

DIMENSIONAMENTO DE CAVIDADES MICRO-ONDAS DE SECADORES PELA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E TÉRMICOS

Felipe Orlando da Costa¹
Irineu Petri Júnior²

Resumo: A operação unitária de secagem é uma das mais complexas existentes, possuindo grandes tempos de operação. Esse alto tempo envolvido pode danificar o produto final, sendo assim, novas técnicas estão sendo desenvolvidas para solucionar este problema. O processo denominado de secagem híbrida, que é definido como aplicação das micro-ondas acoplada à secagem convectiva, vem se destacando para solucionar esse problema. Sendo assim, os objetivos deste trabalho são aplicar o conceito de planejamento de experimentos, em simulações numéricas, para projeto e determinação de dimensões ótimas de cavidades micro-ondas sextavadas utilizadas em secadores híbridos. A largura e o comprimento ótimo da cavidade foram determinados pelo planejamento de experimentos buscando obter maiores valores de temperatura média, campo eletromagnético e potência de saída. Foram verificadas a influência do volume de líquido no aquecimento e na distribuição dos campos eletromagnéticos, além de avaliar as zonas preferenciais de aquecimento. Os resultados mostraram que o comprimento da guia de onda não possui influência no perfil de temperatura durante o aquecimento, entretanto, o perfil do campo eletromagnético sofre bastante influência. Foi observado que a largura e comprimento da cavidade possuem comportamentos lineares e quadráticos, respectivamente, com relação aos resultados de potência de saída. Na geometria ótima, a temperatura média, durante o aquecimento, sofre pouca influência do volume de líquido. Também foi constatado que, para a cavidade ótima, a região central é recomendada para dispor o material e as zonas preferenciais de aquecimento do líquido estão posicionais perpendicularmente ao magnetron. Pode-se concluir que as técnicas utilizadas foram úteis para projeto de uma cavidade ótima, podendo ser aplicadas também no *scale-up* de secadores micro-ondas.

Palavras-chave: *Hot-spot*, planejamento composto central, cavidade hexagonal, guia de onda, magnetron.

Abstract: The unitary drying operation is one of the most complex in existence, with an operating time that normally ranges. The long time involved in this operation can damage the final product, therefore, new techniques are being developed to solve this problem. The process called hybrid drying, which is defined as the application of microwaves coupled with convective drying, has been standing out. The objectives of this work are to apply the methodology of design of experiments, in numerical simulations, for design and determination of optimum dimensions of hexagonal microwave cavities used in hybrid dryers. The optimal width and length of the cavity were determined by the design of experiments seeking to obtain higher values of average temperature, electromagnetic field and output power. The influence of

¹ Acadêmico do Curso de Engenharia Química / UFLA.

² Professor do Curso de Engenharia Química / UFLA.

the volume of liquid on heating and the distribution of electromagnetic fields was verified, in addition to evaluating the preferred heating zones. The results showed that the length of the waveguide has no influence on the temperature profile during heating, however, the profile of the electromagnetic field suffers a lot of influence. It was observed that the width and length of the cavity have linear and quadratic behaviors, respectively, with respect to the output power results. In the optimum geometry, the average temperature, during heating, is little influenced by the volume of liquid. It was also found that, for the optimal cavity, the central region is recommended to arrange the material and the preferred zones of heating the liquid are positional perpendicular to the magnetron. It can be concluded that the techniques used were useful for the design of an optimal cavity and can also be applied in the scale-up of microwave dryers.

Keywords: Hot-spot, central composite planning, hexagonal cavity, waveguide, magnetron.

Introdução

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria, com ênfase na indústria alimentícia, tendo em vista, que muitos alimentos ao final do seu processo de fabricação possuem uma umidade incompatível para sua conservação e armazenamento. No processo de secagem é empregado uma fonte de calor no sólido a fim de evaporar a umidade presente no produto, além de permitir o armazenamento adequado do mesmo. A redução de massa gerada no processo de secagem, minimiza o custo de armazenamento e transporte do produto. Analisando o contexto atual do Brasil, esses custos são significativos no valor final do produto, tornando o produto viável ou inviável para sua comercialização. Segundo uma análise realizado por Barth (2012) os custos de armazenamento e transporte para produtos alimentícios representam 65,51% e 14,75% do custo total da logística, respectivamente. O custo logístico, envolve tributos, margem de lucro, armazenamento, transporte e custo de oportunidade.

