



## **ANÁLISE CFD DO POSICIONAMENTO E QUANTIDADE DE GUIA DE ONDAS EM SECADORES ROTATIVOS MICRO-ONDAS APLICADOS NA SECAGEM DE CAFÉS ESPECIAIS**

ANDRESSA J. B. CARVALHO<sup>1\*</sup>, IRINEU PETRI JÚNIOR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Lavras, Setor de Engenharia Química, Departamento de Engenharia.

\*e-mail: [andressa.jbcarvalho@gmail.com](mailto:andressa.jbcarvalho@gmail.com)

**RESUMO** - A secagem é uma operação unitária responsável por remover líquidos de materiais sólidos. Existem diversos equipamentos que podem ser utilizados para isso, sendo destacado os secadores micro-ondas, devido suas vantagens. Portanto, objetivou-se analisar o posicionamento e a quantidade de guias de ondas em secadores rotativos micro-ondas de cafés especiais, utilizando-se a técnica CFD. Para a otimização do posicionamento de um guia de ondas na cavidade de 95,43 litros, foram propostas 18 posições, sendo analisadas as distribuições do campo eletromagnético, variação de temperatura e campo elétrico médio. Já para o estudo de múltiplos guias de ondas, foram propostos tambores com 2, 3 e 6 guias com diferentes arranjos, sendo analisado variação de temperatura, potência de saída e distribuição do campo eletromagnético. O melhor posicionamento encontrado para um guia de ondas foi adjacente à parede circular. Para múltiplos guias, com 2 magnetrons é preferível que os guias sejam arranjos em faces opostas com 180° de rotação entre eles. O melhor posicionamento com 3 magnetrons é quando estão equidistantes em um arranjo triangular. Já para 6 magnetrons, 3 guias devem ser arranjos em uma face circular e os outros três na face oposta com a mesma orientação.

### **INTRODUÇÃO**

Na década de 40 os fornos micro-ondas começaram a ser utilizados para aquecer ou descongelar alimentos. Entretanto, este era pouco acessível, devido ao seu preço e peso. Atualmente, estes se tornaram mais acessíveis, sendo comumente encontrado em ambientes domésticos, devido a sua praticidade (SANSEVERINO, 2002). Basicamente, as micro-ondas são ondas eletromagnéticas que podem ser emitidas com frequência que varia de 300 MHz e 300 GHz, possuindo comprimentos de ondas entre 1 mm e 1 m, respectivamente. Os fornos comercializados possuem uma frequência de 2450 MHz (BUFFLER, 1995).

A geometria do forno micro-ondas consiste basicamente em cavidade, guia de ondas e magnetron. A cavidade consiste em um

compartimento metálico enclausurado por onde as micro-ondas são refletidas em direção ao material a ser aquecido, podendo ter diferentes formatos. O magnetron é o principal componente do sistema elétrico do forno micro-ondas, pois ele é responsável por emitir as ondas eletromagnéticas. Já o guia de ondas é uma estrutura responsável por guiar as ondas eletromagnéticas para o interior da cavidade. Sua geometria pode ser retangular, cilíndrica ou coaxial (PETRI, 2017).

Os fornos micro-ondas domésticos passaram a ser utilizados em laboratórios de pesquisa devido a sua alta capacidade de aquecimento de substâncias polares. São diversas as vantagens encontradas com a utilização desse equipamento. Uma delas é o aquecimento volumétrico fornecido, se diferenciando de outros tipos de fornos que apresentam o aquecimento a partir de uma superfície. Para que estes sejam utilizados em

laboratórios é necessário que sejam feitas algumas modificações, como por exemplo: alteração da frequência, aumento da potência ou até mesmo uma mudança da geometria (CARVALHO, 2005).

A secagem é uma operação unitária na qual a água ou outro líquido é removido de um material sólido. Existem diversas vantagens de se utilizar esse método, como a redução de perdas pós-colheita, facilidade no transporte e armazenamento e até mesmo aumento da vida útil do produto. Entretanto, assim como em outros processos de tratamento térmico, com a utilização da secagem, pode haver perda de nutrientes do alimento (CELESTINO, 2010).

Existem diversas maneiras de realizar a secagem de materiais, podendo ser divididas em secagem natural e artificial. A secagem natural pode ser utilizada em regiões com elevadas temperaturas e baixo teor de umidade. Este é um processo de baixo custo por necessitar apenas de bandejas e redes protetoras contra insetos. Entretanto, apresenta uma maior perda nutricional quando comparado com a secagem feita com condições controladas. A secagem artificial é feita pela inserção do material em um equipamento específico, tendo um controle rigoroso do tempo. Existem diversos equipamentos que podem ser utilizados, podendo ser citados: secador de bandeja, esteira, túnel, tambor rotativo, leito fluidizado, leito de jorro, dentre outros (CELESTINO, 2010).

Um dos métodos artificiais mais utilizado é a secagem por ar quente, em que a transferência de calor se dá pela convecção. Entretanto, neste método, o alimento que está passando pelo processo de secagem pode sofrer danos em seu sabor e em seus nutrientes, devido ao elevado tempo de secagem. Portanto, a secagem por meio micro-ondas vem sendo estudada nos últimos anos, por apresentar diversas vantagens, podendo ser citados a diminuição do tempo de secagem e menor custo (CONTRERAS *et al.*, 2008).

