

# PREVISÃO DOS CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS EM SECADOR MICRO-ONDAS VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

## ELETROMAGNETIC FIELDS PREVISION IN MICROWAVE DRYER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

## PRONOSTICANDO CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS EN SECADOR DE MICROONDAS UTILIZANDO LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Gabriel Franco Baldim<sup>1</sup>  
Felipe Orlando da Costa<sup>2</sup>  
Irineu Petri Júnior<sup>3</sup>

**Resumo:** A operação unitária de secagem micro-ondas é uma das mais complexas existentes, possuindo alto grau de complexidade no dimensionamento e *scale-up* de cavidades. Este trabalho teve como intuito verificar o comportamento de campos eletromagnéticos e térmico em um secador micro-ondas, verificando a influência das dimensões da cavidade e da guia de onda e seu posicionamento. Foi observado que o número de *hotspots* e a intensidade do campo eletromagnético variam com o comprimento da guia de onda e com as dimensões da cavidade. Conclui-se que as simulações tiveram boa concordância com experimental sendo favoráveis para uma otimização e *scale-up* de secadores.

**Palavras-chave:** Simulação. CFD. Equações de Maxwell. Campos Eletromagnéticos.

**Abstract:** The unit operation of microwave drying is one of the most complex existing, having a high degree of complexity in the dimensioning and *scale-up* of cavities. This work aimed to verify the behavior of electromagnetic and thermal fields in a microwave dryer, checking the influence of the dimensions of the cavity and the waveguide and their positioning. It was observed that the number of *hotspots* and the intensity of the electromagnetic field vary with the length of the waveguide and the dimensions of the cavity. It is concluded that the simulations had good agreement with experimental, being favorable for an optimization and *scale-up* of dryers.

**Keywords:** Simulation. CFD. Maxwell equations. Electromagnetic Fields.

**Resumen:** La operación unitaria del secado es una de las más complejas existentes, teniendo alto grado de complejidad en su dimensionamiento y escalado de cavidades. Este trabajo tuvo como objetivo verificar el comportamiento de los campos electromagnéticos y térmicos en un secador microondas, verificando la influencia de las dimensiones de la cavidad y de la guía de onda y su ubicación. Fue mirado que el número de hotspots y la intensidad del campo electromagnético cambian con el ancho de la guía de onda y con las dimensiones de la cavidad. Luego, concluye que las simulaciones tuvieron buena semejanza con el experimental, siendo favorables para una optimización y amplificación de secadores.

**Palabras-clave:** Simulaciones. CFD. Ecuaciones de Maxwell. Campos electromagnéticos.

Submetido 25/05/2020

Aceito 31/08/2020

Publicado 03/02/2021

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Lavras. E-mail: gabrielfrancobaldim@gmail.com.

<sup>2</sup> Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Lavras. E-mail: felipe.costa@estudante.ufla.br.

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Química. Universidade Federal de Lavras. E-mail: irineupetri@gmail.com.

## Introdução

A secagem é uma operação unitária, que é amplamente utilizada em vários processos industriais, tais como, indústrias químicas de alimentos, mineração, papel e celulose, têxteis, entre outras. Este processo proporciona diversas vantagens, como a melhora na qualidade final do produto, aumento no prazo de validade, redução de massa e volume do produto e, conseqüentemente, reduzindo custos de transporte e armazenamento (Rodrigues & Ataíde, 2019).

Normalmente, as operações de secagem costumam durar longos tempos (16 até 45 horas) dependendo do produto e das condições operacionais. Essa demora na redução de umidade, em alguns casos, pode danificar o produto e comprometer sua qualidade final. Sendo assim, a busca de melhores secadores ou fontes alternativas de secagem têm sido foco de diversas pesquisas na literatura. (Cunha, et al. 2013).

Vale ressaltar que o desenvolvimento da tecnologia da secagem micro-ondas é recente, no entanto, existem trabalhos que relataram vantagens em sua utilização, tais como, a secagem de abóbora, abacaxi, alho, grãos e etc (Conforti et al, 1990; Junqueira et al., 2017; Corrêa et al., 2011; Sharma & Prasad, 2001). Outro ponto, que vale salientar, analisando os trabalhos citados, é o receio do meio industrial na utilização da secagem micro-ondas, pois ainda não há um domínio completo do comportamento das oscilações micro-ondas. Porém, essa é mais uma justificativa, para novos trabalhos sejam desenvolvimentos nesta área, para que essa tecnologia, venha ser completamente elucidada.

Um estudo experimental geralmente pleiteia a demanda contínua de recursos humanos, técnicos e de tempo para as medidas requeridas. Neste cenário, a atual tendência acadêmico-industrial é a modificação para metodologias que agregam ferramentas computacionais e numéricas, para então, predizer as características físico-químicas que serão encontradas, por meio de simulações (Versteeg. & Malalasekera, 2007). O uso de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), se torna instrumento para os resultados a serem gerados, tendo em vista sua aplicação também na previsão de campo eletromagnéticos em cavidades micro-ondas (Petri J., 2017; Costa et al., 2020).

O forno de micro-ondas é uma caixa metálica (cavidade), conectada a uma guia de ondas, denominada de porta, e a um *magnetron* que emite ondas eletromagnéticas na faixa de 2,45 GHz, operando no modo TE (*Transversal Electric*), em este tipo de propagação o campo

elétrico e transversal à direção de propagação da onda, enquanto o campo magnético é normal à direção de propagação (Pozar, 1998). Na simulação de cavidades micro-ondas, a fonte de calor distribuída é computada em uma análise eletromagnética estacionária, no domínio da frequência, seguida de simulação transiente de transferência de calor, esta simulação serve como parâmetro de comparação, pois, através dos contornos de temperatura gerados é possível verificar o quanto se aproxima de um experimento real (Petri J., 2017).

As micro-ondas são ondas eletromagnéticas com frequências que variam de 300-300000 MHz (Petri J., 2017). O aquecimento dos materiais através das micro-ondas é realizado por meio da rotação dos dipolos permanentes das moléculas. Uma onda eletromagnética se deslocando no espaço gera uma oscilação no campo eletromagnético da região por onde ela passa. Então, o dipolo presente nas moléculas tende a se alinhar com o campo magnético, acompanhando as oscilações da onda eletromagnética. Essa rotação do dipolo faz aumentar a energia cinética das moléculas, ocorrendo o aumento da temperatura. Para moléculas com dipolo induzido ocorre o mesmo fenômeno, mas com intensidades menores. (Panisset, 2014).

A inovação deste projeto é a busca pela otimização do aproveitamento das micro-ondas nos processos de secagem. Inserindo a essa técnica uma ferramenta numérica para prever, de maneira teórica, a distribuição de campos eletromagnéticos na cavidade de secagem. Para isso, foi realizado um estudo numérico para verificar a influência das dimensões da cavidade e guia de onda, e seu posicionamento. As simulações de campo eletromagnético e térmico foram validadas por meio de resultados obtidos por uma placa dielétrica e aquecimento de água pura, respectivamente.

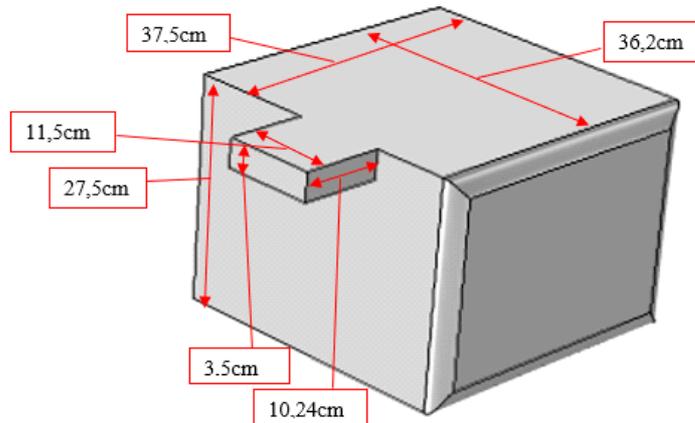
### **Metodologia Numérica**

As simulações computacionais são, normalmente, divididas em três etapas principais que são: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na etapa de pré-processamento, define-se o domínio geométrico do equipamento, e posteriormente é feita a discretização do mesmo pelo Método dos Elementos Finitos, formando assim a malha computacional. Vale ressaltar que em está etapa também são definidas as condições de contorno e iniciais do problema (Lima, 2005).

Na fase de processamento, aplica-se o *solver*, baseado nas equações de conservação e equações de Maxwell. E por fim, na fase de pós-processamento, os resultados são analisando e comparados com resultados experimentais, para validação do método numérico (Lima, 2005).

