



APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE CAVIDADES DE TAMBORES ROTATIVOS APLICADOS NA SECAGEM MICRO-ONDAS DE CAFÉS ESPECIAIS

ANDRESSA J. B. CARVALHO^{1*}, IRINEU PETRI JÚNIOR¹

¹Universidade Federal de Lavras, Setor de Engenharia Química, Departamento de Engenharia.

*e-mail: andressa.jbcarvalho@gmail.com

RESUMO – A secagem é utilizada para reduzir a umidade de produtos, facilitando seu transporte e armazenamento. Existem diversos mecanismos de secagem e a aplicação do aquecimento micro-ondas está crescendo, devido suas vantagens. Portanto, objetivou-se neste trabalho dimensionar cavidades de tambores rotativos de 100 e 200 litros para secagem de cafés especiais. Para isso, foram feitos testes de independência de malha e utilizando-se da técnica de planejamento de experimentos (2^k , 3^k e PCC), foram analisados os diâmetros e comprimentos ótimos do equipamento. Para isso, comparou-se a distribuição do campo eletromagnético e térmico no interior da cavidade. O diâmetro e comprimento ótimos obtidos foram 45 cm e 75 cm, respectivamente, resultando em uma cavidade 119,28 L. O melhor local de aquecimento dessa cavidade foi situado à 45° e 180° em relação ao guia de ondas. Já para a cavidade maior, resultando em um volume de 175,98 L, as dimensões ótimas para comprimento e diâmetro foram 56,5 cm e 62,98 cm, respectivamente. Essa mostrou um ótimo aquecimento para qualquer posicionamento do material no seu interior.

INTRODUÇÃO

A secagem de produtos é um dos processos mais antigos empregados com a finalidade de conservar alimentos. As principais vantagens da sua utilização são, além da conservação, a diminuição do seu peso e volume, facilitando seu transporte, embalagem e armazenamento, e a criação de condições desfavoráveis para o crescimento de micro-organismos, já que a umidade do produto é bastante reduzida. Além disso, este é um processo bastante econômico, quando comparado com os demais utilizados para a conservação de produtos alimentícios. Alguns produtos conseguem conservar suas principais propriedades físicas e nutritivas quando passam pelo processo de secagem (GAVA, 1998).

Os trabalhos encontrados na literatura tratam da secagem de materiais com diferentes métodos, como o trabalho de Melo *et al.* (2015), que realizaram a secagem de pimenta de cheiro

por meio de uma estufa, sem circulação de ar. Efraim *et al.* (2010) realizaram a secagem natural (solar) e convectiva (estufa) de amêndoas de cacau. Mendonça *et al.* (2019) utilizaram a estufa com ventilação forçada em diferentes temperaturas para secagem de sementes de andiroba.

Segundo o Conselho dos Exportadores de Café do Brasil (CECAFÉ, 2022), o Brasil exportou 40,6 milhões de sacas de 60 kg no ano de 2021, o caracterizando como maior exportador desse ano. Além disso, o Brasil é o segundo país que mais consome este produto, em 2021 foram consumidos 21,5 milhões de sacas de 60 kg, segundo a Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2022).

A aplicação do método de secagem convencional de cafés especiais, embora promissora, pode ser demorada quando se deseja manter a temperatura do café inferior a 45°C , visando a melhor qualidade final. Desse modo, a secagem pode demorar de 16 a 45 horas no total, necessitando-se de uma grande

quantidade de recursos. Uma alternativa encontrada é acoplar a secagem convectiva com aquecimento micro-ondas, diminuindo os tempos de secagem (COSTA *et al.*, 2021).

Quando se trata de secagem de produtos alimentícios via micro-ondas são encontrados bastante trabalhos, podendo ser citados de banana nanica (GEROMEL & FREITAS 2020), manga (IZLI *et al.*, 2017), uva (LOKHANDE *et al.*, 2017), morango (BRUIJN *et al.*, 2015) e café (COSTA *et al.*, 2021). A secagem por micro-ondas é um método bastante promissor, que vem ganhando destaque principalmente nos últimos anos.

A secagem via micro-ondas apresenta diversas vantagens em comparação com a secagem convencional. Dentre elas, podem ser citadas a economia de energia, redução no tempo de secagem, custo operacional e melhora na qualidade do produto (EKEZIE *et al.*, 2017). Os fornos micro-ondas são compostos basicamente por cavidade, magnetron, e guia de ondas. A cavidade consiste em um recipiente metálico que reflete as ondas eletromagnéticas emitidas. O magnetron é responsável por gerar as ondas eletromagnéticas (PETRI, 2017). Já a guia de ondas objetiva guiar as ondas eletromagnéticas geradas (POZAR, 2011).

As ondas eletromagnéticas podem ser propagadas por meio do guia de ondas de duas maneiras. Na propagação do tipo TE (*Transversal Electric*), o campo elétrico é perpendicular a direção de propagação, enquanto o campo magnético é propagado na mesma direção da onda. Já na propagação do tipo TM (*Transversal Magnetic*), ocorre o contrário, o campo magnético é perpendicular a propagação, enquanto o campo elétrico é na mesma direção de propagação (IDA & BASTOS, 1997). Em fornos micro-ondas domésticos, a frequência de propagação das ondas é de 2450 MHz, já que esta é a mesma frequência de ressonância das moléculas de água (PETRI, 2017).

Entretanto, a eficiência da cavidade é bastante dependente das suas dimensões, tornando-se necessário o estudo do seu dimensionamento, para evitar a dissipação das ondas eletromagnéticas geradas (BALDIM *et al.*, 2021). A utilização da técnica de simulação computacional possibilita a previsão dos campos térmicos e eletromagnéticos gerados no

interior da cavidade. Com isso, pode ser analisada a potência efetiva utilizada para a secagem do material e, conseqüentemente, a sua eficiência (COSTA *et al.*, 2021).

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo estudar, por meio de simulações numéricas, aplicando-se as técnicas da Fluidodinâmica Computacional (CFD), os campos eletromagnéticos e térmicos gerados em cavidades cilíndricas utilizadas para a secagem micro-ondas de cafés especiais. Com isso, analisou-se os diâmetros e comprimentos ótimos para projeto de fornos cilíndricos rotativos de 100 e 200 litros para secagem micro-ondas de cafés especiais.