São encontrados diversos trabalhos na literatura que tratam da secagem pela utilização de micro-ondas, podendo ser citados a secagem de café por meio de um forno micro-ondas hexagonal (COSTA *et al.*, 2021), secagem de carbonato de cálcio precipitado por meio de um forno micro-ondas retangular com 30 litros

(LEAL, 2012) e secagem de vagem de algaroba por meio de um forno micro-ondas doméstico de 18 litros (COSTA *et al.*, 2016). Para se obter produtos de qualidade, é necessário que a operação seja otimizada, por meio de estudos sobre o tema.

A fim de diminuir os custos e tempo de experimentos, a técnica da Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) se mostra uma grande aliada. Este método se baseia na resolução das equações diferenciais de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, através de *softwares* computacionais (MAITELLI, 2010).

O café é um grão de muita importância no cenário brasileiro. Para atender as exigências do paladar dos apreciadores dessa bebida, surgiu o conceito de café especial. Para que o café seja qualificado, ele deve seguir o método de classificação *Specialty Coffee Association* (SCA) passando pelas avaliações de grãos crus, de grãos torrados e análise sensorial. Após as três análises, os grãos devem receber uma pontuação entre 80 e 100 pontos para serem classificados como café especial.

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo otimizar a posição de um guia de ondas no interior de uma cavidade. E, além disso, analisar o comportamento da eficiência do forno micro-ondas com múltiplos guias de ondas para secagem de cafés especiais, utilizando o método CFD.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi dividida em duas partes, sendo que a primeira consistiu no posicionamento de um guia de ondas em uma cavidade de 95,43 litros. Já na segunda parte, foi feita uma otimização da quantidade de guia de ondas e seus posicionamentos para a uma cavidade de 175,98 litros. Essas cavidades foram projetadas pelos mesmos autores em projeto anterior, que tinha como objetivo dimensionar cavidades para a secagem de cafés especiais.

### Posicionamento do guia de ondas no interior da cavidade

Os fornos micro-ondas domésticos geralmente possuem apenas um guia de ondas, responsável por direcionar as ondas

eletromagnéticas dentro da cavidade. Este pode ser localizado de maneiras distintas nas paredes da cavidade. Portanto, foram propostas 18 diferentes posições para analisar a sua influência nas simulações. As posições propostas são apresentadas na Figura 1.

As posições 1, 2, 3 e 4 foram dispostas horizontalmente na parede lateral do tambor, à uma distância de  $1$ ,  $1/2$  e  $1/3$  do raio do tambor e tangente à parede externa, respectivamente. As posições 5, 6, 7 e 8 também foram dispostas à uma distância de  $1$ ,  $1/2$ ,  $1/3$  do raio do tambor e tangente a parede externa, respectivamente, mas os guias de ondas foram posicionados verticalmente. Já os guias de ondas 9, 10, 11, 12 e 13 foram posicionados verticalmente na parede frontal à uma distância de  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/6$  da altura do forno e tangente à superfície externa, respectivamente. As posições 14, 15, 16, 17 e 18 foram dispostas horizontalmente na parede frontal à uma distância de  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$  e  $1/6$  e tangente a parede exterior, respectivamente.

A cavidade utilizada foi posicionada horizontalmente, possuindo 450 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. O guia de ondas utilizado foi o modelo comercial retangular WR340 com dimensões 86,36 mm x 43,18 mm x 86,36 mm. As geometrias CAD das cavidades com seus respectivos guias de ondas foram confeccionadas no *software SpaceClaim*.

As simulações dos fornos micro-ondas foram desenvolvidas no *software Comsol Multiphysics 5.3*, aplicando-se a abordagem *microwave heating*. No *software*, foi definido que as ondas estavam sendo propagadas com frequência de 2450 MHz por uma face retangular, onde fica posicionado o magnetron com potência de 1000 W. Foi utilizado um campo eletromagnético do tipo *Transverse Eletrical* com modo 10 (TE10), sendo este calculado no domínio da frequência.

Nas paredes das cavidades do tambor, foram consideradas as condições de condutor elétrico perfeito e impedância. As propriedades do ar, do aço (*Steel AISI 4340*) e da água utilizadas foram obtidas no banco de dados do *software Comsol (Built-In)*, sendo essas apresentadas na Tabela 1. Os métodos utilizados para as simulações foram os mesmos validados por Carvalho e Petri (2021) por meio de um aquecimento experimental de água.