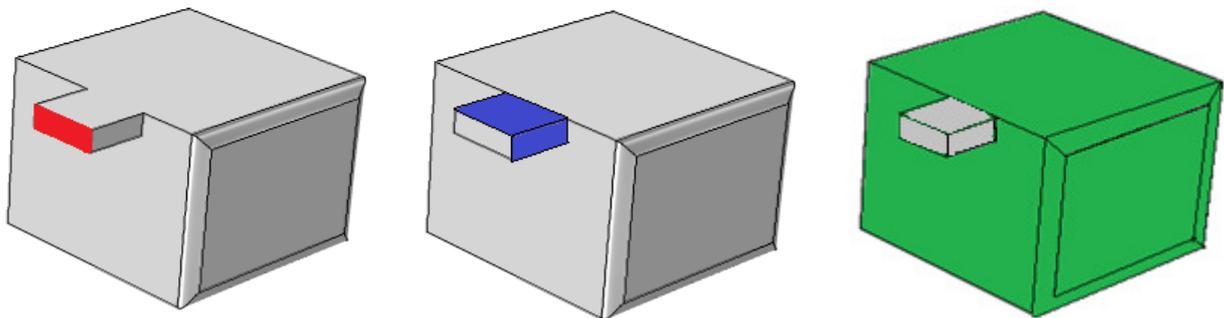
A geometria da cavidade foi construída inicialmente a partir das dimensões originais de um forno micro-ondas BRASTEMP modelo BMP40EGAAB (900W), como visto na Figura 1.

Figura 1: Geometria da cavidade e suas dimensões básicas.



Para as simulações numéricas, foi construída a geometria CAD por meio do *software* Ansys SpaceClaim 19.2. Para melhor compreensão, a geometria foi dividida em três regiões: Porta, Guia de Onda e Cavidade; identificadas pelas cores vermelho, azul e verde, respectivamente, na Figura 2.

Figura 2: Geometria da cavidade micro-ondas, detacando a porta (vermelho), guia de onda (azul) e cavidade (verde).



As simulações numéricas foram feitas no *software* COMSOL Multiphysics 5.3, em 3 dimensões com estudo feito no domínio de frequência para o campo eletromagnético (Equações de Maxwell) e no domínio do tempo para transferência de calor (Equação da Conservação de Energia).

Na simulação, o termo “porta” é o local onde a onda eletromagnética entra na cavidade. Segundo Petri et al. (2017), as condições de contorno adotadas para porta devem ser tipo retangular TE (*transversal electrical*) operando em modo 10, a uma frequência de 2450 MHz e, neste caso, uma potência de 454 Watts.

A condição de impedância foi definida para todas as paredes que compõem cavidade e também para a guia de onda com exceção da face da porta. O material definido para as paredes na simulação micro-ondas foi o aço. Vale ressaltar que as propriedades de esse material já se encontram disponíveis na própria biblioteca de materiais do *software*. No interior da cavidade, assim como no guia de ondas foi definido, no *software*, que havia ar à pressão atmosférica local.

Em algumas simulações foi inserido um material no centro da cavidade a uma temperatura inicial de 25°C, para ser aquecido pelas oscilações micro-ondas e gerar contornos de campo eletromagnético e térmico. Nas simulações de validação do campo eletromagnético, foi utilizada uma placa dielétrica no interior da cavidade feita de *Brazilian charcoal* [*particle size* 4 mm to 35 mm], assim como definido no trabalho de Silveira & Petri (2020). Nas simulações de validação do campo térmico, foi realizado o aquecimento de um béquer (50 mm de diâmetro) com água com uma massa inicial de 203,7 g, assim como previsto no trabalho de Alvarenga & Petri (2019).

A seguir serão descritas as metodologias para cada etapa realizada no trabalho a fim de avaliar a influência do posicionamento e dimensão da guia de onda, dimensão da cavidade e validação da metodologia utilizada para geração dos resultados de campo eletromagnético e térmico.

### ***Avaliação do comprimento da guia de onda na geração dos hotspots***

As simulações relativas à guia de onda procuraram estudar o comportamento do campo eletromagnético, quando foram modificados o comprimento e a posição da guia de onda. A influência do tamanho da guia de ondas no campo eletromagnético foi avaliada para comprimentos de 6,12 cm, 10,24 cm, 12,24 cm, 17,24 cm, 18,36 cm e 24,24 cm. Esses valores foram determinados através dos múltiplos de meio comprimento de onda das micro-ondas (6,12 cm/  $\frac{1}{2}$  onda) e por meio de tentativa erro (testando a cada 1 cm), a fim de encontrar comprimentos de guia de ondas que gerassem apenas *hotspots* completos no interior do guia. O

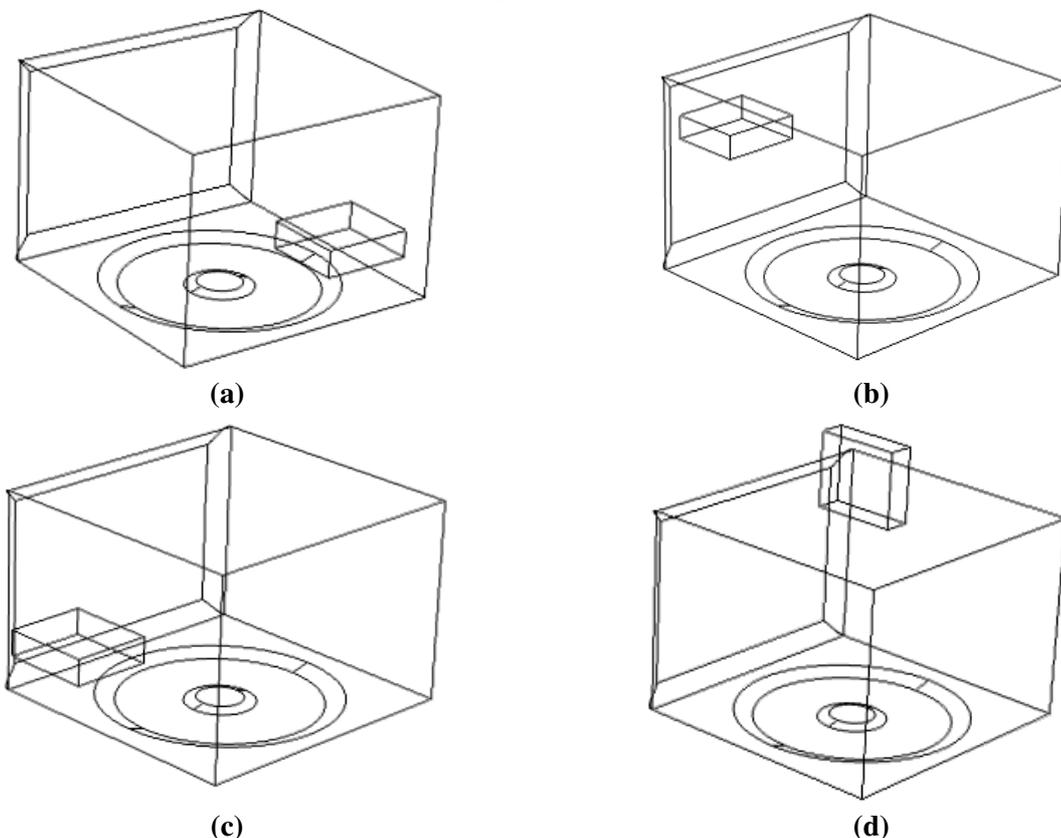
*hotspot* completo é uma região de regiões de convergência de ondas eletromagnéticas (ponto quente) que apresenta um formato de circunferência completa; já o *hotspot* incompleto é uma região de ponto quente que não apresenta formato completo de circunferência, causando dissipação de parte da energia, ou seja, gerando uma atenuação das micro-ondas.

### ***Avaliação do posicionamento da guia de onda nos perfis de campos eletromagnético no interior da cavidade***

Foram modificadas as posições na qual as guias de onda seriam instaladas, e assim verificar a distribuição das micro-ondas no interior da cavidade. Com relação à cavidade com dimensões originais (Figura 1), foram realizadas 4 modificações no posicionamento da guia de ondas: posicionado na parede frontal (Figura 3.a), posicionado na parede traseira (Figura 3.b), posicionado na parede lateral oposta ao da cavidade original (Figura 3.c) e posicionada no topo da cavidade (Figura 3.d).

6

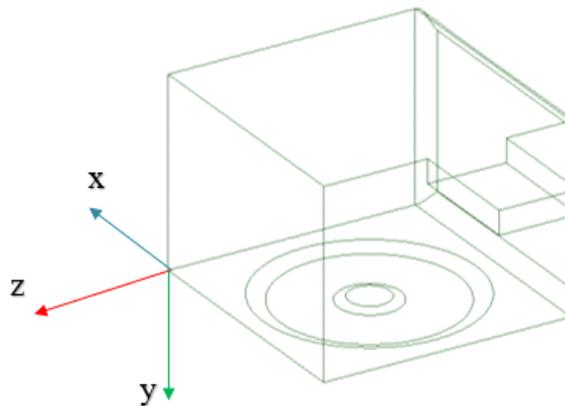
Figura 3: Geometria da cavidade com guia de onda posicionado na (a) parede frontal, (b) parede traseira, (c) parede lateral oposto ao original e (d) topo.