A operação unitária de secagem é uma das mais complexas existentes, possuindo fenômenos de transferência de calor e massa simultâneos, essa operação possui longos tempos de duração, que podem variar normalmente de 16 até 45 horas, sendo o tempo função do tipo de produto e das condições operacionais. O alto tempo envolvido nesta operação, em alguns casos, pode danificar o produto e até mesmo comprometer a qualidade final. Devido a isso, a busca por secadores mais eficiência ou formas alternativas para o processo de secagem têm sido foco de diversas pesquisas na literatura (CUNHA; CANTO; MARSAIOLI, 2013). Algumas dessas técnicas se destacam, como por exemplo a aplicação das micro-ondas acoplada à secagem convectiva, denominada de secagem híbrida. Sendo uma possível solução industrial, visto que este tem um tempo de secagem significativamente menor e melhor controle de temperatura.

Entretanto o foco no desenvolvimento de essa nova tecnologia é recente, assim sendo, existem poucos trabalhos que abordam esse tema. No entanto, vale ressaltar alguns trabalhos que apresentaram vantagens na utilização de essa nova

tecnologia para produtos alimentícios em contraste com a secagem convencional, tais como a secagem de abóbora, abacaxi, alho, grãos etc, (CONFORT; KIECKBUSCH; MARSAIOLI, 1990; JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017; SHARMA; PRASAD, 2001). Outro ponto que vale destacar, analisando estes trabalhos citados, é o receio por parte do meio industrial na aplicação da secagem micro-ondas, tendo em vista, que não há domínio completo do comportamento dos campos eletromagnéticos. Devido a isso, se torna necessário o desenvolvimento diário de novos trabalhos acerca de esse tema, a fim de obter-se uma elucidação completa dos campos eletromagnéticos.

Ondas eletromagnéticas são oscilações formadas pela interação entre campos elétricos e magnéticos variáveis, que são perpendiculares entre si e, também perpendiculares a direção de propagação. Elas são ondas transversais e tridimensionais que se propagam em meios não sólidos (vácuo) ou em materiais. Dentre as ondas eletromagnéticas temos as micro-ondas que são caracterizadas por possuírem a frequência na faixa de 300 a 300.000 MHz. Entretanto foi determinado por Petri (2017) que na frequência de 2450 MHz a mesma consegue aquecer materiais de forma mais eficiente.

A forma na qual a matéria e radiação irão interagir depende exclusivamente do comprimento da onda eletromagnética, sendo que, no caso de ondas eletromagnética com altos valores de frequência e, conseqüentemente, baixos valores de comprimento de ondas a interação radiação-matéria ocorre nos elétrons internos das moléculas, como é o caso dos raios-x e raios gama. Entretanto, conforme há uma diminuição do valor da frequência, a interação passa a atuar nos elétrons externos, como é o caso da radiação ultravioleta. Diminuindo mais ainda o valor da frequência, a interação radiação-matéria, ocorre por meio de movimentos rotacionais dos dipolos permanentes (para moléculas polares), provocando o aquecimento do material, como é o caso da radiação micro-ondas. Os dipolos possuem a tendência em alinhar-se com o campo magnético, acompanhando as oscilações da onda eletromagnética, essa rotação do dipolo faz aumentar a energia cinética das moléculas, devido a isso, temos um aumento da temperatura. Para moléculas com dipolo induzido (moléculas apolares) ocorre o mesmo fenômeno, mas com intensidades menores (PANISSET, 2014).