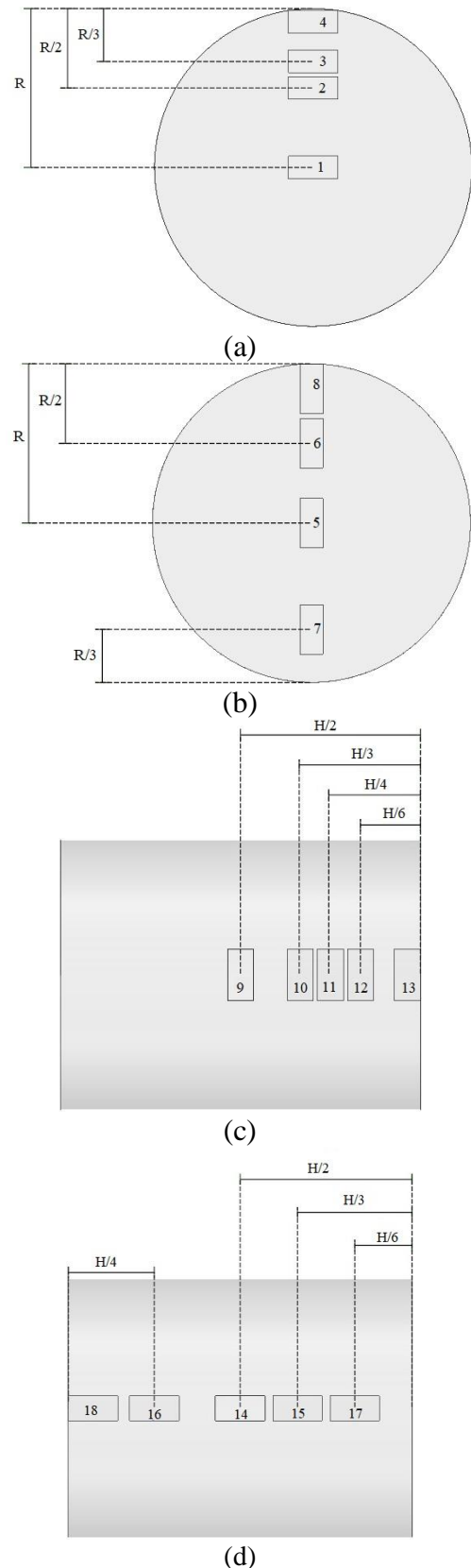


Figura 1: Guias de ondas posicionados (a) horizontalmente na face lateral, (b) verticalmente na face lateral, (c) horizontalmente na face superior e (d) verticalmente na face superior.

Tabela 1: Propriedades do ar, aço e água utilizados nas simulações.

Propriedade	Ar	Aço	Água
Permeabilidade relativa	1	1	77-13*j
Condutividade elétrica (S/m)	0	4.10 <sup>-6</sup>	5,5.10 <sup>-6</sup>
Calor específico (J/mol.K)	-	-	1,2.10 <sup>4</sup> -80,4*T+0,3*T <sup>2</sup> -5,4.10 <sup>-4</sup> *T <sup>3</sup> +3,6.10 <sup>-7</sup> *T <sup>4</sup>
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	838,5+1,4*T-3,0.10 <sup>-3</sup> *T <sup>2</sup> +3,7.10 <sup>-7</sup> *T <sup>3</sup>
Condutividade térmica (W/m.K)	-	-	-0,9+8,9.10 <sup>-3</sup> *T-1,6.10 <sup>-5</sup> *T <sup>2</sup> +8,0.10 <sup>-9</sup> *T <sup>3</sup>

A fim de analisar a variação de temperatura, foi feito o aquecimento de um volume de aproximadamente 9 litros de água por 10 minutos em cada uma das 18 cavidades propostas. E para obtenção da potência útil fornecida pelo magnetron foram utilizadas as Equações 1 e 2, relativas ao calor sensível do aquecimento da água.

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

$$Q = n * \left[ C_1 * (T - T_0) + \frac{C_2}{2} * (T^2 - T_0^2) + \frac{C_3}{3} * (T^3 - T_0^3) + \frac{C_4}{4} * (T^4 - T_0^4) + \frac{C_5}{5} * (T^5 - T_0^5) \right] \quad (2)$$

Sendo P a potência em Watts, Q o calor sensível em Joules,  $\Delta t$  a variação do tempo em segundos, n o número de mols de água que estão sendo aquecidos em kmol,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  e  $C_5$  constantes iguais à 276370 J/(kmol.K), -2090,1 J/(kmol.K<sup>2</sup>), 8,125 J/(kmol.K<sup>3</sup>), -0,014116 J/(kmol.K<sup>4</sup>) e 9,37E-06 J/(kmol.K<sup>5</sup>), respectivamente (POLING *et al.*,2008), T e  $T_0$  as temperaturas final e inicial da água, respectivamente, em Kelvin.

A água foi posicionada de maneira que ficasse o mais distante possível do guia de ondas, com 25 mm de distância das paredes da cavidade e com formato semicilíndrico, como mostra a Figura 2. A temperatura inicial da água foi de 25°C, sendo o campo térmico calculado no domínio do tempo.

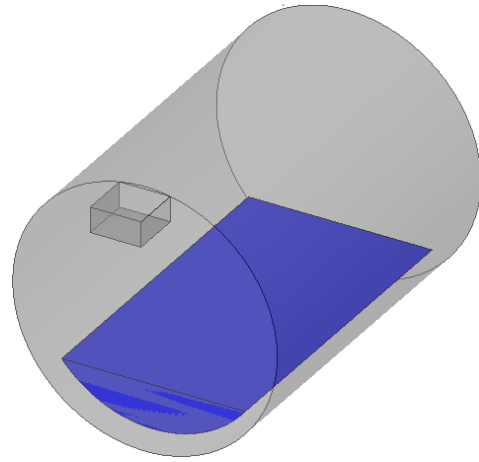


Figura 2: Posicionamento do volume de água no interior da cavidade.