METODOLOGIA

Para todas as simulações desenvolvidas nesse trabalho, foi utilizado o guia de ondas WR340 com dimensões 86,36 mm x 43,18 mm x 86,36 mm. As geometrias CAD das cavidades foram confeccionadas no *software SpaceClaim*.

Para realização das simulações foi utilizado o *software Comsol Multiphysics 5.3*, com a abordagem de aquecimento *microwave heating*. Nas paredes da cavidade, foram consideradas as condições de impedância e condutor elétrico perfeito. No *software* foi definido que as ondas são transmitidas a partir de uma face retangular e foi utilizado um campo eletromagnético do tipo *Transverse Eletrical* com modo 10 (TE10), sendo calculado no domínio da frequência. Também foi definido que a frequência das micro-ondas emitidas eram de 2450 MHz. Para as propriedades do ar, do aço (*Steel AISI 4340*), foram utilizados os valores apresentados na Tabela 1, obtidos no banco de dados (*Built-In*) do *software Comsol*.

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

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

Os métodos utilizados para as simulações no *software Comsol* foram os mesmos validados por Carvalho e Petri (2021) por meio de um aquecimento experimental de água.

Teste de independência de malha

Para minimizar os erros de discretização deve ser feito um teste de independência de malha. Para isso, foi utilizada uma cavidade com diâmetro e comprimento de 45 cm e 60 cm, respectivamente e outra com diâmetro de 56,65 cm e comprimento de 75,50 cm. Estas são as cavidades do ponto central do planejamento 2^k das cavidades de 100 L e 200 L. Para o forno de 95,43 L inseriu-se um volume de 9 L de água e na cavidade de 190,30 L, foi utilizado um volume de 4,5 L, analisando-se a variação de temperatura com 10 minutos de aquecimento.

Para todas as simulações desse trabalho, o volume foi inserido em formato semicilíndrico, com distância de 25 mm das paredes da cavidade, como mostra a Figura 1. Além disso, foram utilizados os valores de tamanho máximo e mínimo de células obtidos no teste de independência de malha.

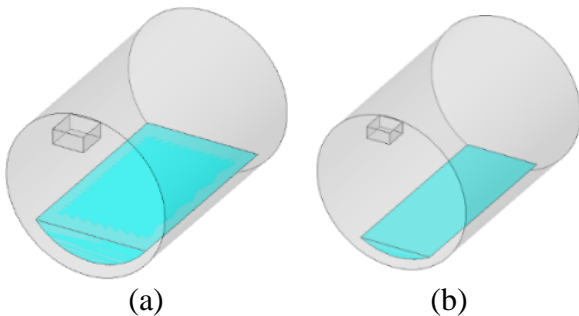


Figura 1: Cavidade de (a) 100 L (b) 200 L com volume de água.

Estudo de dimensões de cavidades com volume em torno de 100 L

Para que fossem selecionadas as dimensões ótimas para uma cavidade em torno de 100 L, o primeiro planejamento utilizado foi em 2 níveis (2^k) com três repetições no ponto central. Para as três repetições no ponto central, foram utilizados diferentes valores para a quantidades de células. Essa variação foi feita para ponderar a influência da quantidade de células para as cavidades, já que nos fornos maiores o número de células foi mais elevado.

As variáveis independentes são diâmetro e comprimento e as dependentes são a variação de temperatura, o campo eletromagnético

médio e a potência de saída. Para obtenção do campo elétrico médio e distribuição do campo eletromagnético, foram utilizadas as cavidades vazias. Já para a obtenção da variação de temperatura foram aquecidos 9 litros de água por 10 minutos, na cavidade proposta. A potência de saída foi calculada pela Equação 1.

$$P = \frac{n \left[C_1(T-T_0) + \frac{C_2}{2}(T^2-T_0^2) + \frac{C_3}{3}(T^3-T_0^3) \right]}{\Delta t} + \frac{n \left[\frac{C_4}{4}(T^4-T_0^4) + \frac{C_5}{5}(T^5-T_0^5) \right]}{\Delta t} \quad (1)$$

Sendo, P a potência (W), Δt a variação do tempo (s), n o número de mols de água (kmol), C_1 , C_2 , C_3 , C_4 e C_5 iguais à 276370 J/(kmol.K), -2090,1 J/(kmol.K²), 8,125 J/(kmol.K³), -0,014116 J/(kmol.K⁴) e $9,37 \cdot 10^{-6}$ J/(kmol.K⁵), respectivamente (POLING *et al.*, 2008), T e T_0 as temperaturas final e inicial da água, respectivamente, em Kelvin.

Os valores nominais utilizados para os níveis -1, 0 e +1 para o diâmetro foram 45,0 cm, 60, 0 cm e 75,0 cm, respectivamente. Já para o comprimento, foram utilizados os valores de 35,0 cm, 45,0 cm e 55,0 cm, respectivamente.

Para o planejamento 3^k , foram utilizados menores diâmetros e maiores comprimentos, limitados pelo ponto central do planejamento 2^k , já que essas foram as melhores condições. O planejamento 3^k possui 3 níveis e foram propostas três repetições no ponto central. Os valores nominais utilizados para os níveis -1, 0 e +1 foram de 35,0 cm, 40,0 cm e 45,0 cm para o diâmetro e 60,0 cm, 67,5 cm e 75,0 cm para o comprimento, respectivamente.

No PCC foram estudados cinco diferentes níveis, sendo eles o $-\alpha$, -1, 0, +1 e α , com seus respectivos valores nominais, sendo eles 34,26 cm, 35,0 cm, 40,0 cm, 45,0 cm e 45,74 cm para o diâmetro e 58,9 cm, 60,0 cm, 67,5 cm, 75,0 cm e 76,10 cm para o comprimento, respectivamente. Para o parâmetro α foi utilizado o valor ortogonal. Este planejamento possui 2 variáveis dependentes e 3 repetições no ponto central. Com isso, foi obtido um valor de 1,14744 para o α ortogonal.

Estudo de dimensões de cavidades com volume em torno de 200 L

Para o dimensionamento de cavidades em torno de 200 L, foi utilizado o planejamento

com dois níveis (2^k) com três repetições no ponto central. Os valores nominais para os níveis -1, 0 e +1 foram de 44,0 cm, 56,65 cm e 69,30 cm para o diâmetro e 56,5 cm, 75,5 cm e 94,5 cm para o comprimento, respectivamente.

