunda Guerra Mundial para aplicação em construção de radares. Durante a pesquisa e 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 [2].

A pesquisa de sistemas de radar levou à descoberta acidental da aplicação mais corriqueira hoje em dia, que são os fornos de micro-ondas. O efeito de aquecimento das moléculas de água, açúcares e gorduras pela radiação de micro-ondas é usado hoje em dia em fornos domésticos, industriais, ou ainda em medicina, para tratamento de tumores e inflamações [2]. O aquecimento e secagem por micro-ondas têm várias vantagens em relação aos métodos convencionais, tais como: aquecimento rápido, apresenta economia significativa de energia elétrica, ocupa menos espaço e permite controle de aquecimento e secagem mais preciso e eficiente [3].

Devido às suas várias vantagens, os fornos micro-ondas vêm sendo utilizados em várias aplicações industriais como, por exemplo, vulcanização da borracha, 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 referência [4] apresenta as vantagens técnicas e econômicas da utilização das micro-ondas para a produção do biodiesel. Nas referências [5] e [6], são apresentadas as vantagens na descontaminação de cascalho proveniente da perfuração de poços de petróleo por meio da secagem por micro-ondas, devido à toxicidade e baixa biodegradabilidade do fluido utilizado na perfuração.

Os fornos micro-ondas podem ter suas características variadas de uma aplicação para outra, como estrutura física, potências e frequências. Para que não haja interferências em sistemas de comunicação, as frequências de fornos micro-ondas são padronizadas em 13,56 MHz, 27,12 MHz, 896 MHz e 2,45 GHz, sendo a última a mais utilizada em aplicações residenciais, devido ao comprimento de onda ser compatível com o tamanho dos fornos domésticos [2].

Independentemente da aplicação e frequência utilizada, o princípio de funcionamento do forno micro-ondas é o mesmo e consiste em uma válvula magnétron, responsável pela emissão das micro-ondas, e uma fonte de alimentação, responsável por fornecer uma alta tensão contínua e corrente estabilizada para o magnétron. Nas referências [7] e [8], é apresentada a modelagem, simulação e validação experimental da fonte de alta tensão com objetivo de avaliar a potência absorvida pelo magnétron. Sua principal contribuição está relacionada ao modelo do transformador de alta tensão. Diferentemente de um transformador convencional, esse transformador especial, com derivações em seu núcleo, apresenta um fluxo de dispersão adicional que protege o magnétron contra eventuais variações de tensão. Essa mesma modelagem aplicada ao transformador foi utilizada nas referências [9] e [10].

A fonte de alta tensão anteriormente referenciada é a mais simples e mais utilizada na alimentação dos magnetrons, utilizando, basicamente, um transformador de alta tensão e um circuito dobrador de tensão de meia onda, composto por um capacitor e um diodo. Apesar do custo mais elevado, 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 (25 a 35 kHz), além de permitir a redução de tamanho e peso do transformador. Tais fontes de alimentação controladas são apresentadas nas referências [3] e [11].

Muito embora se reconheça os avanços obtidos pelas

pesquisas referenciadas anteriormente, ainda há várias lacunas e carências sobre o tema. Nesse sentido, este trabalho complementa e apresenta contribuições vinculadas com o assunto proposto. Assim, este artigo apresenta a modelagem do forno micro-ondas, sua implementação na plataforma computacional ATP (*Alternative Transients Program*) e a validação dos resultados das simulações por meio da comparação com ensaios laboratoriais. Os principais objetivos da modelagem do forno micro-ondas são: conhecer melhor suas particularidades e subsidiar a análise do impacto desse tipo de carga na qualidade da energia elétrica, sobretudo o que diz respeito às correntes harmônicas e correto dimensionamento de condutores fase e neutro, conforme prescrições contidas na norma NBR 5410, principalmente em fornos micro-ondas industriais de elevada potência.

II. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO FORNO MICRO-ONDAS

A Fig. 1 apresenta os principais componentes constituintes do circuito elétrico do forno micro-ondas em estudo. Tem-se a válvula magnétron (a), responsável pela geração das ondas eletromagnéticas de 2,45 GHz, e 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).



Fig. 1. Componentes do forno micro-ondas em estudo. 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 proveniente da fonte de alta tensão em ondas eletromagnéticas. Sua estrutura é formada por cátodo, ânodo, ímãs permanentes, antena e aletas para dissipação de calor, conforme apresentado na Fig. 2.

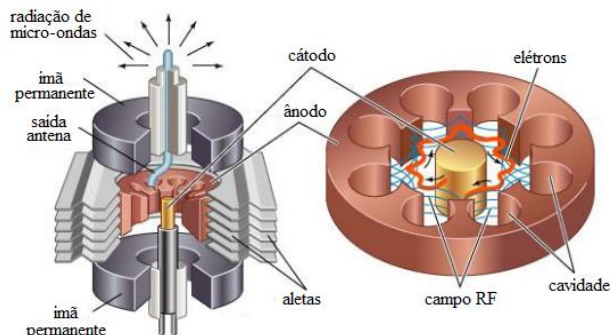


Fig. 2. Magnétron [12].

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 V 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 (Fig. 3). 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 [2]. Dessa forma, o magnétron é projetado para se comportar como um circuito ressonante em uma determinada frequência, e suas ondas eletromagnéticas são conduzidas para o exterior através de uma antena.

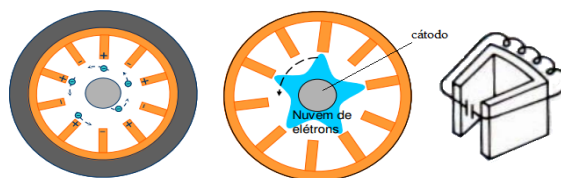


Fig. 3. Cavidade ressonante [1].

B. Fonte de alta tensão

A fonte de alimentação do forno micro-ondas em estudo 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 Fig. 4.

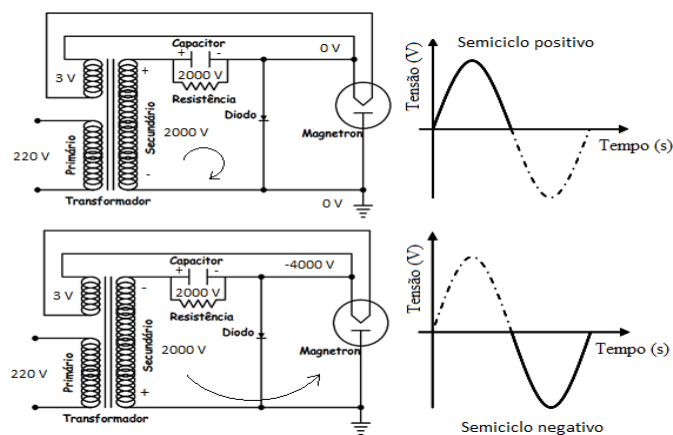


Fig. 4. Circuito elétrico do forno micro-ondas [1].

O aquecimento do filamento ocorre por meio da passagem da corrente proveniente do enrolamento terciário do transformador, cuja tensão é próxima de 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 V no cátodo em relação ao ânodo do magnétron.

III. MODELAGEM DO FORNO MICRO-ONDAS

As principais características elétricas do forno micro-ondas utilizado encontram-se na Tabela I.

TABELA I – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO FORNO MICRO-ONDAS

Grandezas	Valores
Tensão nominal [V]	220
Frequência de alimentação [Hz]	60
Frequência de operação das micro-ondas [GHz]	2,45
Consumo [W]	1500
Potência útil de cozimento [W]	900
Capacitor [μF]	0,9

Para obter o modelo computacional representativo do forno, primeiramente, foram analisadas as particularidades de cada um de seus componentes de forma a obter os modelos isolados. Após análise isolada, os modelos do magnétron, circuito dobrador de tensão e transformador foram utilizados para a criação do modelo do forno micro-ondas. O programa utilizado para as simulações computacionais foi o ATP, que é uma ferramenta com boa aceitação no setor elétrico para análises de sistemas no domínio do tempo.