### Análise da variação da quantidade de guias de ondas na cavidade

Com o intuito de se obter uma maior potência para o aquecimento do café no interior da cavidade do forno micro-ondas, foi proposto um estudo para múltiplos guias de ondas. Para isso, foi utilizada uma cavidade otimizada obtida por meio de um planejamento de experimentos para fornos com 175,98 litros, desenvolvida pelos mesmos autores do presente trabalho. Para sua confecção também foi utilizado o guia de ondas WR340 com dimensões 86,36 mm x 43,18 mm x 86,36 mm.

Para análise da variação da quantidade de guias, foram propostos diferentes arranjos para cavidades com 1, 2, 3 e 6 guias de ondas, como mostra a Figura 3. Em cada um dos guias de ondas foi posicionado um magnetron de 1000 W, sendo que a cavidade com 6 guias de ondas apresentou a maior potência, sendo ela de 6000 W.

O guia de ondas para a cavidade com apenas 1 magnetron foi posicionado na parte superior da circunferência, já que esta foi a melhor posição obtida nos testes realizados anteriormente com a cavidade de 95,43 litros. Para a cavidade com 2 guias de ondas, foram utilizados três diferentes arranjos, sendo que no primeiro, os dois guias de ondas foram posicionados na mesma face do cilindro. Já nos segundo e terceiro arranjos, o guia de ondas foi posicionado em faces opostas, com 0° e 180° entre eles, respectivamente.

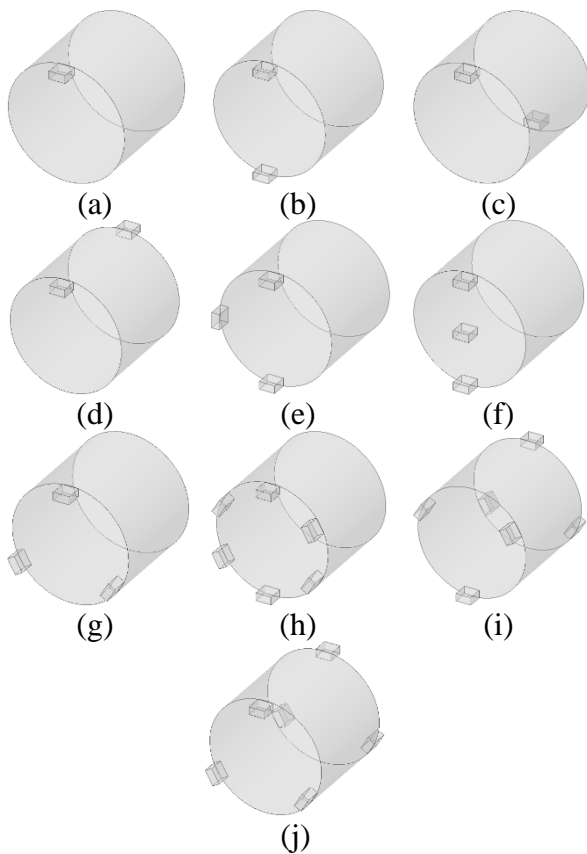


Figura 3: Geometria com arranjo a) 1.1, b) 2.1, c) 2.2, d) 2.3, e) 3.1, f) 3.2, g) 3.3, h) 6.1, i) 6.2 e j) 6.3.

Para a cavidade com 3 e 6 magnetrons, os guias de ondas foram posicionados de três diferentes maneiras. Sendo que para a cavidade com 3 magnetrons, todos os guias foram posicionados em uma mesma face. O primeiro arranjo apresentou uma distância de  $60^\circ$  entre os guias, sendo ocupado apenas metade da circunferência do forno micro-ondas. Já no segundo e terceiro arranjos, os guias de ondas foram posicionados no centro e no contorno da circunferência, respectivamente, sendo equidistantes entre si. Para a cavidade com 6 magnetrons, o primeiro arranjo consistiu nos 6 guias de ondas posicionados em uma mesma face, sendo equidistantes entre si. No segundo arranjo, 3 guias foram posicionados em uma face, sendo os guias equidistantes entre si e 3 foram posicionados na outra face, com um giro de  $60^\circ$  em relação a primeira face. Já no terceiro arranjo, os três guias de uma face ficaram na mesma posição dos três guias da outra face.

A fim de analisar o comportamento do campo eletromagnético no interior do tambor, foi feita uma simulação com a cavidade vazia. Já para análise da variação de temperatura foi

aquecido cerca de 9 litros de água no interior de cada cavidade por 10 minutos. Para o cálculo da potência útil, foram utilizadas as Equações 1 e 2. Os métodos empregados para as simulações foram os mesmos apresentados para o posicionamento do guia de ondas no interior da cavidade.

Outro parâmetro que pode ser analisado é a eficiência da cavidade, sendo essa a relação entre a potência fornecida pelo magnetron e a potência útil, utilizada de fato para aquecer o volume de água. Desse modo, o valor desejável para essa variável é de 100 %, já que assim toda a potência fornecida estaria sendo utilizada para provocar a agitação das moléculas e, conseqüentemente, o seu aquecimento.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Otimização do posicionamento do guia de ondas na cavidade

Com a realização das simulações das cavidades vazias, pôde-se analisar o campo eletromagnético gerado em cada uma delas com o deslocamento do guia de ondas. Como a cavidade experimental que se planeja será posicionada na horizontal, deseja-se que sejam formados *hotspots* próximos as paredes do equipamento, o que favorecerá a eficiência para a secagem de cafés especiais. Os resultados obtidos pelas 18 posições propostas são apresentados na Figura 4, tendo uma vista frontal do forno micro-ondas na vertical. O plano selecionado para a vista secciona a cavidade no centro.