Foram feitas simulações da cavidade sem água para obtenção da distribuição do campo eletromagnético e valor do campo elétrico médio. Com a adição de 4,5 litros de água, foi obtida a variação de temperatura e, com a Equação 1, a potência útil do magnetron. O volume de água proposto foi inferior ao dimensionamento de cavidade de 100 L, pois, como as cavidades são maiores, gera-se um alto custo computacional devido a demanda de alta quantidade de memória para essas cavidades.

No planejamento 3^k , confeccionado a partir dos resultados obtidos no planejamento 2^k , foram utilizados os valores de 56,65 cm, 62,98 cm e 69,30 cm para os níveis -1, 0 e 1 para o diâmetro. Já para o comprimento, foram utilizados os valores de 56,50 cm, 66,0 cm e 75,5 cm, respectivamente.

Já no planejamento composto central foram analisados cinco níveis, sendo eles $-\alpha$, -1, 0, +1 e $+\alpha$. Os valores nominais utilizados para esses níveis foram 55,72 cm, 56,65 cm, 62,98 cm, 69,30 cm e 70,23 cm para o diâmetro e 55,10 cm, 56,50 cm, 66,00 cm, 75,50 cm e 76,90 cm para o comprimento. O valor do α de ortogonalidade utilizado foi de 1,14744.

Variação da posição da água no interior da cavidade do forno micro-ondas

A fim de analisar se o tambor ótimo apresentaria a mesma eficiência caso este rotacionasse, para gerar um aquecimento homogêneo dos grãos, foi variada a posição da água no interior das cavidades ótimas de 100 L e 200 L. Para ambas as cavidades, 9 L de água foram posicionados a 0° , 45° , 90° , 135° e 180° em relação ao guia de ondas. Sua temperatura inicial foi de 25°C e foi analisada a variação de temperatura obtida a partir de cada cavidade.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Teste de independência de malha

Os resultados obtidos para o teste de independência de malha das cavidades de 95,43 e 190,30 litros são apresentados na Tabela 2. Sendo ΔT a variação de temperatura.

Tabela 2: Teste de independência de malha.

95,43 litros		190,30 litros	
n° células	ΔT ($^\circ\text{C}$)	n° células	ΔT ($^\circ\text{C}$)
71.118	15,49	846.869	31,63
547.946	15,46	854.514	31,62
642.991	15,44	887.256	31,63
774.677	15,42	975.153	31,60
960.461	15,41	1.150.430	31,61
1.207.496	15,39	1.537.177	31,63

Pode-se analisar, a partir da Tabela 2, que há pouca variação de temperatura com a mudança da quantidade de células para ambas as cavidades. Entretanto, um valor de células baixo para a simulação do aquecimento de água, pode causar divergência na simulação. Para garantir que ocorra convergência, para a discretização do volume do tambor foi utilizado um tamanho máximo de 17,0 mm e mínimo de 0,734 mm para ambas as cavidades.

Para o volume de água da cavidade de 95,43 L, foi utilizado um valor mínimo para o tamanho das células de 0,08 mm e máximo de 7 mm. E para a cavidade de 190,30 L foi estabelecido um valor máximo para o tamanho de células de 7 mm, um valor mínimo de 0,205 mm. Além disso, foi utilizada uma máxima taxa de crescimento de 1,5, fator da curvatura 0,6 e resolução de regiões estreitas de 0,5.

Dimensionamento de cavidades com volume de aproximadamente 100 litros

Planejamento 2^k : A distribuição do campo eletromagnético obtido para cada cavidade no planejamento 2^k para cavidade em torno de 100 litros é apresentada na Figura 2.

Experimentalmente, o forno micro-ondas será posicionado na horizontal, portanto, deseja-se que as ondas eletromagnéticas sejam concentradas nas paredes do equipamento. Analisando a Figura 2, as cavidades que apresentaram o campo eletromagnético mais próximo do desejado foram as do ponto central (5, 6 e 7). Entretanto, para que se possa concluir se esta é a melhor cavidade, foram analisados, também, a variação de temperatura e o campo elétrico médio, como mostra a Tabela 3. Onde Di e L são o diâmetro e o comprimento da cavidade, respectivamente, ΔT é a variação de temperatura, $E_{\text{méd}}$ é o campo elétrico médio e $P_{\text{útil}}$ é a potência de saída.

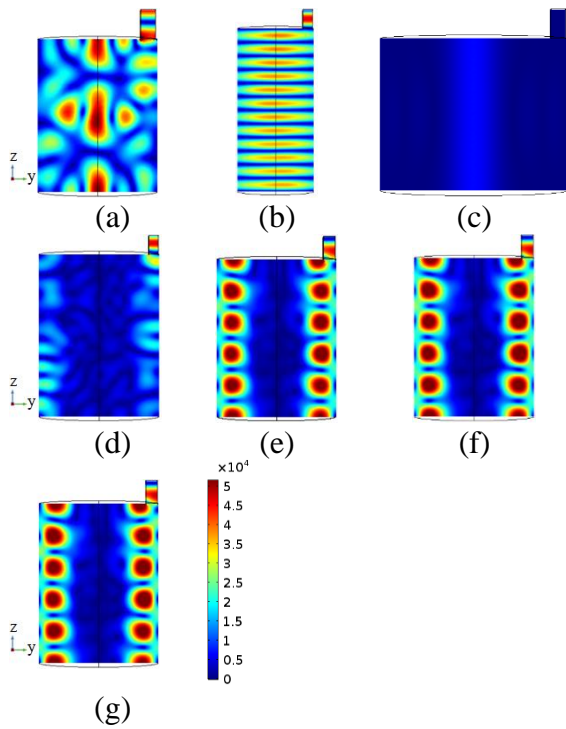


Figura 2 – Campo eletromagnético gerado na cavidade (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4, (e) 5, (f) 6, (g) 7 no planejamento 2^k para fornos em torno de 100 L.

Tabela 3: Resultados do planejamento 2^k para cavidades em torno de 100 L.