A. Modelagem do Magnétron

O magnétron é um componente não linear. Suas características elétricas e seu circuito equivalente podem ser representados pela Fig. 5. Sua característica 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_k) 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) [11].

Observa-se que, durante o período de oscilação, a variação de tensão aplicada no magnétron varia entre os limites de 3,5 a

4,5 kV [11].

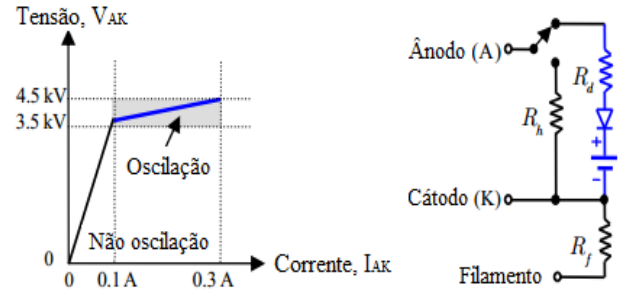


Fig. 5. Curva V-I e modelo representativo do magnétron [11].

Deve-se salientar que o modelo do magnétron implementado no ATP contempla apenas a região de oscilação, ou seja, o período relacionado com o regime permanente do forno micro-ondas. Os valores utilizados no modelo do magnétron e implementados no ATP foram 3800 V para a fonte de corrente contínua e 350 Ω para a resistência (R_d) em série com o diodo [8].

B. Modelagem do Circuito Dobrador de Tensão

O circuito dobrador de tensão do forno micro-ondas é composto por um capacitor e um diodo de alta tensão e pode ser modelado conforme a Fig. 6.

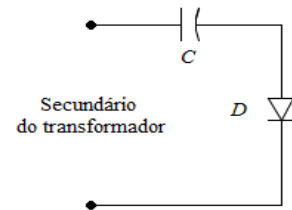


Fig. 6. Representação do circuito dobrador de tensão.

Os valores utilizados no modelo do circuito dobrador de tensão e implementados no ATP foram 0,9 μF para o capacitor (C) e 0,6 V para o diodo (D).

C. Modelagem do Transformador

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 [8]. A Fig. 7 apresenta o transformador de alta tensão utilizado no forno micro-ondas, destacando sua derivação magnética entre o enrolamento primário e secundário. Devido a essa particularidade do transformador de alta tensão, sua modelagem no ATP não é trivial e não pode ser fielmente representada por um transformador monofásico convencional. Deve-se salientar que a modelagem do transformador baseou-se na referência [8].

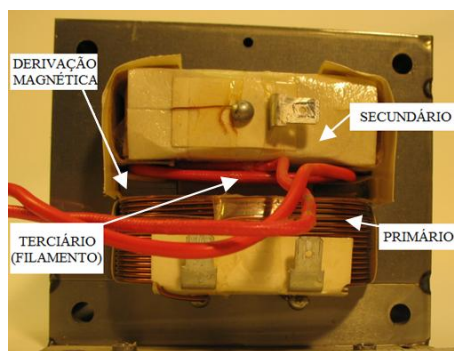


Fig. 7. Transformador de alta tensão utilizado no forno micro-ondas.

D. Modelagem Computacional Implementada no ATP

O modelo do forno micro-ondas implementado no ATP é mostrado na Fig. 8 e é representado por uma fonte de alimentação, um transformador de alta tensão, um circuito dobrador de tensão e um magnétron. Os parâmetros inseridos no modelo estão de acordo com a modelagem vista anteriormente. Os resultados das simulações são obtidos tanto na alimentação do forno micro-ondas quanto em sua fonte de alta tensão.