*Avaliação das dimensões da cavidade nos perfis de campos eletromagnético no interior da cavidade*

Para avaliar a influência das dimensões da cavidade, na distribuição das ondas eletromagnéticas, a largura (x), a altura (y) e o comprimento (z) da cavidade foram alterados, assim como mostrado na Figura 4.

Figura 4: Geometria original e direções de modificação da cavidade.



7

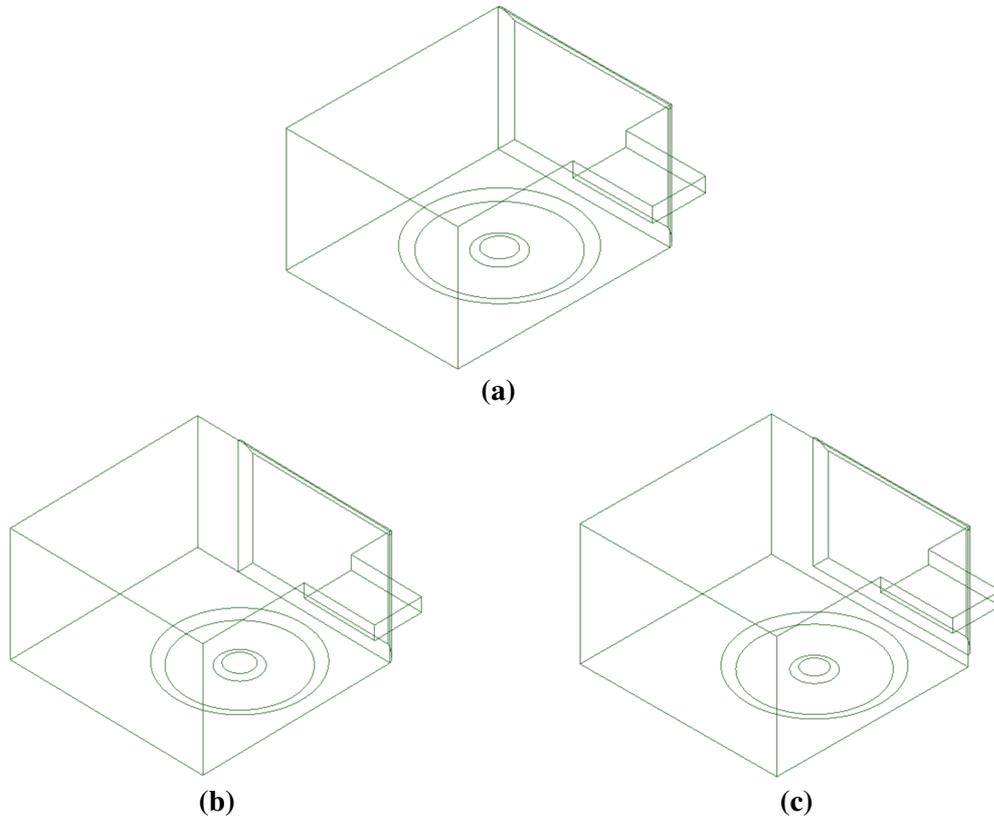
As modificações feitas nas dimensões, com relação à cavidade original, foram:

- Modificação 1 - Aumento unidimensional de 10 cm na direção +z (Figura 5.a);
- Modificação 2 - Aumento bidimensional de 10 cm em ambas as direções +x e +z (Figura 5.b);
- Modificação 3 - Aumento tridimensional de 10 cm em ambas as direções +x e +z e 2,5 cm na direção +y (Figura 5.c).

O valor aumentado nas dimensões foi escolhido randomicamente, de modo a apenas verificar a influência na alteração de 1, 2 e 3 dimensões ao mesmo tempo.

Para todas as simulações anteriores, não foi avaliado nenhum sólido no interior da cavidade. No entanto, a inserção de partículas no interior da cavidade é de extrema importância para entendimento da distribuição das ondas eletromagnéticas e, suas deformações devido a presença do sólido na cavidade, bem como, para o estudo e análise dos perfis térmicos gerados no secador micro-ondas.

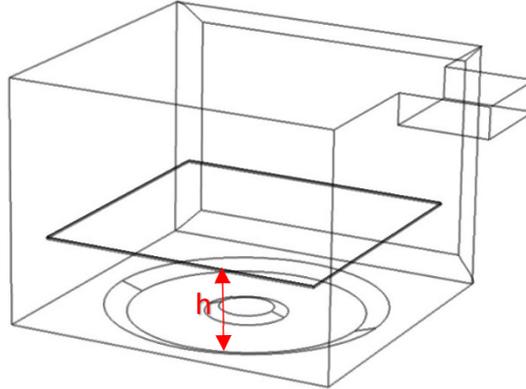
Figura 5: Influência da geometria para as condições de (a) Modificação 1, (b) Modificação 2 e (c) Modificação 3.



### ***Validação da simulação dos campos eletromagnéticos***

Para que as simulações da distribuição dos campos eletromagnéticos, possam ser validadas por meio de resultados experimentais, foi necessário utilizar os dados de Silveira & Petri (2020). Neste trabalho foi desenvolvida uma técnica do mapeamento da distribuição dos *hotspots* no interior de cavidade micro-ondas por meio de uma placa resistiva (dielétrica) feita de carvão ativado. A geometria da cavidade com dimensões originais, denominada cavidade completa, com a placa resistiva posicionada a uma altura ( $h$ ), a partir da base da cavidade, é mostrada na Figura 6. Foram avaliados os perfis de campos eletromagnéticos na placa às alturas de 4,2 cm, 6,0 cm, 9,5 cm, 11,3 cm, 15,2 cm, e 21,8 cm.

Figura 6: Geometria da cavidade completa com placa resistiva numa altura “h”.

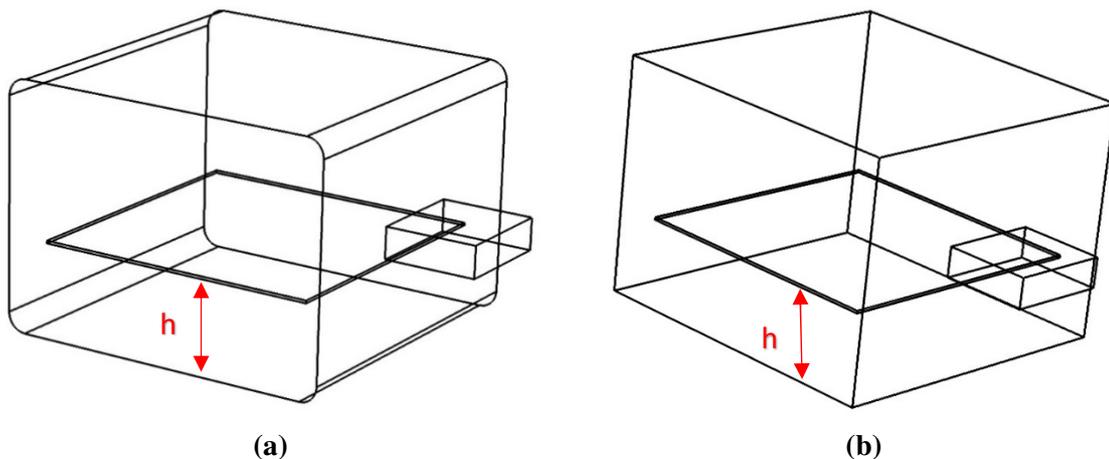


### *Influência do detalhamento da geometria da cavidade nos perfis de campo eletromagnético*

Para verificar a influência da riqueza de detalhes da construção da geometria da cavidade, foi construída também duas cavidades mais simplificadas. A primeira cavidade foi construída sem os detalhes de concavidade presentes no fundo da geometria com somente os detalhes de cantos arredondados (Figura 7.a). A segunda cavidade foi construída inteiramente retangular, sem nenhum detalhe de arredondamento, chanfro ou concavidade da parede do fundo (Figura 7.b). Para estes testes foram simuladas alturas da placa de 4,2 cm, 9,5 cm e 21,8 cm.

9

Figura 7: Geometria da (a) cavidade com somente detalhes de cantos arredondados e (b) cavidade simples, ambas com placa resistiva numa altura “h”



**Validação das simulações dos campos térmicos**

Para validação do modelo de aquecimento micro-ondas de materiais no interior da cavidade foi utilizado resultados experimentais de Alvarenga & Petri (2019), no qual foram realizados testes de aquecimento de água deionizada por 60 segundos em um béquer cilíndrico posicionado no centro da cavidade. A temperatura foi aferida por um termopar do tipo k calibrado e inserido a partir do topo da cavidade até o centro do béquer. Os valores da massa de água e temperaturas obtidas por Alvarenga & Petri (2019) são mostradas na Tabela 1.