Cavidade nº	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3
	Di	L	ΔT (°C)	$E_{méd}$ (V/m)	$P_{útil}$ (W)
1	-1	-1	15,39	17305	962,5
2	-1	1	15,99	15942	999,9
3	1	-1	15,27	26098	955,0
4	1	1	15,40	6414	963,1
5	0	0	15,65	18622	978,7
6	0	0	15,64	18594	978,1
7	0	0	15,63	18563	977,5

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 3, nota-se que as cavidades que apresentaram os campos eletromagnéticos nas laterais foram as que apresentaram os 2º, 3º e 4º maiores aquecimentos. A cavidade que apresentou o maior aquecimento foi a 2, que possui a distribuição do campo eletromagnético no centro da cavidade, o que não é desejado para a cavidade que está sendo planejada. O campo elétrico médio não apresentou um padrão em relação à variação de temperatura.

Para uma melhor análise das cavidades que mostraram bom desempenho, torna-se necessário a realização do planejamento 3^k .

Planejamento 3^k : As distribuições do campo eletromagnético obtidos no planejamento 3^k são apresentados na Figura 3.

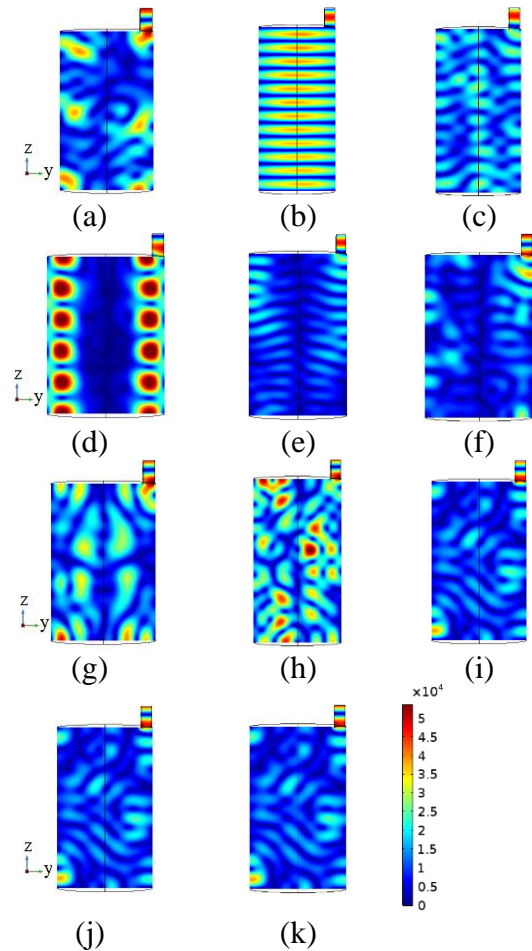


Figura 3: Campo eletromagnético gerado na cavidade (a)8, (b)9, (c) 10, (d) 11, (e) 12, (f) 13, (g) 14, (h) 15, (i) 16, (j) 17, (k) 18 no planejamento 3^k para fornos em torno de 100 L.

Analisando a Figura 3, nota-se que a cavidade que apresentou a distribuição de campo eletromagnético mais próxima do esperado foi a 11. A cavidade 12, embora tenha apresentado uma intensidade menor, possui um campo eletromagnético distribuído nas laterais do equipamento, o que pode favorecer o aquecimento. Já a cavidade 9, que possui um campo eletromagnético concentrado no centro da cavidade, pode não apresentar um aquecimento adequado quando os sólidos forem mantidos na parede do forno.

Para uma melhor conclusão sobre quais são os melhores dimensionamentos, pode-se analisar as variáveis dependentes, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4: Resultados do planejamento 3^k para cavidades em torno de 100 L.

Cavidade n°	X_1	X_2	Y_1	Y_2	Y_3
	Di	H	ΔT (°C)	$E_{méd}$ (V/m)	$P_{útil}$ (W)
8	-1	-1	15,12	13481	945,6
9	-1	1	15,99	15949	999,9
10	-1	0	15,52	10919	970,6
11	1	-1	15,66	18663	979,3
12	1	1	16,00	8613	1000,6
13	1	0	15,79	7922	987,5
14	0	-1	14,88	11615	930,6
15	0	1	15,60	13647	975,6
16	0	0	14,85	7950	928,7
17	0	0	14,84	7933	928,1
18	0	0	14,86	7920	929,4

Com os resultados apresentados na Tabela 4, observa-se que a cavidade 12 foi a que apresentou melhor desempenho para o aquecimento da água. Outras cavidades que apresentaram bom desempenho foram as 9 e 13. Para analisar melhor os resultados, fez-se o tratamento através do *software* STATISTICA, sendo obtidas as Equações 2, 3 e 4 para a variação de temperatura, campo elétrico médio e potência de saída, respectivamente.

$$\Delta T (\text{°C}) = 15,49 + 0,14 X_1 + 0,32 X_2 - 0,29 X_1^2 - 0,08 X_2^2 - 0,13 X_1 X_2 + 0,03 X_1^2 X_2 - 0,09 X_1^2 X_2^2, R^2 = 0,9998 \quad (2)$$

$$E_{méd} (\text{V/m}) = 12085,38 - 858,47 X_1 - 925,03 X_2 - 758,73 X_1^2 - 2363,88 X_2^2 - 3129,55 X_1 X_2 - 479,87 X_1 X_2^2 + 1455,78 X_1^2 X_2, R^2 = 1,0000 \quad (3)$$

$$P(W) = 968,71 + 8,53 X_1 + 20,09 X_2 - 17,80 X_1^2 - 4,84 X_2^2 - 8,28 X_1 X_2 + 1,80 X_1^2 X_2 - 5,51 X_1^2 X_2^2, R^2 = 0,9998 \quad (4)$$

Os coeficientes de determinação (R^2) das correlações se aproximaram de 1, o que indica um bom ajuste dos pontos. Para que sejam mais bem analisadas as dimensões acima da condição +1 e abaixo da condição -1, pode-se utilizar de um planejamento composto central.

Planejamento Composto Central: Com a simulação da cavidade vazia, pode-se analisar a distribuição do campo eletromagnético no interior da cavidade do forno micro-ondas, como mostra a Figura 4.