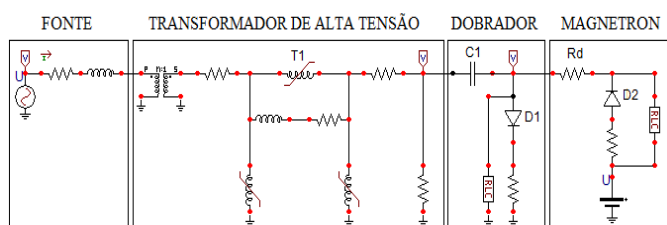


Fig. 8. Representação do modelo do forno micro-ondas no ATP.

A Fig. 9 apresenta a forma de onda da tensão de alimentação do forno micro-ondas. Ressalta-se que, para todas as simulações computacionais deste estudo, a tensão de alimentação do forno micro-ondas se encontra em condições senoidais.

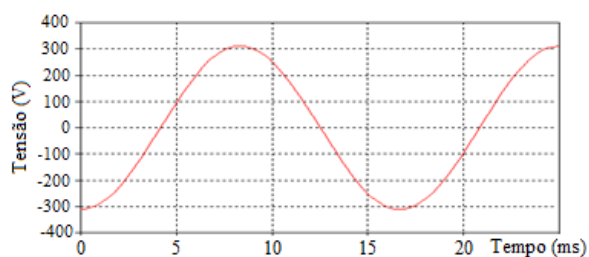


Fig. 9. Tensão de alimentação do forno micro-ondas - Computacional.

A corrente solicitada pelo forno micro-ondas é apresentada na Fig. 10. A análise da sua forma de onda evidencia a forte não linearidade entre a tensão de alimentação e a corrente obtida na entrada do forno micro-ondas. Tal fato é justificado, principalmente, pela característica de retificação do circuito dobrador de tensão de meia onda.

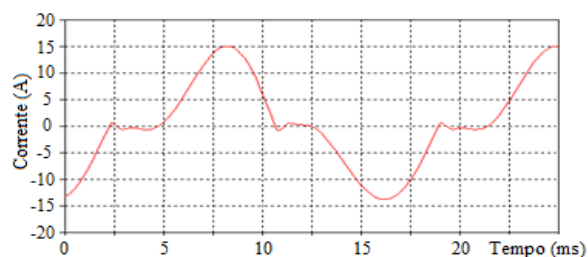


Fig. 10. Corrente na entrada do forno micro-ondas - Computacional.

A Fig. 11 apresenta o espectro harmônico da corrente na entrada do forno micro-ondas. Nota-se que o forno micro-ondas apresenta consideráveis níveis de distorções harmônicas, sobretudo a de 3ª ordem, que ultrapassa os valores de referência estabelecidos na norma IEC 61000-3-2.

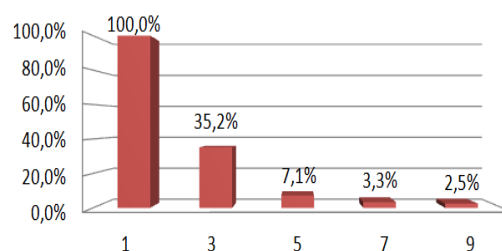


Fig. 11. Espectro harmônico da corrente de entrada - Computacional.

A Fig. 12 apresenta a forma de onda da tensão no enrolamento secundário do transformador, que alimenta o circuito dobrador de tensão, enquanto a Fig. 13 apresenta a forma de onda da tensão da saída do circuito dobrador de tensão, responsável por alimentar o magnétron. Por meio da Fig. 13, pode-se observar que a tensão de alimentação do magnétron é representada por uma forma de onda quadrada e pulsante devido à característica de retificação do circuito dobrador de tensão de meia onda.