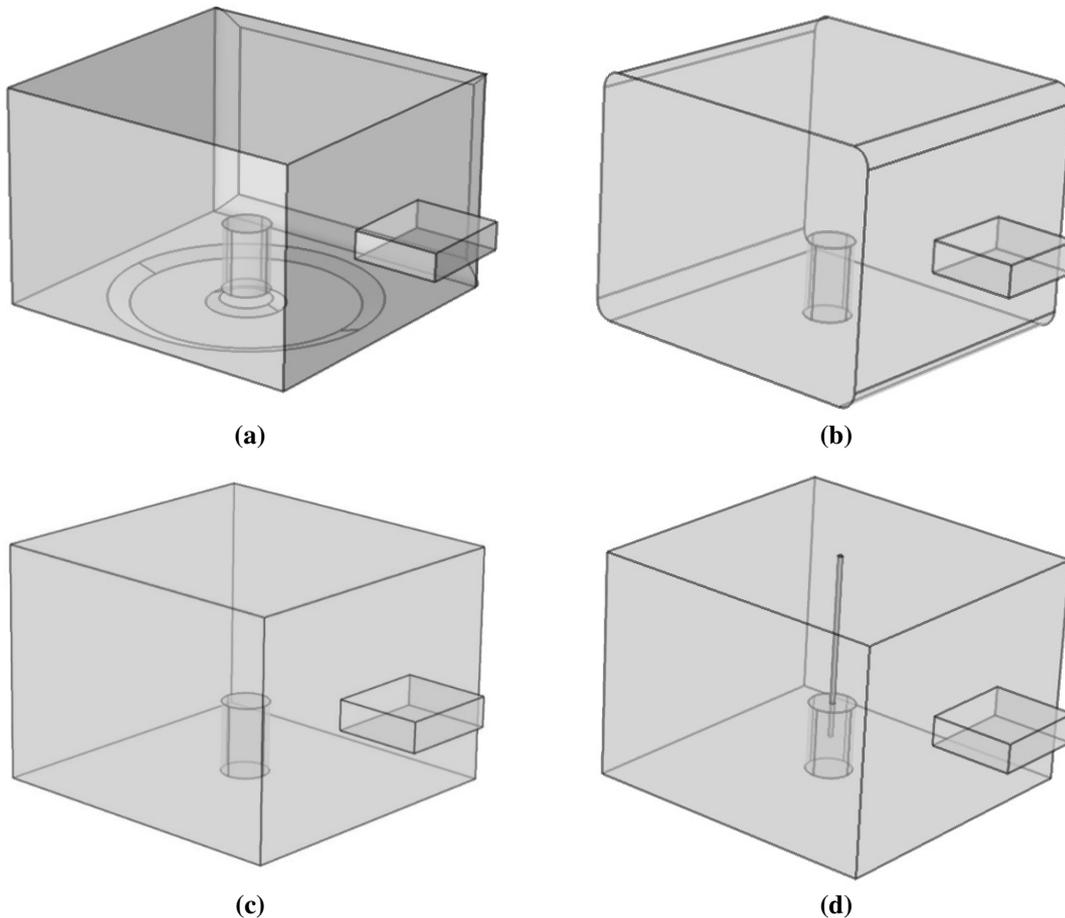
Tabela 1: Valores experimentais dos parâmetros pertinentes na simulação

Massa de água (g)	Temp. inicial (K)	Temp. final (K)
203,69	297,35	329,26

Fonte: Alvarenga & Petri (2019).

A Figura 8.a, mostra a geometria da cavidade completa com béquer posicionado no centro da cavidade, assim como realizado nos ensaios experimentais de Alvarenga & Petri (2019). Para analisar a influência da riqueza de detalhes na cavidade, foi construída também uma geometria da cavidade com somente detalhes de cantos arredondados (Figura 8.b) e da cavidade simples sem nenhum detalhe (Figura 8.c), ambas com béquer posicionado no centro. Para analisar a influência da inserção do termopar no aquecimento da água, foi construída também uma geometria da cavidade simples com termopar de 3 mm de aço inox acoplado ao béquer com água (Figura 8.d).

Figura 8: Cavidades completa com bquer com água para (a) cavidade completa, (b) cavidade com somente detalhe de cantos arredondados, (c) cavidade simples e (d) cavidade simples com termopar.

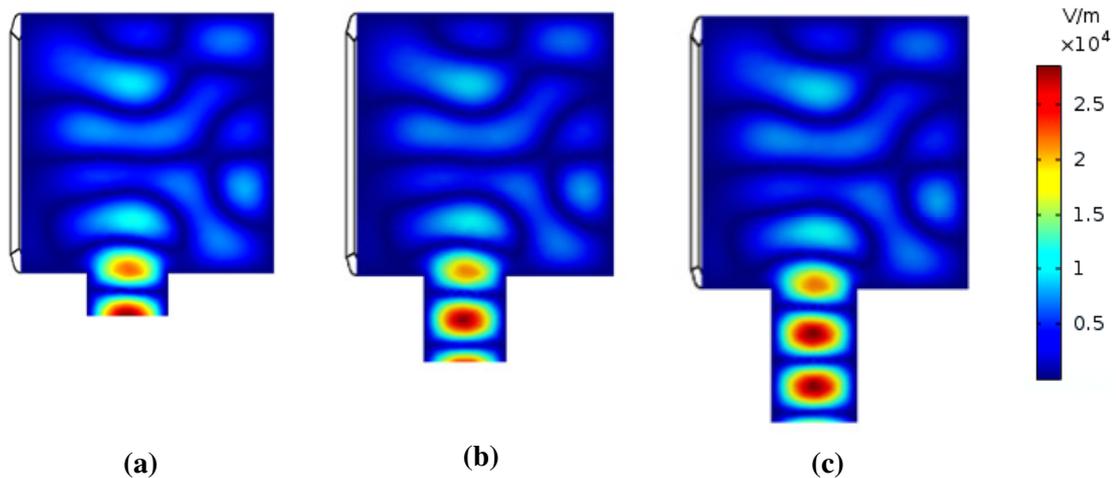


## Resultados e Discussão

### *Avaliação do comprimento da guia de onda na geração dos hotspots*

A guia de onda é o local onde o *magnetron* se conecta à cavidade e, por onde as ondas eletromagnéticas se propagam e formam os denominados campos eletromagnéticos. Determinar comprimentos de guia de onda, que fornecem valores inteiros de número de *hotspots*, pode ser fundamental para redução da atenuação e dissipações das ondas eletromagnéticas. A análise da influência do comprimento do guia, para os tamanhos de 6,12 cm, 12,24 cm e 18,36 cm (valores múltiplos de meio comprimento de ondas – 6,12 cm), são mostradas na Figuras 9.

Figura 9: Contornos de campo elétrico no micro-ondas com guia de onda com comprimento de (a) 6,12 cm, (b) 12,24 e (c) 18,36 cm.



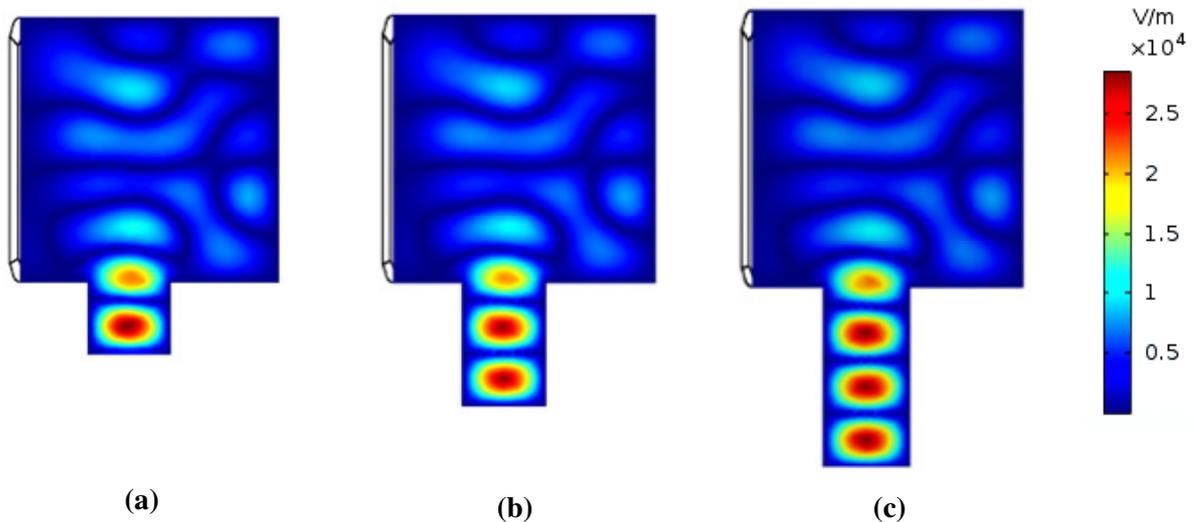
Na Figura 9.a, nota-se uma guia de ondas com um *hotspot* completo e um incompleto, enquanto que na Figura 9.b, constata-se uma guia de ondas com dois *hotspots* completos e um incompleto. Por fim, na Figura 9.c tem-se um guia de ondas com 3 *hotspots* completos e um incompleto na região da guia de onda. A quantidade de *hotspots* inteiros no guia de ondas não tem influência no aquecimento na cavidade, porém *hotspots* incompletos causam a dissipação das oscilações eletromagnéticas e, com isso, diminui a eficiência de aquecimento das micro-ondas (Meredith, 1998).