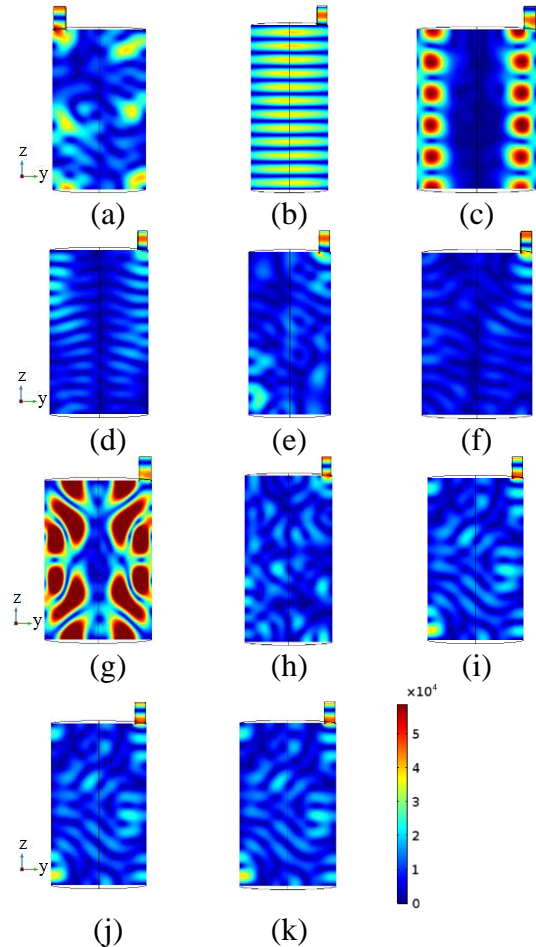


Figura 4: Campo eletromagnético gerado na cavidade (a) 19, (b) 20, (c) 21, (d) 22, (e) 23, (f) 24, (g) 25, (h) 26, (i) 27, (j) 28, (k) 29 no PCC para cavidades em torno de 100 L.

Com análise da Figura 4, é possível observar que as cavidades que apresentaram melhor desempenho foram as 21 e 25. A cavidade 22 apresentou um campo bem distribuído nas laterais, embora com baixa magnitude. Para que se possa concluir qual a melhor cavidade dentre as apresentadas, pode-se analisar a Tabela 5, que apresenta as variáveis dependentes.

Com análise dos resultados apresentados na Tabela 5, nota-se que a cavidade que apresentou o maior aquecimento da água foi a 22. Outras cavidades que apresentaram bom desempenho foram a 20 e a 24. Foi feito, então, o tratamento no *software* STATISTICA, sendo obtidas as Equações 5, 6 e 7 para a variação de temperatura, campo elétrico médio e potência útil, respectivamente.

Tabela 5: Resultados do PCC para cavidades em torno de 100 L.

Cavidade n°	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃
	Di	L	ΔT (°C)	E _{méd} (V/m)	P _{útil} (W)
19	-1	-1	15,12	13481	945,6
20	-1	1	15,99	15949	999,9
21	1	-1	15,66	18663	979,3
22	1	1	16,00	8613	1000,6
23	-1,147	0	15,88	7172	993,0
24	1,147	0	15,94	5143	996,7
25	0	-1,147	15,48	31954	968,0
26	0	1,147	15,70	7872	981,8
27	0	0	14,85	7950	928,7
28	0	0	14,84	7933	928,1
29	0	0	14,86	7920	929,4

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 14,95 + 0,22X_2 + 0,56X_1^2 + 0,32X_2^2, R^2 = 0,6022 \quad (5)$$

$$E_{méd}(\text{V/m}) = 6988,81 - 5308,87X_2 + 8408,09X_2^2, R^2 = 0,5037 \quad (6)$$

$$P(W) = 934,89 + 13,77X_2 + 35,28X_1^2 + 20,09X_2^2, R^2 = 0,6033 \quad (7)$$

Os coeficientes de determinação (R^2) das correlações se distanciaram bastante de 1. Isso mostra que as correlações não predizem bem as variáveis dependentes.

Com os resultados apresentados nas Figura 4 e Tabela 5, pode-se concluir que a cavidade que apresenta melhor desempenho para o aquecimento é a 22 do PCC. Esta apresenta o diâmetro de 45 cm o comprimento de 75 cm, totalizando um volume de 119,28 L, esta cavidade é apresentada na Figura 5. Outras cavidades que apresentaram bom desempenho foram as 20 e 24. Entretanto, a cavidade 20 não é indicada quando se planeja aquecer pequenos volumes com a cavidade na horizontal.

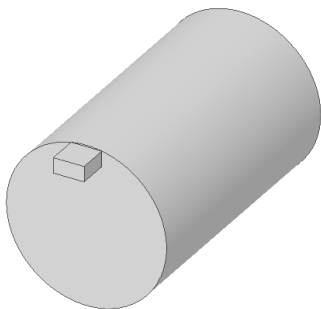


Figura 5: Cavidade ótima de 119,28 L.

Dimensionamento de cavidades com volume de aproximadamente 200 litros

Planejamento 2^k: Os resultados para a simulação de cavidades sem água, a fim de analisar o campo eletromagnético no interior da cavidade, são apresentados na Figura 6.

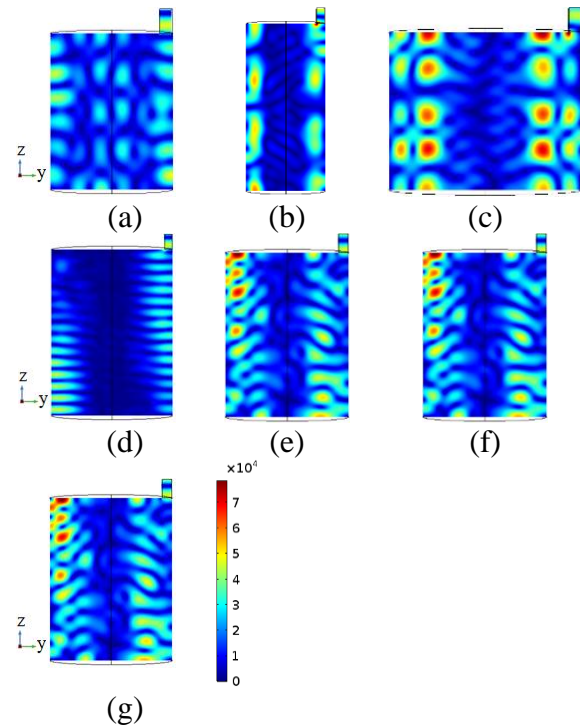


Figura 6: Campo eletromagnético gerado na cavidade (a) 30, (b) 31, (c) 32, (d) 33, (e) 34, (f) 35, (g) 36 no planejamento 2^k para cavidades em torno de 200 L.