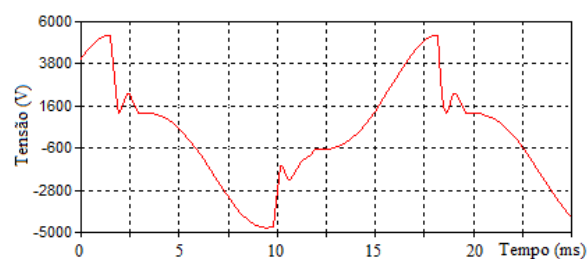


Fig. 12. Tensão no enrolamento secundário do transformador - Computacional.

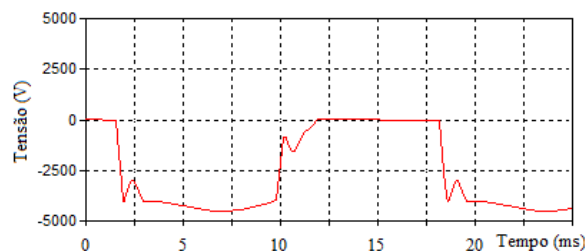


Fig. 13. Tensão de alimentação do magnétron - Computacional.

IV. ENSAIOS LABORATORIAIS DO FORNO MICRO-ONDAS

Visando validar a modelagem apresentada, ensaios laboratoriais foram feitos em um forno micro-ondas com as mesmas características elétricas utilizadas nas simulações computacionais, conforme Tabela I.

As medições foram divididas em duas etapas. Inicialmente, foram obtidas as formas de onda de tensão e corrente na entrada do forno micro-ondas. Posteriormente, foram obtidas as formas de onda de tensão na fonte de alimentação de alta tensão. Para atender aos requisitos anteriormente citados, o arranjo laboratorial mostrado na Fig.14 foi utilizado. As medições foram efetuadas com o auxílio de um osciloscópio digital e os dados coletados foram registrados em um microcomputador.

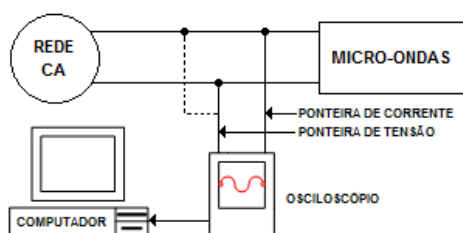


Fig. 14. Arranjo experimental para obtenção das formas de onda de tensão e corrente na entrada do forno micro-ondas.

As Figs. 15 e 16 ilustram as formas de onda da tensão e da corrente, respectivamente, medidas na entrada do forno micro-ondas.

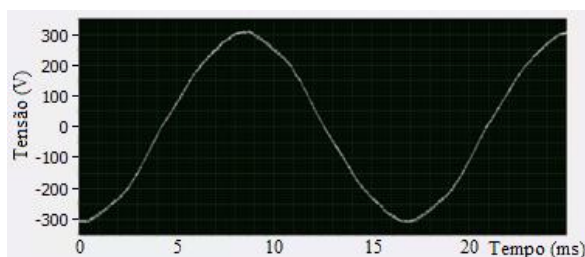


Fig. 15. Tensão de alimentação do forno micro-ondas - Experimental.

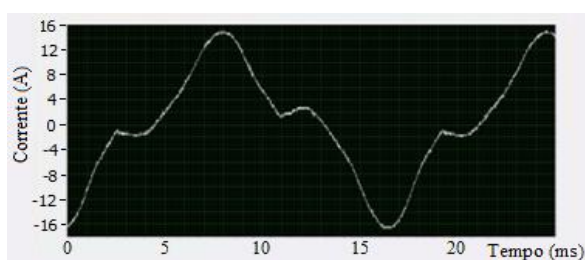


Fig. 16. Corrente na entrada do forno micro-ondas em regime permanente - Experimental.

Mais uma vez, mostra-se que a forma de onda medida também evidencia a forte não linearidade entre a tensão de alimentação e a corrente absorvida pelo forno micro-ondas. O espectro harmônico da corrente medida é apresentado na Fig. 17, evidenciando, novamente, a forte presença das distorções de 3ª ordem. Distorções harmônicas podem gerar sérios

impactos em uma rede elétrica, elevando suas perdas, e, consequentemente, elevação de temperatura e redução da vida útil de seus componentes, tais como cabos e transformadores.