As ondas eletromagnéticas são modeladas pelas equações de Maxwell, que é constituída pela lei de Gauss, lei de Gauss para os campos magnéticos, lei de Faraday e a lei de Ampère que são as Equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente (TIPLER; MOSCA, 2009).

$$\oint_S \vec{E}_n \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{int} \quad \text{eq. (1)}$$

$$\oint_S \vec{B}_n \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{eq. (2)}$$

$$\oint_C \vec{E}_n \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B}_n \cdot d\vec{A} = -\int_S \frac{\partial B_n}{\partial t} dA \quad \text{eq. (3)}$$

$$\oint_C \vec{E}_n \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I + I_d) \quad \text{onde: } I_d = \epsilon_0 \int_S \frac{\partial E_n}{\partial t} dA \quad \text{eq. (4)}$$

Onde: E_n é o campo elétrico, A é a área da superfície gaussiana, ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, Q_{int} é a carga interna à superfície gaussiana, B_n é o campo magnético, l é o comprimento da integral de linha, μ_0 é a permissividade magnética no vácuo, I é a corrente elétrica e I_d é a corrente de deslocamento de Maxwell.

O secador micro-ondas é constituído de uma cavidade acoplada a uma guia de onda, a face da guia de onda com vetor normal perpendicular a cavidade é denominada de porta, sendo essa face onde está instalado o magnetron. Este equipamento emite as ondas eletromagnéticas na região das micro-ondas. A porta opera em TE (*transversal elétrica*), em esse tipo de propagação o campo elétrico é transversal à direção de propagação da onda, enquanto o campo magnético é normal à direção de propagação da onda (POZAR, 1998). Na simulação das 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.

O desenvolvimento de um estudo experimental normalmente requer altos recursos humanos e técnicos, e envolvem um alto custo. Neste cenário a fluidodinâmica computacional (CFD) se torna uma ferramenta de grande importância para o desenvolvimento de novo processo, pois utilizando essa técnica é possível prever campos eletromagnéticos e fenômenos de transferência de calor, sendo possível propor novas formas de otimizar o secador micro-ondas.

A inovação deste projeto é a busca pela otimização do aproveitamento das micro-ondas nos processos de secagem e inserindo a ele uma ferramenta numérica para prever, de maneira teórica, a distribuição de campos eletromagnéticos na cavidade de secagem. Visto isso, este trabalho vem para agregar um tema que ainda está em desenvolvimento da área acadêmico-industrial e se mostra inovadora tanto no campo de desenvolvimento de secadores micro-ondas quando no meio da simulação numérica de campos eletromagnéticos.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é avaliar, via simulação numérica, o comportamento das micro-ondas no interior da cavidade, e determinar a geometria ideal da cavidade que minimiza as perdas por atenuações. Para isso será analisado o comprimento da guia de onda separadamente e posteriormente, utilizando um planejamento de experimentos, será avaliada a largura e o comprimento da cavidade. E por fim, será realizado uma análise para mensurar a influência do volume de líquido a ser aquecido na potência de saída e também será analisado zonas preferenciais de aquecimento do material no interior da cavidade.

Metodologia

Método Numérico

Inicialmente foi feita uma geometria da cavidade micro-ondas no software ANSYS SpaceClaim 19.2, por meio de ferramentas CAD de construção de

geometrias, sendo este equipamento constituído basicamente de duas regiões: a cavidade que possui a forma geométrica hexagonal e a guia de onda que possui a forma geométrica de um paralelepípedo.

A geometria construída é exportada num formato step para ser carregada no software COMSOL Multiphysics 4.4, no qual, será utilizado para simular os campos eletromagnéticos e térmicos. Nesse software, a malha é gerada tomando como base o Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM).

A malha tetraédrica é gerada automaticamente, após definir os parâmetros da mesma. Foi utilizado os mesmos valores para todas as malhas, a fim de manter constante os erros por discretização do domínio geométrico. Com isso, foi utilizado os seguintes valores: tamanho mínimo e máximo de células igual a 0,828 mm e 19,3 mm, respectivamente; máxima taxa de crescimento da célula igual a 1,35; fator de curvatura igual a 0,3; e resolução de regiões estreitas igual a 0,85. Estes valores foram determinados através de um teste de independência de malha previamente realizado. Com isso, para simulação do campo eletromagnético as malhas formadas tinham como valor mínimo e máximo de número de células iguais a 15.188 e 26.580 células, respectivamente. E para simulação dos campos eletromagnéticos e térmicos, simultaneamente, foram utilizadas malhas que tinham como valor mínimo e máximo de células iguais a 219.699 e 231.354 células, respectivamente.