Os comprimentos ótimos das guias de ondas, para gerar somente *hotspots* completos, foram determinados por meio de sucessivas simulações, aumentando ou diminuindo o comprimento da guia a cada 1 cm, para buscar comprimento ideal da guia de onda, a fim de obter apenas *hotspots* completos. A Figuras 10 apresenta a cavidade micro-ondas com guias de onda com 10,24 cm, 17,24 cm e 24,24 cm esboçando 2, 3 e 4 *hotspots* completos, respectivamente.

Analisando a Figura 10, é possível verificar a quantidade de *hotspots* inteiros na guia de onda, porém, estes não têm influência no comportamento do campo eletromagnético dentro da cavidade. Pode-se constatar que os contornos de campo eletromagnético dentro das cavidades são iguais, independentemente do comprimento da guia de onda. Portanto, pode-se concluir, que a quantidade de *hotspots* que são gerados no guia de onda não interfere diretamente nos

campos eletromagnéticos na cavidade, e essa análise vale inclusive para as cavidades representadas nas Figuras 9, no qual se percebe *hotspots* incompletos.

Figura 10: Contorno de campo elétrico da cavidade completa com guia de onda com comprimento de (a) 10,24cm, (b) 17,24 cm e (c) 24,24 cm.



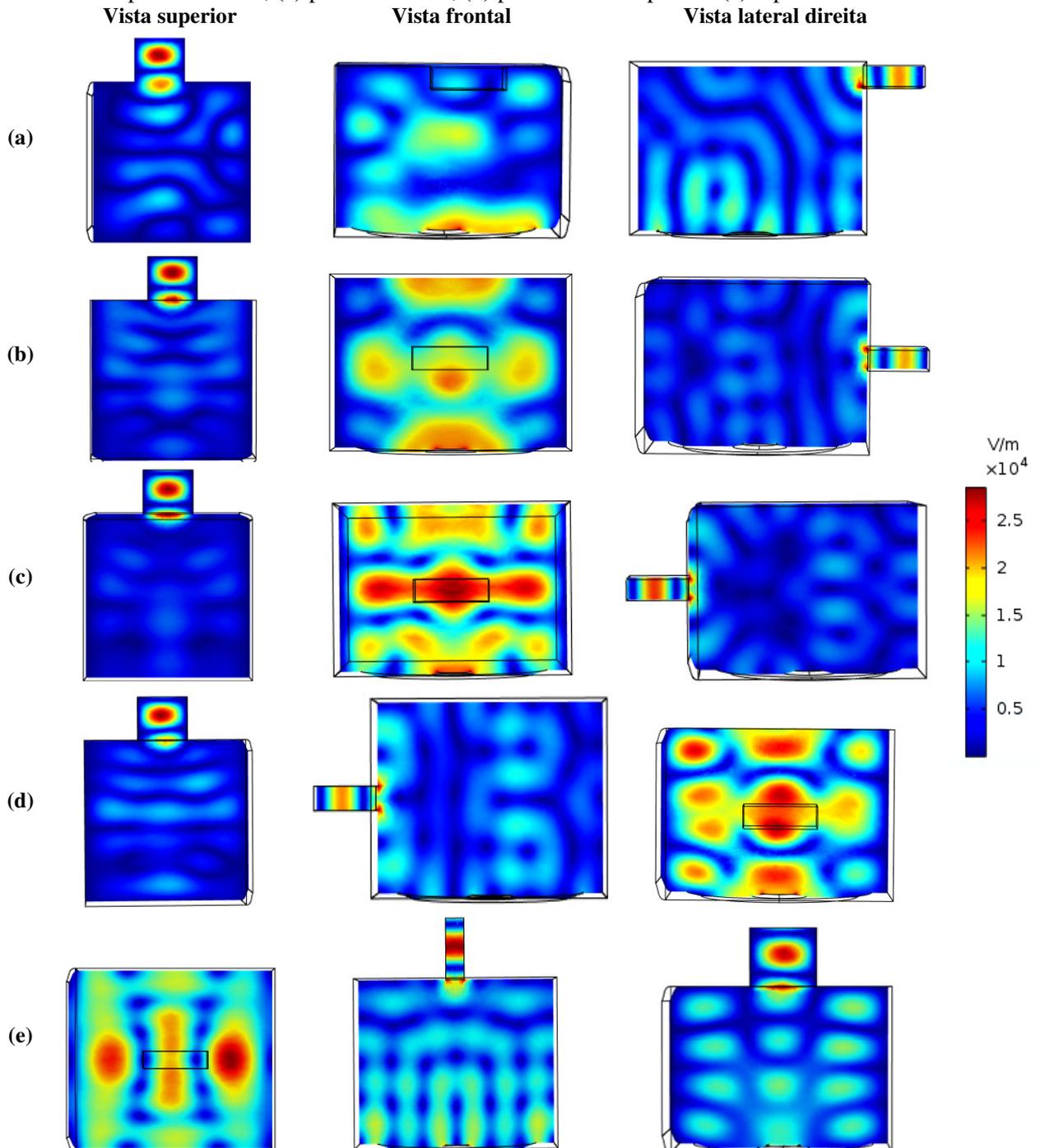
### *Avaliação do posicionamento da guia de onda nos perfis de campos eletromagnético no interior da cavidade*

A Figura 11 mostra a distribuição das ondas eletromagnéticas nas vistas superior, frontal e lateral da cavidade com guia de ondas posicionado na parede lateral direita (posicionamento original), na parede frontal, na parede posterior, na parede lateral oposta ao original e no topo.

Pela avaliação da Figura 11, foi possível ver que a guia posicionada em paredes diferentes causa modificações significativas nos perfis dos campos eletromagnéticos no interior da cavidade. Essas modificações podem ser devido a forma com que as ondas são inseridas na cavidade. A partir do momento em que foi modificado o local da porta, elas possuem a tendência de propagar-se de forma diferente no interior da cavidade, pois, as ondas são expostas a distribuições diferentes no campo tridimensional em relação as dimensões originais.

Vale ressaltar que a quantidade de *hotspots* no guia de onda não foi alterada, mesmo alterando o posicionamento no qual estes guias estão posicionados. Um fato importante, visto que *hotspot* completos não causam dissipação de ondas, e então, tal dissipação resultaria em uma perda de eficácia no equipamento.

Figura 11: Contornos de campo elétrico com guia de ondas posicionada na (a) parede lateral, (b) parede frontal, (c) parede traseira, (d) parede lateral oposta e (e) topo.



A Tabela 2 apresenta os valores médios dos campos elétricos das simulações com os guias de ondas posicionados em diferentes paredes da cavidade.

Tabela 2: Média do campo elétrico nos testes de posicionamento da guia de ondas.

Posicionamento da guia	Campo eletromagnético médio (V/m)
Original	5746,05
Frontal	4200,65
Traseiro	3248,74
Lateral oposta	5303,56
Topo	5882,52

Fonte: Autor.

Analisando a Tabela 2, pode-se comprovar que a modificação do posicionamento da guia de ondas, influencia os perfis de campo eletromagnéticos obtidos e também na intensidade média das ondas eletromagnéticas devido à flutuação dos valores.

Avaliando os valores de campo eletromagnético médio, pode-se constatar que os maiores valores médios da intensidade do campo eletromagnético são obtidos, quando a guia de onda está localizada no topo da cavidade. Definir condições na qual são obtidos valores máximos de intensidade média das ondas eletromagnéticas, é importante para otimização dos processos de secagem, pois para intensidades do campo eletromagnéticos mais elevadas, indicam que as atenuações estão sendo minimizadas, com isso, tem-se o favorecimento do processo de secagem.