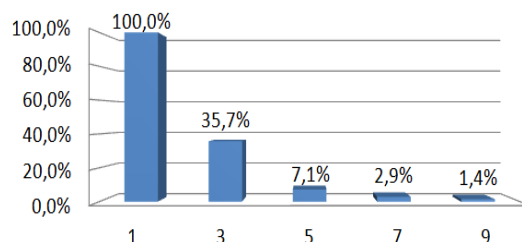


Fig. 17. Espectro harmônico da corrente de entrada - Experimental.

A configuração experimental utilizada para obter as medições na fonte de alta tensão do forno micro-ondas é apresentada na Fig. 18. A medição denominada V1 representa a medição de tensão no secundário do transformador de alta tensão e a medição denominada V2 representa a medição de tensão de saída do circuito dobrador de tensão, ou seja, na entrada do magnétron.

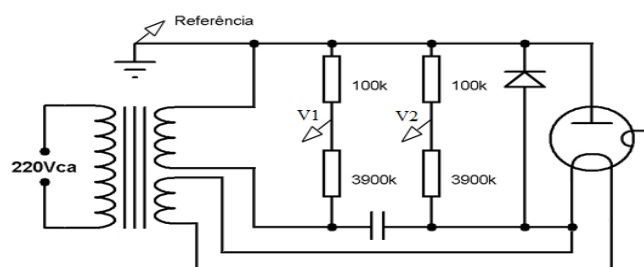


Fig. 18. Arranjo experimental para obtenção das formas de onda de tensão na fonte de alta tensão do forno micro-ondas.

Isso posto, as Figs. 19 e 20 apresentam as formas de onda das tensões V1 e V2 medidas na fonte de alta tensão do forno micro-ondas.

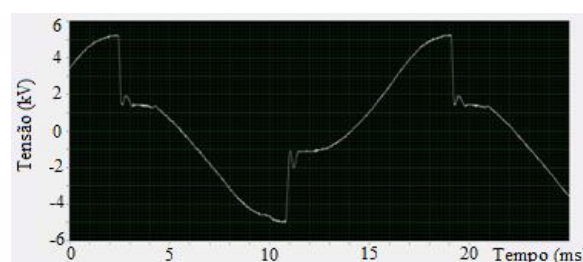


Fig. 19. Tensão no enrolamento secundário do transformador - Experimental.

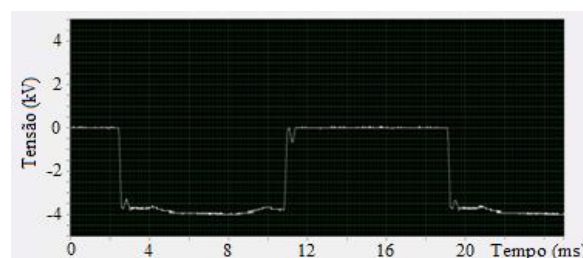


Fig. 20. Tensão no magnétron - Experimental.

V. VALIDAÇÕES

A. Análise Qualitativa

Comparando-se as Fig. 9, 10, 12 e 13, obtidas computacionalmente, com aquelas oriundas das medições experimentais, Fig. 15, 16, 19 e 20, observa-se que as formas de onda são semelhantes.

B. Análise Quantitativa

Os resultados numéricos obtidos experimentalmente foram comparados com as simulações computacionais e são apresentados na Tabela II por meio dos valores eficazes, de pico e suas distorções harmônicas.