Pela análise da Figura 6, pode-se notar que apenas a cavidade 30 não apresentou o campo eletromagnético concentrado nas laterais do equipamento. Para uma melhor análise do comportamento dessas cavidades, os resultados para as variáveis dependentes são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados do planejamento 2^k para cavidades em torno de 200 L.

Cavidade n°	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃
	Di	L	ΔT (°C)	E _{méd} (V/m)	P _{útil} (W)
30	-1	-1	31,96	12975	1001,9
31	-1	1	29,09	14413	912,0
32	1	-1	30,78	18676	964,9
33	1	1	30,50	10654	956,1
34	0	0	31,63	18844	991,5
35	0	0	31,62	18881	991,2
36	0	0	31,60	18917	990,6

Com análise dos resultados apresentados na Tabela 6, nota-se que a cavidade que apresentou melhor aquecimento foi a cavidade 30. Entretanto, esta não será considerada como a cavidade ótima, pois seu volume é de 86 litros e o melhor dimensionamento para cavidades em torno de 100 L já foi feito. Outras cavidades que apresentaram bom desempenho foram as do ponto central (34, 35 e 36).

O campo elétrico médio não mostrou relação com a variação de temperatura. Na cavidade 33 a variação de temperatura foi maior que na cavidade 31, sendo que o campo elétrico médio da cavidade 31 foi mais elevado. Isso pode ser explicado devido a distribuição do campo eletromagnético na cavidade.

Para melhor análise das cavidades que apresentaram bom desempenho, confeccionou-se o planejamento 3^k . Para ele, foi levado em consideração que diâmetros maiores e comprimentos menores são benéficos para o melhoramento da eficiência da cavidade. Ambas as dimensões foram delimitadas pelo ponto central do planejamento 2^k , já que esta apresentou o maior aquecimento.

Planejamento 3^k : Com a cavidade vazia, pode-se analisar o campo eletromagnético, como mostra a Figura 7.

Pela análise da Figura 7, as cavidades 37, 38, 39, 40 e 43 foram as que apresentaram o campo eletromagnético mais próximo do desejado, já que se concentraram nas laterais do equipamento e apresentaram intensidade elevada. Pode-se analisar também as variáveis dependentes, como mostra a Tabela 7.

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 7, conclui-se que as cavidades que apresentaram o maior aquecimento da água foram as 43, 38, 37, 40 e 39, em ordem decrescente. Essas foram as mesmas que apresentaram campo eletromagnéticos concentrados nas laterais. O campo elétrico médio novamente não apresentou correlação direta com a variação de temperatura.

Para uma melhor análise dos resultados, foi feito o tratamento dos dados no *software STATISTICA*, sendo obtidas as Equações 8, 9, e 10 para variação de temperatura, campo elétrico médio e potência de saída, respectivamente.

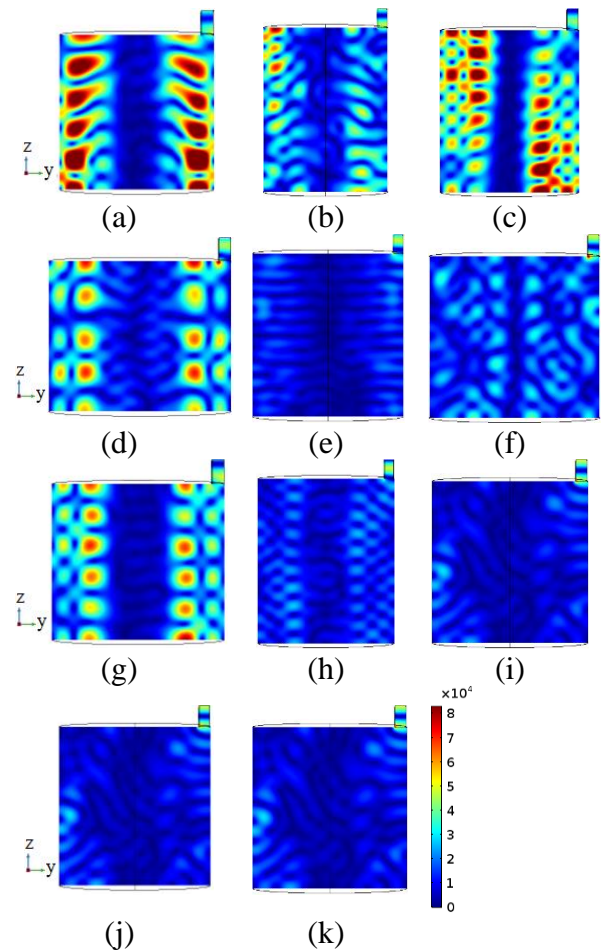


Figura 7: Campo eletromagnético das cavidades (a)37, (b)38, (c) 39, (d) 40, (e) 41, (f) 42, (g) 43, (h) 44, (i) 45, (j) 46, (k) 47 no planejamento 3^k para fornos em torno de 200 L.

Tabela 7: Resultados do planejamento 3^k para cavidades em torno de 200 L.