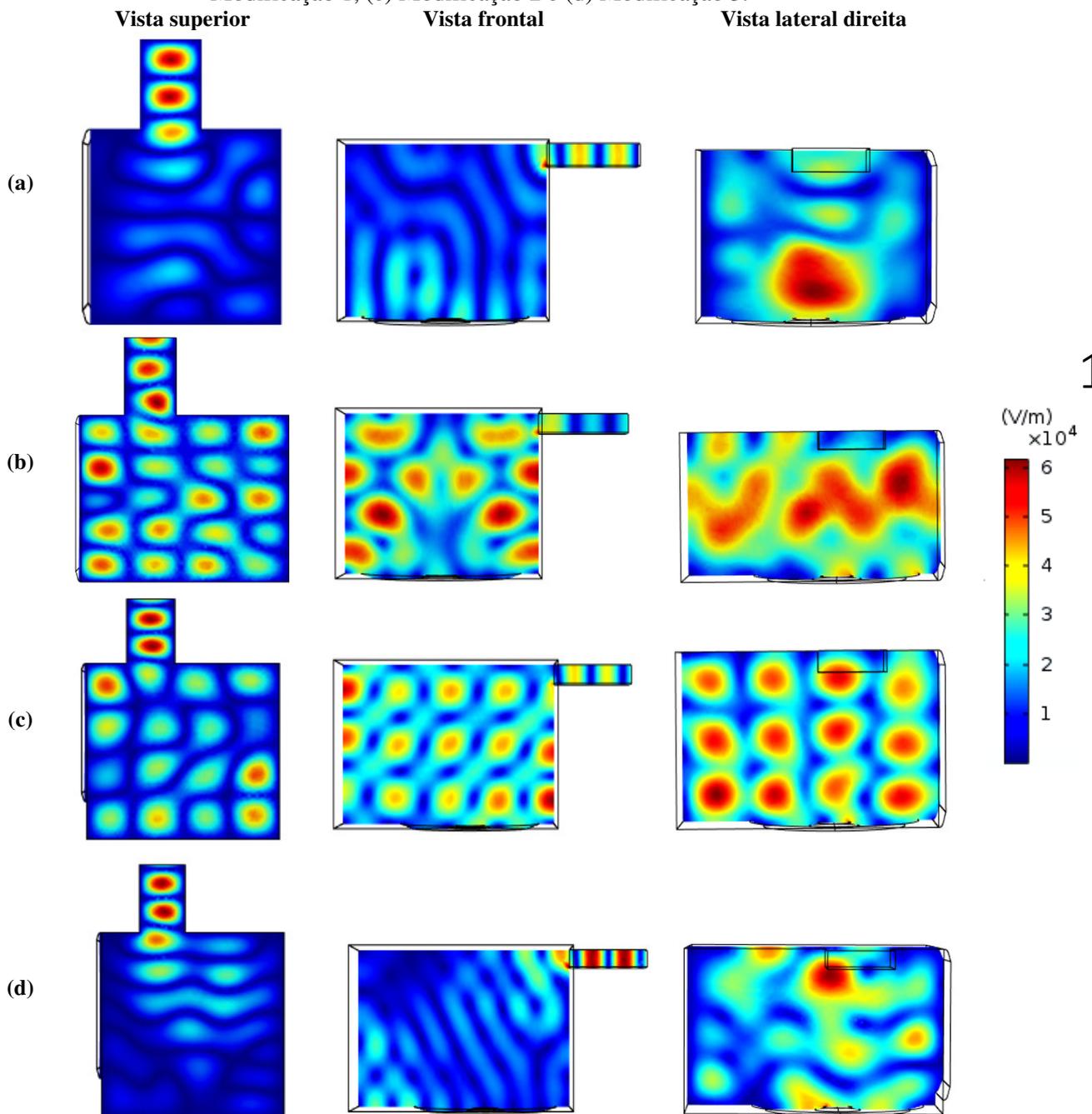
Os demais posicionamentos da guia de onda na cavidade, apresentaram valores mais baixos. Sendo que, quando a guia de onda foi instalada na região inferior da cavidade, o menor valor foi obtido. Quando se deseja que o guia seja colocado nestas posições é preciso atenção, pois através da Tabela 2 pode-se perceber que por apresentarem menores valores, e assim, o equipamento apresenta dissipação de energia, que pode comprometer a seu rendimento.

### *Avaliação das dimensões da cavidade nos perfis de campos eletromagnético no interior da cavidade*

A Figura 12, apresenta os resultados de campos elétricos na vista superior, frontal e lateral direita, nos testes de influência das dimensões da cavidade, para a cavidade original, Modificação 1, 2 e 3.

Pela Figura 12, percebe-se que o aumento das dimensões da cavidade é suficiente para não só alterar o campo eletromagnético dentro da cavidade, como também é suficiente para modificar o *hotspot* nos guias de onda.

Figura 12: Contornos de campo elétrico na cavidade para (a) dimensões originais, (b) Modificação 1, (c) Modificação 2 e (d) Modificação 3.



Observando a distribuição do campo eletromagnético no guia de onda é possível perceber na Modificação 1, um *hotspot* incompleto foi formado e os demais *hotspots* apresentaram deformações. Na Modificação 2, houve a geração de um *hotspot* incompleto, porém as deformações ficaram menos acentuadas. Por fim, na Modificação 3, houve apenas a formação de *hotspots* completos, apresentando um maior grau de similaridade com a cavidade original.

Logo, pode ser observado, que quando se faz alterações nas três dimensões da cavidade do micro-ondas (Modificação 3) a tendência é que o perfil de campo eletromagnético na região da guia de onda apresente alta similaridade com o perfil obtido com as dimensões originais. Porém, a modificação de uma ou duas dimensões (Modificação 1 e 2) provoca grandes alterações nos perfis eletromagnéticos da guia de onda e da cavidade, gerando perfis altamente irregulares.

Para uma melhor elucidação do comportamento das alterações das dimensões no campo eletromagnético, foi feita uma análise quantitativa desses valores, por meio de resultados médios de campo eletromagnético no interior da cavidade, assim como mostrado pela Tabela 3.

Tabela 3: Média do campo elétrico nos testes de modificação da dimensão da cavidade.

Cavidade	Campo Eletromagnético Médio (V/m)
Original	5746,06
Modificação 1	19079,68
Modificação 2	12363,64
Modificação 3	4299,01

Através dos valores de campo eletromagnético é possível perceber que a modificação na direção x, é onde se tem a maior influência no aumento da intensidade do campo eletromagnético, pois, é quando se têm um aumento nesta direção é que se encontra o maior valor. Quando se faz um aumento da dimensão em duas direções, o valor de campo é reduzido em relação ao resultado inicial para aumento unidimensional. Nota-se, que quando se aumenta proporcionalmente todas as direções como foi o caso da modificação 3, se percebe que o campo eletromagnético, foi proporcionalmente reduzido aproximando ainda mais do valor da configuração original.

A partir dos contornos de campos eletromagnéticos da simulação, nota-se que todos esses contornos foram alterados a partir da configuração original. É importante perceber analisando a Tabela 3 que quando as modificações 1 e 2 foram feitas, a intensidade do campo aumentou, que indica uma otimização na cavidade, porém, quando todo o volume da cavidade sofreu alterações esta intensidade de campo foi reduzida, ficando inclusive menor do que o valor cavidade original.

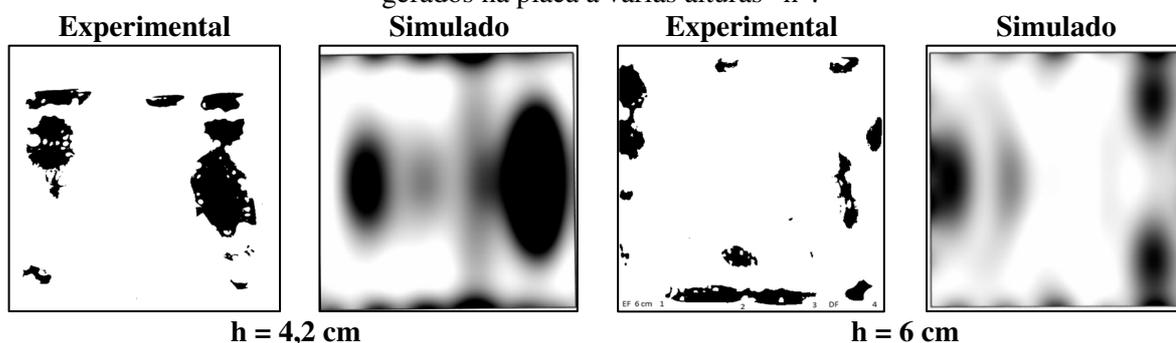
A partir dos valores da Tabela 3 e fazendo um comparativo com a Tabela 2, pode-se verificar que o posicionamento do guia de onda em locais diferentes na cavidade afeta menos os valores médios de intensidade de campo eletromagnéticos do que o aumento das dimensões da cavidade.