Analisando a Figura 4, as cavidades que apresentaram o campo eletromagnético de maneira mais próxima do desejado foram as 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12 e 13. As demais cavidades não apresentaram um campo eletromagnético concentrado nas laterais, o que pode causar um prejuízo para o aquecimento do café. Dentre as cavidades mais próximas do desejado, as 7, 8, 12 e 13 apresentaram um campo com magnitude mais baixa, devido à ausência da coloração vermelha. Isto também pode causar um menor aquecimento dos sólidos na cavidade.

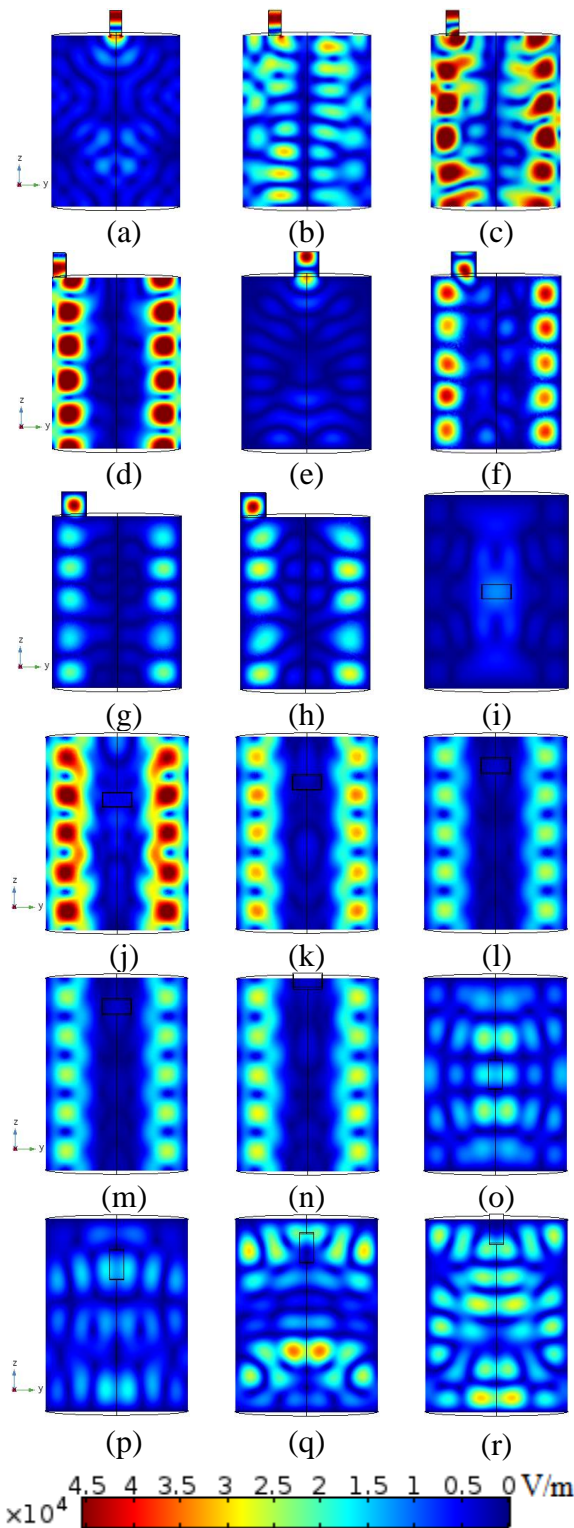


Figura 4: Campo eletromagnético gerado com o guia de ondas na posição (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7, (h) 8, (i) 9, (j) 10, (k) 11, (l) 12, (m) 13, (n) 14, (o) 15, (p) 16, (q) 17 e (r) 18.

Desse modo, as cavidades que mais se aproximam da distribuição desejada e possuem intensidade maior do campo eletromagnético são as 3, 4 e 10. Entre essas, a cavidade 4 foi a que apresentou um campo mais organizado,

formando *hotspots* bem definidos e cavidade 3 é a que apresenta os *hotspots* menos definidos.

Para que se possa escolher a melhor dentre as apresentadas, também foi analisada a variação de temperatura da água inserida na cavidade e o campo elétrico médio de cada cavidade vazia, apresentados na Figura 5.

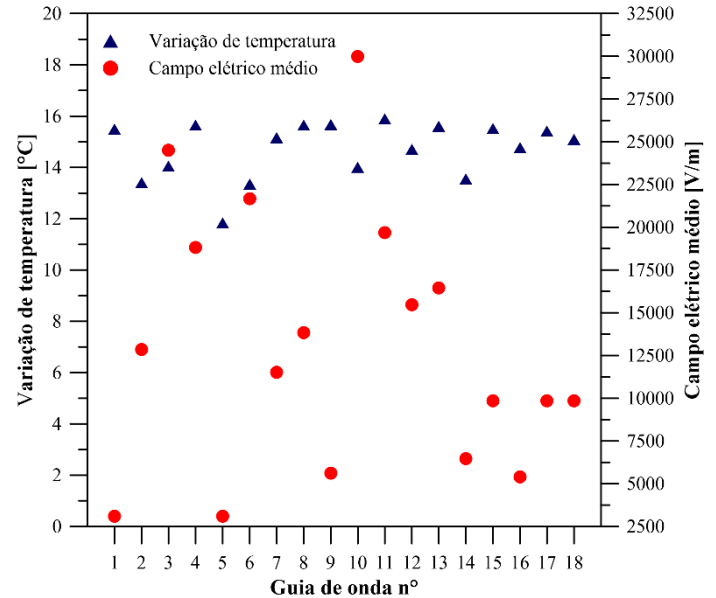


Figura 5: Variação de temperatura e campo elétrico médio para as cavidades com diferentes posições do guia de ondas.