Cavidade n°	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃
	Di	L	ΔT (°C)	$E_{méd}$ (V/m)	$P_{útil}$ (W)
37	-1	-1	31,15	34610	976,5
38	-1	1	31,60	18939	990,6
39	-1	0	30,72	29633	963,0
40	1	-1	30,78	18755	964,9
41	1	1	30,32	8154	950,5
42	1	0	28,28	11152	886,6
43	0	-1	31,82	19423	997,5
44	0	1	27,12	9272	850,6
45	0	0	28,36	6340	889,1
46	0	0	28,35	6339	888,8
47	0	0	28,34	6339	888,5

$$\Delta T (\text{°C}) = 30,01 - 0,68X_1 - 0,76X_2 - 0,69X_1^2 - 0,67X_2^2 - 0,23X_1X_2 - 0,40X_1X_2^2 - 1,17X_1^2X_2 + 0,09X_1^2X_2^2, R^2 = 1,00 \quad (8)$$

$$E_{méd} (\text{V/m}) = 17364,21 - 7520,15X_1 - 6070,42X_2 - 4264,46X_1^2 - 1242,06X_2^2 + 1267,52X_1X_2 - 1290,26X_1X_2^2 + 746,34X_1^2X_2 - 2071,58X_1^2X_2^2, R^2 = 1,00 \quad (9)$$

$$P (\text{W}) = 940,99 - 21,35X_1 - 24,54X_2 - 21,54X_1^2 - 21,15X_2^2 - 7,13X_1X_2 - 12,65X_1X_2^2 - 36,69X_1^2X_2 + 2,64X_1^2X_2^2, R^2 = 1,00 \quad (10)$$

Os coeficientes de determinação das correlações foram iguais a 1, isso indica que houve um bom ajuste dos pontos. Já que os valores máximos são encontrados nas extremidades, para analisar o comportamento de pontos que extrapolam o intervalo de -1 e +1, foi proposto um PCC.

Planejamento Composto Central: Os resultados obtidos para as cavidades vazias são apresentados na Figura 8.

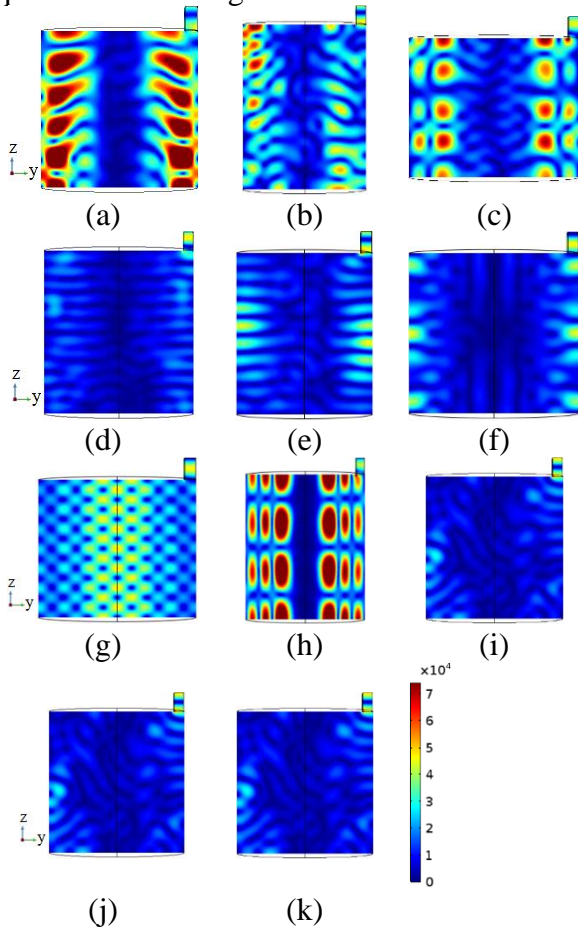


Figura 8: Campo eletromagnético gerado na cavidade (a) 48, (b) 49, (c) 50, (d) 51, (e) 52, (f) 53, (g) 54, (h) 55, (i) 56, (j) 57, (k) 58 no PCC para cavidades em torno de 200 L.

Pela análise da Figura 8, nota-se que as cavidades 48, 49, 50 e 55 foram as que apresentaram o campo eletromagnético com maior intensidade concentrado nas laterais do forno micro-ondas. Este comportamento pode ser benéfico para o aquecimento da água.

Além da distribuição do campo eletromagnético, pode-se analisar também o comportamento das variáveis dependentes. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados do PCC para cavidades em torno de 200 L.

Cavidade n°	X ₁	X ₂	Y ₁	Y ₂	Y ₃
	Di	L	ΔT (°C)	E _{méd} (V/m)	P _{útil} (W)
48	-1	-1	31,15	34610	976,5
49	-1	1	31,60	18939	990,6
50	1	-1	30,78	18755	964,9
51	1	1	30,32	8154	950,5
52	-1,147	0	30,09	10581	943,3
53	1,147	0	27,31	10704	856,2
54	0	-1,147	30,70	13428	962,4
55	0	1,147	31,10	23798	974,9
56	0	0	28,36	6340	889,1
57	0	0	28,35	6339	888,8
58	0	0	28,34	6339	888,5

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 8, nota-se que as cavidades que apresentaram maiores variações de temperatura e maiores potências de saída foram as 49, 48, 55 e 50, respectivamente. Essas foram também, as cavidades que apresentaram o campo eletromagnético mais próximo do esperado. Para um melhor estudo dos resultados apresentados pelo planejamento composto central, foram obtidas as Equações 11, 12, e 13 para variação de temperatura, campo elétrico médio e potência de saída, respectivamente.

$$\Delta T (\text{°C}) = 28,55 - 0,73X_1 + 2,12X_2^2, R^2 = 0,8050 \quad (11)$$

$$E_{méd} (\text{V/m}) = 8413,83 + 9864,73X_2^2, R^2 = 0,1781 \quad (12)$$

$$P (\text{W}) = 894,92 - 22,86X_1 + 66,55X_2^2, R^2 = 0,8050 \quad (13)$$

Os coeficientes de determinação (R^2) das correlações não foram próximos de 1, ou seja,

não houve um bom ajuste dos resultados obtidos no planejamento composto central.

Portanto, a cavidade ótima para aquecimento de cafés especiais é a 43 do planejamento 3^k , pois esta apresentou uma boa distribuição do campo eletromagnético, além de uma elevada potência útil. Esta cavidade possui comprimento de 56,5 cm e diâmetro de 62,98 cm, totalizando 175,98 L, como mostra a Figura 9. Outras cavidades que apresentaram bom desempenho foram as 37 e 38 também do planejamento 3^k , apresentando volumes de 142,41L e 190,30L, respectivamente.

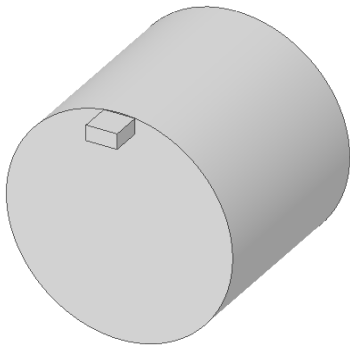


Figura 9: Cavidade ótima de 175,98 L.