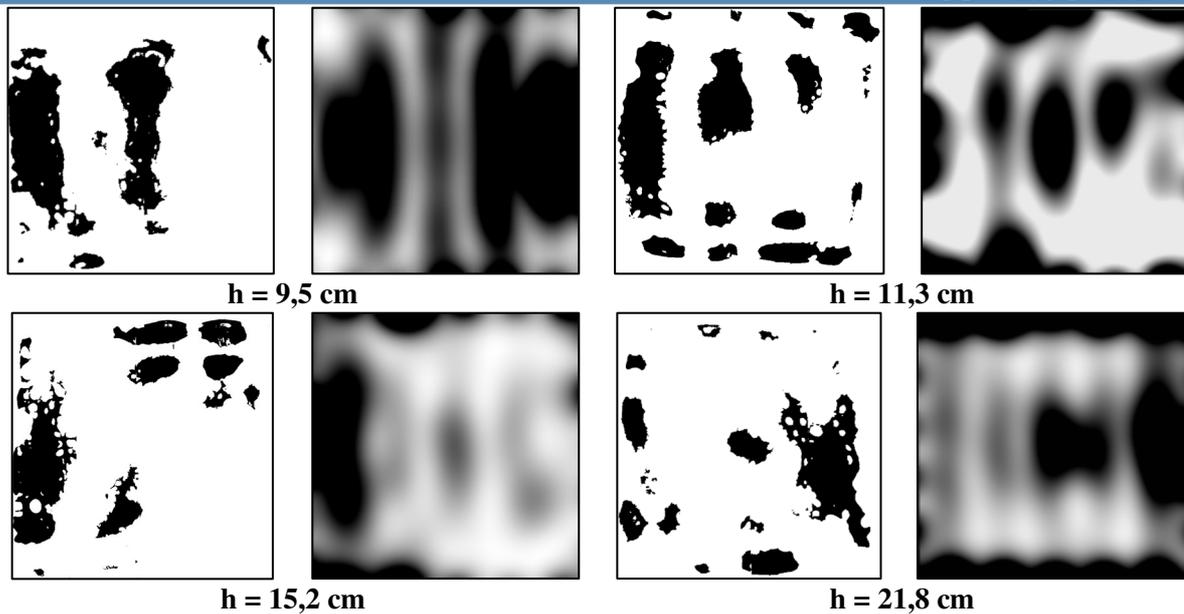
### *Validação da simulação dos campos eletromagnéticos*

Para avaliar se os parâmetros e condições da simulação micro-ondas foram coerentes com a realidade, foi realizado a comparação dos *hotspots* obtidos por simulações, com aqueles obtidos experimentalmente por meio do aquecimento da placa resistiva no trabalho de Silveira & Petri (2020). A comparação entre os perfis eletromagnéticos obtidos na simulação da cavidade completa e os obtidos experimentalmente, para as alturas de 4,2 cm, 6,0 cm, 9,5 cm, 11,3 cm, 15,2 cm e 21,8 cm, são mostrados na Figura 13.

18

Figura 13: Comparativo qualitativo experimental e simulado (cavidade completa) dos *hotspots* gerados na placa à várias alturas “h”.





Os resultados experimentais não permitem uma resolução excepcional dos *hotspots* enquanto que a simulação permitiu identificar claramente os contornos dos campos eletromagnéticos na placa. Comparando os resultados experimentais e simulados nota-se, por exemplo, que para a altura de 4,2 cm, em ambos, foi possível identificar um *hotspot* de maior tamanho no lado direito e um de menor tamanho no lado esquerdo, além de pequenos *hotspots* espalhados na parte superior da placa. Na altura de 6 cm é possível observar uma ausência de *hotspots* no centro da cavidade e pequenos indícios dos mesmos na sua borda, tanto no experimental quanto no simulado.

No geral, observa-se que há uma boa previsão dos *hotspots*, mas uma sutil diferença quanto ao posicionamento do mesmo na cavidade. Algumas simulações apresentaram o *hotspot* pouco deslocado, sendo resultado de uma imprecisão numérica ou devido às imprecisões experimentais nas medidas de posição da placa. Outro fator que pode influenciar o posicionamento dos *hotspots* é as simplificações dos detalhes ao se construir a geometria CAD.

Outro ponto que poderia auxiliar na obtenção de perfis de campo eletromagnético com mais precisão e riqueza de detalhes, seria a utilização de malhas mais refinadas localmente, ou seja, com um maior número de elementos de malha nas fronteiras da placa, no entanto, isso também acarretaria em um maior custo computacional envolvido no processo de simulação. Esse aumento no número de células ocasiona uma redução nos erros de discretização numérica,

o que pode fazer com que os resultados numéricos se aproximem mais do resultado exato do modelo.

Para verificar a influência dos detalhes na geometria da cavidade, na distribuição das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade, são apresentados os resultados de campo elétrico para as alturas de 4,2 cm, 9,5 cm e 21,8 cm da cavidade completa, cavidade com somente cantos arredondados e cavidade simples mostrado pela Figura 14.

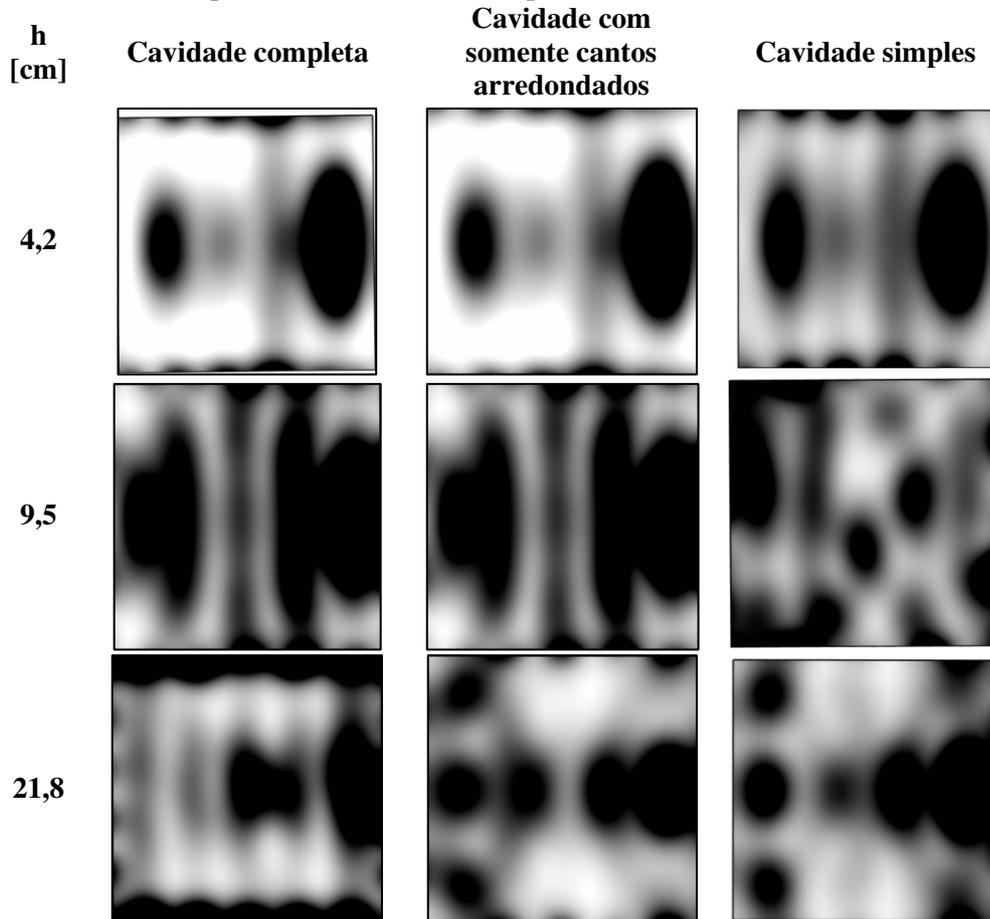
Pela Figura 14 é possível observar que a riqueza de detalhes ao construir uma geometria CAD da cavidade pode ocasionar uma diferença nos contornos de campo eletromagnético na placa. Na cavidade com somente os cantos arredondados, é possível observar grande diferença de *hotspots* em apenas uma das alturas escolhidas (21,8cm). Já na cavidade mais simples, nota-se a diferença nos *hotspots* em duas alturas (9,5cm e 21,8cm).

Quando a placa foi deslocada para maiores alturas, o contorno de temperatura, se alterou de uma simulação para outra. Os detalhes da cavidade influenciaram nos contornos da placa.

Essas diferenças nos perfis gerados, podem ter sido ocasionadas também devido a um maior refinamento local da malha, em regiões de maior complexidade do secador micro-ondas. Visto que, na geometria simplificada, a malha foi gerada de maneira homogeneamente, sem refinamentos locais. Deve-se destacar que o tipo e número de células de malhas computacionais apenas influência no resultado final da simulação, caso não haja um bom refinamento na geometria. Por isso, testes de independência de malha são tão importantes de se realizar antes de se iniciar um estudo numérico.

Vale ressaltar que o *software* COMSOL utiliza o método dos elementos finitos (FEM) para resolução das equações diferenciais, com isso, todos os elementos das malhas foram tetraédricos, sendo essa, uma condição primordial para aplicação do FEM.