Analisando a Figura 5, nota-se que a variação de temperatura não possui relação com o campo elétrico médio. Isso pode ser explicado devido a distribuição do campo elétrico na cavidade. Se o campo eletromagnético não for concentrado nas laterais da cavidade, este não aquece bem a água que está inserida nele, mas pode gerar um campo médio com magnitude alta, caso esteja concentrado no centro da cavidade.

Portanto, analisando a distribuição do campo eletromagnético, apresentado na Figura 4 e a variação de temperatura apresentada na Figura 5, nota-se que a melhor posição do guia de ondas é a 4. Desse modo, o guia de ondas deve ser posicionado tangente à parede lateral, como mostra a Figura 6. Outras cavidades que apresentaram boa distribuição do campo eletromagnético e alta variação de temperatura foram as 8 e 11.

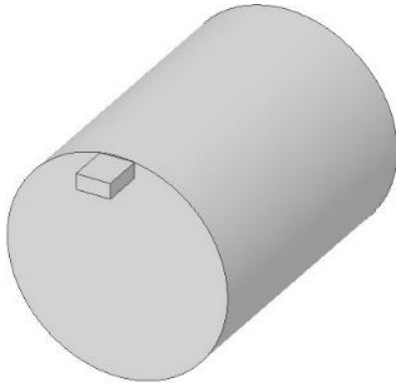


Figura 6: Configuração do melhor posicionamento dentre os apresentados para o guia de ondas.

Baldim *et al.* (2021) fez um estudo do posicionamento de um guia de ondas em um secador micro-ondas retangular. Em seu trabalho, foi concluído que o melhor posicionamento do guia para a cavidade estudada é em seu topo, diferenciando-se desse trabalho, em que o melhor posicionamento foi na parede lateral. Esta divergência é justificada principalmente devido a geometria do forno. Estudos desenvolvidos por Costa *et al.* (2021), comprovaram que as dimensões do forno micro-ondas têm influência direta na distribuição das ondas eletromagnéticas, na temperatura e na potência de saída, que são parâmetros importantes para melhor aproveitamento do aquecimento por micro-ondas. Portanto, é esperado que uma alteração da forma geométrica também cause uma diferenciação do campo, sendo diferentes os posicionamentos ótimos para o guia de ondas.

### Análise de múltiplos guias de ondas no forno micro-ondas

Para análise da influência de múltiplos guias de ondas na eficiência da cavidade, foi analisada a distribuição do campo eletromagnético na cavidade vazia, apresentada na Figura 7.

Analisando os resultados apresentados na Figura 7, nota-se que os arranjos 1.1, 2.2, 3.1, 6.2 e 6.3 foram os que apresentaram campo eletromagnético mais concentrado nas laterais do equipamento, o que pode favorecer o aquecimento dos grãos de café quando o tambor for posicionado na horizontal. Os arranjos 2.1, 2.3, 3.2, 3.3 e 6.1 apresentaram o campo eletromagnético distribuído em todo o equipamento. Nas disposições 2.1, 2.3 e 3.2

nota-se uma grande dissipação do campo eletromagnético, já que a maioria das zonas encontradas são de coloração azul.