TABELA II – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Grandezas			Comparação	
			Experimental	Computacional
Tensão de alimentação	Valor eficaz (V)		217,5	220,1
	Valor de pico (V)		307,6	311
Corrente de entrada (regime permanente)	Valor eficaz (A)		7,45	8,23
	Valor de pico (A)		14,4	15,04
	Harmônicas mais significativas (%)	3ª	35,7	35,2
		5ª	7,1	7,1
		7ª	2,9	3,3
	Distorção Harmônica Total (DHT)		36,56%	36,10%
Tensão no secundário do transformador	Valor de pico (V)		5200	5275
Alimentação do magnétron	Valor de pico (V)		-4000	-4300

Dessa forma, pode-se concluir, pela análise dos resultados obtidos, que há uma grande semelhança entre os resultados oriundos dos ensaios experimentais e aqueles obtidos nas simulações computacionais.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo sobre fornos micro-ondas, tendo, como principal contribuição, o desenvolvimento de sua modelagem computacional na plataforma ATP. O modelo desenvolvido permitiu analisar as grandezas elétricas tanto na entrada do forno micro-ondas quanto na fonte de alta tensão que alimenta o magnétron. Os resultados obtidos por meio das simulações foram muito próximos aos obtidos experimentalmente, validando o modelo para estudos no contexto da qualidade de energia elétrica, mais especificamente aos impactos relacionados às distorções harmônicas de corrente.

Os resultados obtidos apontaram consideráveis valores de distorções harmônicas de corrente, sobretudo a de 3ª ordem, que ultrapassa os valores de referência estabelecidos na norma IEC 61000-3-2. Embora não exista nenhuma norma brasileira que trate sobre os limites de distorções harmônicas de corrente, a norma NBR 5410, em seu Anexo F, fornece

subsídio para o dimensionamento do condutor neutro quando o conteúdo de terceira harmônica de correntes for superior a 33%. Em se tratando de fornos micro-ondas industriais de elevada potência conectados a redes trifásicas com neutro, um cuidado especial é necessário no dimensionamento desse condutor, a fim de se evitar uma possível sobrecarga. Além do condutor neutro, os condutores fase e demais componentes de uma instalação elétrica, tais como disjuntores, chaves e transformadores de potência, podem estar sujeitos aos impactos das distorções harmônicas, tendo sua vida útil reduzida. Tais impactos podem ser melhores avaliados com o auxílio de simulações computacionais utilizando o modelo desenvolvido neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Mai, "Utilizando um forno de micro-ondas e um disco rígido de um computador como laboratório de física", Rio Grande do Sul, 2008. Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física), Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [2] R. P. Carvalho, "Microondas – Temas Atuais de Física", São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.
- [3] B. M. Hasanien and K. F. A. Sayed, "Current Source ZCS PFM DC-DC Converter for Magnetron Power Supply", 12th International Middle-East Power System Conference, MEPCON 2008, pp. 464-469.
- [4] B. S. Moura, "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.
- [5] I. P. Júnio, "Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração", Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.
- [6] M. S. Pereira, "Aplicação de Secagem por microondas no tratamento de cascalho de perfuração", Tese (Doutorado em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2013.
- [7] A. Belhaiba et al., "Comparative Studies of Electrical Functioning of Magnetron Power Supply for One Magnetron", Journal of Engineering Science & Technology Review 6, 2013, Vol. 6 Issue 3, pp. 35-40.
- [8] A. Belhaiba et al., "Modeling of a power Balance for microwaves generator with one magnetron", 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, pp.1024 - 1028.
- [9] B. Bahani et al., "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. 16-170.
- [10] M. Chraygane et al., "Improved modeling of new three-phase high voltage transformer with magnetic shunts", Archives of Electrical Engineering Vol. 64(1), pp. 157-172 (2015).
- [11] Y. R. Yang, "A Magnetron Power Supply with Transition-Mode Zero-Voltage-Switching Inverter", Journal of Energy and Power Engineering 7 (2013) 1571-1577.
- [12] A. Leggieri, F. Paolo and D. Passi, "Key-Holes Magnetron Design and Multiphysics Simulation", Comsol Conference 2013 Rotterdam.