Figura 14: Comparativo qualitativo dos resultados simulados dos *hotspots* gerados na placa à várias alturas (h) a partir da base da cavidade



#### *Validação das simulações dos campos térmicos*

A Tabela 4 são apresentados os valores de temperatura final da água após o tempo de 60 segundos de aquecimento na simulação, tempo este, que também foi usado durante os experimentos em Alvarenga & Petri, (2019).

Tabela 4: Resultados das simulações do aquecimento do béquer com água nas diferentes cavidades.

Cavidade	Temperatura final [°C]
Experimental	56,16
Completa	44,67
Cantos arredondados	46,53
Simples sem termopar	51,29
Simples com termopar	52,30

Ao analisar os resultados da Tabela 4 é possível perceber, pela da simulação da cavidade completa, que a temperatura final (44,67°C), não se aproximou muito do resultado alcançado experimentalmente (56,16°C), obtendo um erro relativo de 25,7%. À medida que a riqueza de detalhes foram reduzindo na cavidade, o valor de temperatura final simulado foi aumentando para 46,53°C (cantos arredondados) e 51,29°C (cavidade simples), se aproximando do resultado experimental com um erro relativo de 17,2% e 8,7%, respectivamente.

Como visto, a aproximação dos resultados da simulação com relação ao experimental, aconteceram a partir do momento em que houve redução na riqueza de detalhes da malha, pois, a simulação conseguiu refinar melhor a malha próxima ao béquer, quando esteve em situações com menos detalhes na cavidade.

Com a inserção do termopar no béquer, como é realizado experimentalmente, foi possível alcançar um valor de temperatura de 52,30°C podendo atingir um erro relativo de 6,9% com relação ao experimental. Esses resultados mostram a boa aproximação quantitativa das simulações de aquecimento micro-ondas de materiais, validando o modelo utilizado nas simulações desse trabalho.

## Conclusões

Os resultados comparativos deste trabalho mostraram que a metodologia numérica adotada tem condições de ser aplicada na previsão tanto dos campos eletromagnéticos quanto térmicos em fornos micro-ondas convencionais. Mostraram também concordância dos resultados simulados com os resultados experimentais. Sendo assim, a metodologia numérica aqui abordada e validada, pode ser aplicada para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Ao analisar o comprimento do guia de onda, observou-se que os campos eletromagnéticos na cavidade não sofrem alterações, mesmo que o comprimento do guia fosse modificado. Quando o comprimento do guia de onda é modificado, a quantidade de *hotspots* no guia também é alterada, e dependendo do comprimento é possível gerar *hotspots* completos e/ou incompletos.

Quanto o posicionamento da guia de onda, quando o mesmo está posicionado na parede posterior e frontal, foram apresentadas resultados piores, pois, a intensidade de campo eletromagnético médio foi menor. E com relação quando a guia é posicionada na parede de topo o resultado é melhor em termos de intensidade de campo, assim, pode-se ser feita otimização na cavidade a partir desse posicionamento.

Em relação as dimensões da cavidade, quando se busca aumentar as dimensões da do secador micro-ondas, o campo eletromagnético é qualitativamente alterado. No momento em que foi alterada de forma unidimensional e bidimensional as dimensões da cavidade, houve um aumento quantitativo na intensidade de campo eletromagnético. O aumento tridimensional não apresentou um resultado favorável, pois, ao aumentar todo o volume da cavidade, teve-se uma redução na intensidade do campo eletromagnético.

Na grande maioria das alturas na qual foi aferido, os *hotspots* apresentaram resultados próximos aos vistos nos dados experimentais, e mostram que os detalhes que estão presentes na cavidade influem diretamente no resultado qualitativo. Isso se deve ao fato de que a quantidade de detalhes na cavidade pode fazer com que a malha fique menos refinada na placa, pois na malha automática gerada no *software* COMSOL, em regiões mais complexas, um maior número de células é formado, e como foi utilizada um número de células aproximadamente constante para todas as cavidades, logo a região do seio do secador micro-ondas, apresenta um menor número de elementos, em comparação com as cavidades simplificadas., podendo assim, ocasionar alterações no formato dos *hotspots*.

Verificando a temperatura final do béquer em cada cavidade, percebe-se que quando a cavidade teve mais detalhes ocorreu uma diferença nos resultados em relação as cavidades mais simples, alcançando valores de temperatura final menor ao final da simulação. E ao comparar com o resultado experimental, verifica-se que os resultados na cavidade simples foram os que mais se aproximaram da temperatura final. Esta diferença na temperatura final, se dá pelo fato dos detalhes na cavidade, atenuarem um pouco a transferência de calor, e assim, o béquer fica

menos refinado. Quando, o termopar foi inserido na simulação, os resultados se aproximaram ainda mais do valor final da temperatura experimental, mostrando que componentes externos podem influenciar na simulação, de modo que os resultados finais possam ser melhorados quando eles são incluídos.

Através do trabalho foi possível verificar os parâmetros que mais influenciam no campo eletromagnético da cavidade, sendo possível aplicar esses resultados em futuros projetos de otimização e *scale-up* de cavidade micro-ondas.

### Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico-financeiro proporcionado pela FAPEMIG (APQ-00022-18), CNPq (427962/2018-8) e UFLA (PIDEG357-2018).

### Referências

- ALVARENGA, T.F. & PETRI, I.J., **Estudo da viabilidade da secagem de café gourmet via micro-ondas**. In: Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. São Paulo: Blucher, 1(6), 3227-3233, 2019. DOI: 10.5151/cobecic2019-SOCP63.
- CONFORTI, E.; KIECKBUSCH, T.G.; MARSAIOLI, A. J., **A proptotype of a combined hot air and microwave rotary cylindrical oven for continuous drying of granular products**. Engineering and Food, Preservation Processes and Related Techniques. Elsevier, London & New York, v. 2, p. 679-685, 1990.
- CORRÊA, J. L. G.; DEV, S. R. S.; GARIEPY, Y.; RAGHAVAN, G. S. V. **Drying of Pineapple by Microwave-Vacuum with Osmotic Pretreatment**. Drying Technology, v. 29, p. 1556- 1561, 2011. DOI: 10.1080/07373937.2011.582558.
- COSTA, F.O.; ALVARENGA, T.F., MESQUITA, T.V.C.; PETRI, I.J., **Hybrid drying pulped arabica coffee cherry beans (Coffea Arabica l. cv. Catuai) using a hexagonal microwave dryer**, Journal of Food Engineering, xx, xx-xx, 2020. DOI: xxxxxxxxxxxx
- CUNHA, M. L.; CANTO M. W.; MARSAIOLI, A. J.; **Secagem de café cereja descascado por ar quente e microondas**, Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, v. 23(3), p. 381-385, 2013. DOI: 10.1590/S0101-20612003000300015.
- DIAS, L. G.; **Estudo do Processo de Secagem em Estufa e por Micro-ondas de Compósitos Cerâmicos de Argila e Resíduos de Esteatito**, Dissertação de Mestrado | Universidade Federal de São João Del Rei, São João Del Rei – MG, 2013.
- JUNQUEIRA, J. R. J.; CORRÊA, GOMES, J. L.; ERNESTO, D. B. **Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices**. Journal of food processing and preservation, v. 41, p. e13250, 2017. DOI: 10.1111/jfpp.13250.

- LIMA, R. C. **Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Incompressíveis com Transferência de Calor e Massa por um Método de Elementos Finitos e Subdomínios.** Dissertação | Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, São Paulo, 2005.
- MEREDITH, R.J., 1998. **Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating.** IET
- PANISSET, C. M. A. **Novas Alternativas para o Sistema de Separação Sólido-Líquido na Perfuração de Poços de Petróleo: Teste de uma Unidade de VCS; Busca do Aumento de Eficiência da Operação de Hidrociclonagem; e Tratamento da Borra de Centrifugação por Microondas.** Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- PETRI, I. J.; **Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo,** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2017.
- PETRI, I.J., SANTOS, J.M., ROSSI, A.S., PEREIRA, M.S., DUARTE, C.R., ATAIDE, C.H., 2017. **Influence of Rock Chemical Composition in Microwave Heating and Decontamination of Drill Cuttings,** Mat. Sci. Forum (online), 899, 469-473. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.899.469
- POZAR, D. M. **Microwave Engineering.** United States: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- RODRIGUES, L. M., ATAIDE, C. H., **Secadores Rotatórios.** Monografia (TCC), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2019.
- SHARMA, G. P. & PRASAD, S. **Drying of garlic cloves by microwave–hot air combination.** Journal of Food Engineering, 50(2), 99-105, 2001. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00200-4.
- SILVEIRA, A. F. & PETRI, I.J., 2020. **Mapeamento da distribuição do campo eletromagnético no interior de uma cavidade multi-modo de um forno micro-ondas.** In: Anais da I Semana da Engenharia Química de UFLA (I SEQ/UFLA).
- VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, W., **An Introduction to Computational Fluid Dynamics.** Person, Second Edition, 2007.