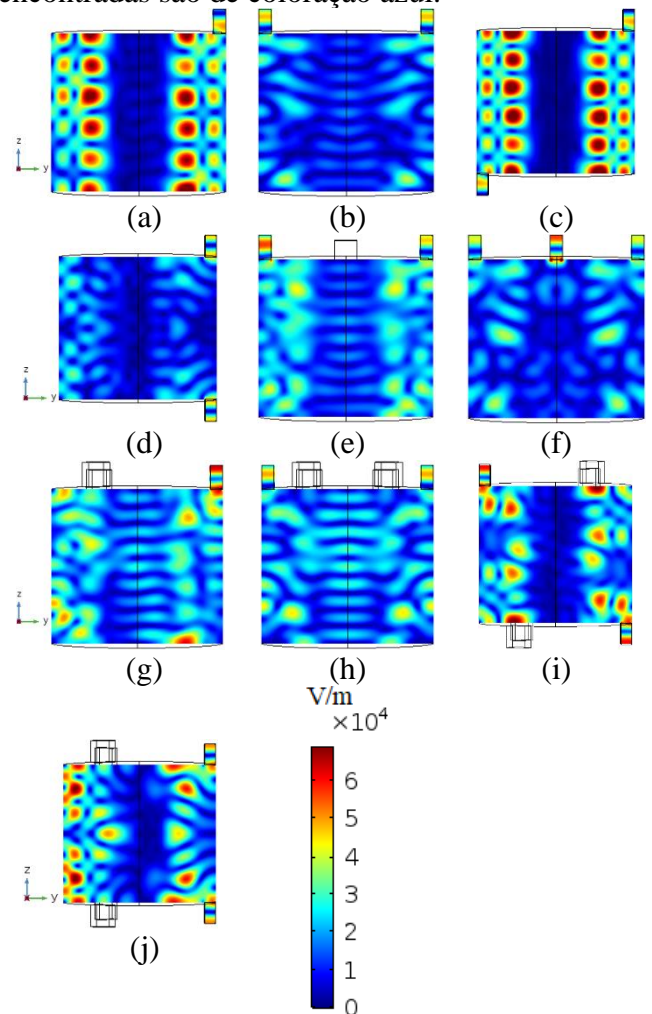


Figura 7: Campo eletromagnético da cavidade com arranjo a) 1.1, b) 2.1, c) 2.2, d) 2.3, e) 3.1, f) 3.2, g) 3.3, h) 6.1, i) 6.2 e j) 6.3.

Os arranjos 2.1, 2.2, 3.2, 6.1 e 6.2 apresentaram simetria do campo eletromagnético em relação ao eixo z a partir do centro da cavidade com rotação de  $180^\circ$  de uma das faces, como pode ser observado na Figura 7. Isso pode ser explicado pois essas cavidades possuem simetria em relação ao posicionamento do guia de ondas em ambos os lados de cada uma das cavidades.

Além disso, pela análise da Figura 7, percebe-se que no arranjo com 2 magnetrons, em que os guias de ondas foram posicionados na mesma angulação em face opostas, ocorreu uma interferência destrutiva das ondas emitidas. Isso pode ser notado pela coloração azul no arranjo 2.2, diferentemente do arranjo 2.1 em que um guia de ondas é posicionado com  $180^\circ$  em relação ao outro. Já no tambor com 6

guias de ondas, sendo 3 posicionados de cada lado, na maior parte da cavidade ocorre uma interferência construtiva quando os guias de ondas são colocados na mesma posição em faces opostas. Com isso, são vistos maiores números de *hotspots* no arranjo 6.3 em comparação com o arranjo 6.2.

Além dos campos eletromagnéticos, também podem ser analisadas as variações de temperatura e potência de saída para cada um dos arranjos propostos. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Variação de temperatura e potência de saída para os diferentes arranjos propostos.

Arranjo	Varição de temperatura (°C)	Potência de saída (W)
<b>1 guia de ondas</b>		
1.1	15,9	997,56
<b>2 guias de ondas</b>		
2.1	23,94	1501,28
2.2	31,33	1964,25
2.3	31,86	1997,46
<b>3 guias de ondas</b>		
3.1	39,79	2494,51
3.2	36,14	2265,69
3.3	47,4	2971,97
<b>6 guias de ondas</b>		
6.1	78,16	4909,60
6.2	89,53	5630,16
6.3	91,78	5773,08

Analisando os resultados apresentados na Tabela 2, para 2 magnetrons é melhor que os guias de ondas estejam dispostos em faces opostas, já que o arranjo que apresentou menor variação de temperatura foi o 2.1, em que os dois guias foram posicionados na mesma face. Houve uma pequena variação de potência útil para os arranjos 2.2 e 2.3, sendo que quando os guias são posicionados nas mesmas orientações em faces opostas (arranjo 2.3) foi a melhor condição. Para a secagem de café nessa cavidade, seria desejável que esta rotacionasse, para proporcionar um aquecimento homogêneo dos grãos. Portanto, para que o centro de gravidade do tambor se posicione no seu centro, favorecendo o equilíbrio, é recomendado que os

guias fiquem como apresentado no arranjo 2.2. Isto não prejudicaria a eficiência da secagem, já que os arranjos 2.2 e 2.3 apresentaram potências úteis aproximadamente iguais.

Para as disposições propostas para as cavidades com 3 guias de ondas, analisando a Tabela 2, pode-se concluir que o melhor foi o arranjo 3.3. Neste, os guias de ondas ficaram equidistantes, apresentando um arranjo triangular. Sua potência de saída foi superior aos apresentados pelos arranjos 3.1 e 3.2. Além disso, esta disposição também seria benéfica caso o tambor rotacionasse, pois apresenta uma melhor distribuição de peso, embora seja concentrado em apenas uma das faces. O arranjo que apresentou a menor variação de temperatura e, conseqüentemente, a menor potência de saída foi a que possui os três guias de ondas no centro da circunferência (arranjo 3.2).

Quando analisado o posicionamento de um guia de ondas na cavidade, pelas Figuras 4 e 5, pode-se perceber que a posição 5, em que o guia de ondas fica localizado no centro da circunferência, foi uma das piores condições. Isso pode ter afetado a eficiência da cavidade com o arranjo 3.2, já que este apresenta um guia de ondas na posição que não se mostrou eficiente.

Ainda pela análise da Tabela 2, para 6 guias de ondas, o arranjo 6.3 apresentou maior variação de temperatura e maior potência de saída. Neste, os guias de ondas foram arranjados nas mesmas posições em faces opostas. Esse resultado foi condizente com o obtido para a cavidade com 2 guias de ondas, já que a melhor condição também foi a que os guias ficaram em faces opostas com a mesma orientação. O arranjo 6.1 apresentou o pior desempenho em relação aos demais. Portanto, não é recomendado que os 6 guias de ondas sejam posicionados em uma mesma face.