Variação de temperatura com diferentes posicionamentos do volume de água

Os resultados obtidos pela variação do posicionamento da água nas cavidades de 119,28 e 175,98L são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Variação de temperatura com diferentes posicionamentos da água.

Posição	Cavidade 1	Cavidade 2
0°	14,97 °C	15,89 °C
45°	16,04 °C	15,64 °C
90°	13,63 °C	15,38 °C
135°	15,81 °C	15,74 °C
180°	16,01 °C	15,90 °C

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 9, pode-se notar que para a cavidade de 119,28 L, para que seja obtida a melhor eficiência na secagem dos grãos, o melhor seria que o volume fosse posicionado a 45° ou 180° do guia de ondas. Outra solução seria fornecer uma rotação para o forno micro-ondas, de maneira que os grãos percorressem 360° da cavidade. Isso garante que as partículas não fiquem somente em zonas ruins e proporciona uma secagem homogênea.

Já para a cavidade de 175,98 L, pode-se notar que há uma diferença de apenas 3,27% entre o maior e menor valor. Essa diferença não é significativa na variação de temperatura com os diferentes posicionamentos do volume. Isso indica que a cavidade é ótima para qualquer posição em que os grãos se encontrem. Seria viável manter uma rotação constante dessa cavidade, para evitar que os grãos de café sejam secados de maneira desigual.

CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados, pode-se concluir que para a discretização das cavidades deve ser utilizado um tamanho máximo de 17,0 mm e mínimo de 0,734 mm. Para o volume de 9 litros de água inserido na cavidade em torno de 100 litros, deve-se utilizar um tamanho mínimo para o tamanho das células de 0,08 mm e máximo de 7 mm. E para as cavidades em torno de 200 litros, com 4,5 litros de água, deve ser utilizado o tamanho máximo de células de 7 mm, um valor mínimo de 0,205 mm.

O estudo do dimensionamento de cavidades de cerca de 100 litros, aponta que o diâmetro de 45 cm e comprimento de 75 cm são ótimos para o aquecimento de café. Esta cavidade possui 119,28 litros e uma potência útil de 1000W para o aquecimento de 9 litros de água. Além disso, outra cavidade que apresentou bom desempenho possui 35 cm de diâmetro e 75 cm de comprimento, totalizando 72,16 litros. A terceira melhor cavidade possui 45,74 cm de diâmetro e 67,50 cm de comprimento, resultando em 110,91 litros.

As dimensões ótimas para o aquecimento de café, obtidas a partir do estudo do dimensionamento de cavidades de 200 litros, são 56,5 cm para comprimento e 62,98 cm para o diâmetro, totalizando 175,98 litros. Esta cavidade apresenta uma potência útil de 997,48. A segunda melhor cavidade, possui diâmetro de 75,50 cm e comprimento de 56,65 cm. Já a terceira melhor cavidade possui diâmetro de 56,60 cm e comprimento de 56,65 cm.

Além disso, pode-se concluir que para a cavidade de 119,28 litros, os melhores posicionamentos do volume a ser aquecido na cavidade são de 45° e 180° em relação ao guia de ondas. Já para a cavidade de 175,98 litros, não houve mudança significativa na variação de temperatura com os diferentes posicionamentos

do volume a ser aquecido. Para ambas as cavidades, é recomendado que se mantenha uma rotação constante, para evitar que os grãos sejam secos de maneira desigual.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- BALDIM, G. F.; COSTA, F. O.; PETRI, I. J. (2021), Previsão dos campos eletromagnéticos em secador micro-ondas via fluidodinâmica computacional. *Rev. Bras. de Iniciação Científica*, Itapetinga, Vol 8, p. 1-25.
- BRUIJN, J.; RIVAS, F.; RODRIGUEZ, Y.; LOYOLA, C.; FLORES, A.; MELIN, P.; BORQUEZ, R. (2015), Effect of vacuum microwave drying on the quality and storage stability of strawberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol 40, p. 1104-1115.
- 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.
- 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. *Journal of Food Process Engineering*, Vol 44, p. 1-13.
- EFRAIM, P.; PEZOA-GARCÍA, N. H.; JARDIM, D. C. P.; NISHIKAWA, A.; HADDAD, R.; EBERLIN, M. N. (2010), Influência da fermentação e secagem de amêndoas de cacau no teor de compostos fenólicos e na aceitação sensorial. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Vol 30, p. 142-150.
- EKEZIE, F.-G., C.; SUN, D.-W.; HAN, Z.; CHENG, J.-H. (2017), Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, Vol 67, p. 58-69.
- GAVA, A. J.; (1998) *Princípios de tecnologia de alimentos*. 1ª ed., Nobel, São Paulo.
- GEROMEL, L. B. & FREITAS, I. R. (2020), Aplicação da energia de micro-ondas para secagem da banana nanica (*Musa acuminata'dwarf cavendish'*) submetida ao processo de osmose. *Colloquium Exactarum*, Vol 12, p.1-10.
- IDA, N. & BASTOS, J. P. A. (1997), *Electromagnetics and Calculation of Fields*, Springer-Verlag, New York.
- IZLI, N.; İZLI, G.; TASKIN, O. (2017), Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. *Food Science and Technology*, Vol 37, p. 604-612.
- LOKHANDE, S. M.; RANVEER, R. C.; SAHOO, A. K. (2017), Effect of microwave drying on textural and sensorial properties of grape raisins. *International Journal of ChemTech Research*, Vol 10, p. 938-947.
- MELO, J.C. S.; PEREIRA, E. D.; OLIVEIRA, K. P.; COSTA, C. H. C.; FEITOSA, R. M. (2015), Estudo da cinética de secagem da pimenta de cheiro em diferentes temperaturas. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, Vol 10, p. 9-14.
- MENDONÇA, A. P.; SILVA, L. M. M.; SOUSA, F. C.; SILVA, J. R.; ROSA, J. C. (2019), Modelagem matemática das curvas de secagem de sementes de duas espécies de andiroba. *Engenharia na Agricultura*, Vol 27, p. 293-303.
- 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. G.; ROWLEY, R. L.; WILDING, W. V. (2008), *Physical and Chemical Data. Section 2 in: Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Book Co, New York.
- POZAR, D. M. (2011), *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., United States.