Foi definido o material das paredes da cavidade e guia de ondas como ferro e definidas como condutores elétricos perfeitos. As simulações e as condições de contorno utilizadas foram as mesmas validadas já em trabalhos de Rossi et al. (2017) e Santos et al. (2018). E o critério de convergência utilizado foi de 10-5.

As condições iniciais de propagação das ondas eletromagnéticas foram definidas para uma entrada retangular e foi utilizado um campo elétrico com mode 10 (TE10). Devido a praticidade foi utilizado a potência de entrada, na qual, tem intensidade igual a 900 W. E foi utilizado uma guia de onda comercial, do modelo WR340.

O campo eletromagnético foi calculado no domínio da frequência enquanto que o campo térmico no domínio do tempo. As paredes da cavidade foram consideradas condutores perfeitos, porém sem condição de impedância para avaliação da potência de saída na cavidade.

Variação do Comprimento da Guia de Onda

Inicialmente foi realizada a análise do comprimento da guia de onda, a fim de determinar se existe influência do comprimento da guia de onda na convergência ou dissipação das ondas eletromagnéticas. Devido a isso, foi realizado simulações para os seguintes comprimentos: 61,2; 81,6; 102,0; 122,4; 142,8; 163,2; 183,6; 204,0; 224,4 e 244,8 mm. Como pode ser observado, a diferença entre dois comprimentos subsequentes é de 20,4 cm, isso foi definido pelo fato de ser um valor ótimo de guia de onda encontrado no trabalho de Baldim, Costa e Petri (2020).

Inicialmente foi realizado a simulação apenas do campo eletromagnético, a

fim de avaliar a influência do comprimento da guia de onda no campo eletromagnético da cavidade e da guia de onda. Para quantificar a influência do comprimento da guia de onda no processo de secagem, foi inserido um béquer contendo 50 cm³ de água, assim, é possível determinar a temperatura final da água e com esse valor, é possível quantificar a influência do comprimento da guia de onda no processo de aquecimento.

Planejamento do Ponto Central

Com a finalidade de encontrar dimensões ótimas para o secador micro-ondas hexagonal, foi aplicado um método estatístico denominado de planejamento composto central ortogonal, utilizando como ponto central as dimensões ótimas obtidas em Costa et al. (2021), sendo o comprimento igual a 30,5 cm e a largura igual a 15 cm. A geometria ideal deve minimizar as atenuações das micro-ondas e tornar a distribuição das ondas mais homogêneas, já que a mesma é considerada multimodo (múltiplos hot-spots).

O micro-ondas proposto apresenta uma cavidade hexagonal para redução da atenuação das ondas e uma melhor focalização das ondas eletromagnéticas no centro do equipamento, assim como o HEPHAISTOS-CA2 (High Electromagnetic Power Heating Automated Injected Structures Oven System) apresentado por Feher e Manfred (2004).

Para o planejamento composto central (PCC) ortogonal, as variáveis independentes utilizadas foram largura do hexágono (X_1) e comprimento da cavidade (X_2) conforme representado na Figura 1. As faixas de valores, testadas no planejamento, foram determinadas segundo a abordagem de Box, Hunter e Hunter (1978) para planejamentos fatoriais. Sendo assim, para 2 variáveis independentes e 3 repetições no ponto central, foi obtido um coeficiente de ortogonalidade de 1,14744. Utilizando a Equação 5, proposta por Box, Hunter e Hunter (1978), foram geradas as codificações das variáveis, assim como mostrado pela Tabela 1.