Quando analisada a eficiência da cavidade, pode-se notar que os tambores com maiores quantidades de guias de ondas não apresentam um melhor rendimento. Para a cavidade com apenas um guia de ondas, obteve-se uma eficiência de 99,76% enquanto para as cavidades com 2, 3 e 6 guias com os arranjos 2.3, 3.3 e 6.3, respectivamente, obteve-se os rendimentos de 99,87%, 99,07% e 96,22%. Isso mostra que embora seja atingida uma maior



variação de temperatura com o tempo de 10 minutos, houve também uma maior dissipação do campo eletromagnético para as cavidades com 3 e 6 guias de ondas.

Costa *et al.* (2021) desenvolveu um estudo da influência de múltiplos guias de ondas em um forno micro-ondas hexagonal. Assim como no presente trabalho, foi constatado que para aumentar a potência de saída e a intensidade dos hotspots gerados no interior da cavidade, tem-se como alternativa o aumento da quantidade de guia de ondas.

## CONCLUSÕES

Com análise de todos os posicionamentos propostos para o guia de ondas, foi possível concluir que o melhor é na parte circular, encostado nas paredes, com orientação horizontal. Outros posicionamentos que mostraram bons desempenhos foram na parte circular, encostado nas paredes, com orientação vertical e na parede frontal com a distância de  $\frac{1}{4}$  de altura da parede circular.

Para a cavidade com 2 guias de ondas, conclui-se que a melhor dentre as condições apresentadas é quando cada um dos magnetrons é posicionado em uma das faces circulares da cavidade, possuindo uma rotação de  $180^\circ$  entre eles, favorecendo o equilíbrio da cavidade. Já para o tambor com 3 guias de ondas, é preferível que estes sejam posicionados equidistantes entre si próximos a parede da cavidade, formando um arranjo triangular entre os guias.

Foi possível concluir também que para a cavidade com 6 magnetrons, o melhor desenvolvimento do forno micro-ondas se dá quando 3 guias são posicionados em uma face, equidistantes entre si e os outros 3 guias são posicionados na outra face circular, nas mesmas posições da outra face.

Além disso, pode-se concluir que as cavidades com maiores números de guia de ondas, embora atinjam uma maior variação de temperatura no tempo de 10 minutos, não possuem a mesma eficiência da cavidade com apenas 1 guia de ondas. Isso se dá pela maior dissipação das ondas eletromagnéticas nas cavidades com 3 e 6 guias de ondas, em relação com as cavidades de 1 e 2 guias.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico-financeiro fornecido pela FAPEMIG (APQ-00036-21) e UFLA (PIDEG357-2018).

## REFERÊNCIAS

- BUFFLER, C. R. (1995), Microwave cooking and processing: Engineering fundamentals for the food scientist, Springer, Londres.
- CARVALHO, A. J. B., PETRI, I. J. (2021), Influência de parâmetros nas simulações de aquecimento Micro-ondas de leitos de sólidos granulares. Anais do XXIV ENMC - Encontro Nacional de Modelagem Computacional, Uberlândia - MG.
- CARVALHO, R. P. (2005), Microondas, Livraria da Física, São Paulo.
- CELESTINO, S. M. C. (2010), Princípios de secagem de alimentos, Embrapa, Distrito Federal.
- CONTRERAS, C., MARTÍN-ESPARZA, M. E., CHIRALT, A., MARTÍNEZ-NAVARRETE N. (2008). Influence of microwave application on convective drying: Effects on drying kinetics, and optical and mechanical properties of apple and strawberry, J. Food P. Eng., Vol 88, p.55-64.
- COSTA, F. O., ALVARENGA, T. F., MESQUITA, T. V. C., PETRI, I. J. (2021), Hybrid drying of pulped arabica coffee cherry beans (*Coffea arabica* L. cv. Catuai) using a hexagonal microwave dryer designed by numerical simulations, J. Food P. Eng., Vol 44, p.1-13.
- COSTA, J. D., MACEDO, A. D. B., SOUSA, A. P. M., SANTANA, R. A. C., CAMPOS, A. R. N. (2016) Cinética de secagem em forno micro-ondas da vagem algaroba (*Prosopis juliflora*), Anais do I CONAPESC 2016 - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, p. 1-5, Campina Grande - PB.
- LEAL, B. P. (2012), Contribuição ao estudo da secagem com micro-ondas de carbonato de cálcio precipitado. PPGE/CEUN-IMT - São Caetano do Sul - SP, 47 p. (dissertação de mestrado).

- MAITELLI, C. W. C. P. (2010), Simulação do escoamento monofásico em um estágio de uma bomba centrífuga utilizando técnicas de Fluidodinâmica Computacional. PPGCEP/UFRN - Natal - RN, 155 p. (dissertação de doutorado).
- SANSEVERINO, A. M. (2002), Microondas em síntese orgânica, Química Nova, Vol 25, p. 660-667.
- PETRI, I. J. (2017), Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo. PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG, 148 p. (dissertação de doutorado).
- POLING, B. E.; THOMSON, G. H.; FRIEND, D.; ROWLEY, R. L.; WILDING, W. V. (2008), Physical and Chemical Data. Section 2 in: Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill Book Co, New York.