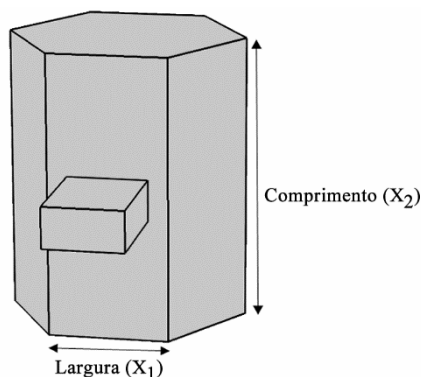


Figura 1: Geometria da cavidade e posição das variáveis independentes.

$$x_i = 2 \frac{\xi_i - \bar{\xi}_i}{d_i} \quad \text{eq.(5)}$$

Sendo, x_i o valor codificado da variável, ξ_i o valor da variável na escala original, $\bar{\xi}_i$ o valor médio entre os limites máximo e mínimo na escala original e d_i a diferença entre o limite máximo e mínimo na escala original.

Tabela 1: Forma codificação de variáveis independentes para o planejamento do ponto central.

	-1,14744	-1	0	1	1,14744
Largura (X₁)	12,85 cm	14 cm	15 cm	16 cm	17,15 cm
Comprimento (X₂)	27,06 cm	27,5 cm	30,5 cm	33,5 cm	33,94 cm

As repetições no ponto central foram efetuadas alterando o número de células, pois em simulações via CFD não há erros experimentais, os erros estão relacionados aos modelos utilizados e ao processo de discretização efetuado. Como os modelos já foram validados, para contabilizar o erro por discretização foi necessário realizar a simulação com malhas com diferentes números de células.

A distribuição do campo eletromagnético no interior do secador micro-ondas foi modelada por meio das correlações de Maxwell, prevendo a potência dissipada no material dielétrico (água) e tal informação utilizada no termo de geração de calor da equação do balanço de energia. Com isso é possível prever a variação do perfil de temperatura no material submetido às ondas eletromagnéticas. Como variáveis dependentes foram avaliadas a temperatura média (Y_1), a intensidade média do campo eletromagnético (Y_2) e a potência de saída (Y_3).

Para avaliar os resultados simulados de temperatura e potência de saída, no interior da cavidade foi inserida um bquer com 50 cm³ e verificou-se a temperatura final do mesmo após 60 segundos de aquecimento. Por fim, foi utilizado o *software* Statística 7, para analisar a influência das variáveis independentes nas variáveis dependentes, através de superfícies de resposta.

Influência da Variação do Volume de Líquido na Cavidade

A fim de avaliar a influência do volume de líquido aquecido, no campo eletromagnético e na potência de saída e conseqüentemente na temperatura final da água, foi realizado simulações dos campos eletromagnéticos e do balanço de energia para os seguintes volumes: 40 cm³, 100 cm³, 200 cm³, 400 cm³, 600 cm³, 800 cm³ e 1000 cm³. As dimensões utilizadas para a cavidade, foram as obtidas através do planejamento composto central.

Para avaliar a influência do volume de líquido no balanço de energia foi utilizado os valores de temperatura final da água e utilizando os valores de capacidade calorífica da água foi calculado a potência da saída da cavidade. E a influência do volume de líquido no campo eletromagnético foi feito de maneira qualitativa, observando os perfis de campo eletromagnético para os diferentes volumes de água simulados.

Cavidade Ótima e Análise Térmica

Foi simulado novamente a cavidade com dimensões ótimas, sendo que, neste caso o objetivo é realizar uma análise minuciosa do campo eletromagnético no interior da cavidade. A fim de determinar possíveis regiões preferenciais para disposição do líquido ou sólido que será aquecido, pois a posição do material no interior da cavidade influencia diretamente a temperatura final no material. Sendo assim, o ideal é realizar a disposição do material em regiões de convergência de ondas eletromagnéticas, sendo essas regiões, onde estão localizados os *hotspots*.

Entretanto o foco principal de essa seção é analisar os perfis térmicos da água, a fim de determinar regiões preferenciais de aquecimento do líquido, pois isso, pode definir a qualidade do processo de secagem, pois a disposição do material em regiões inadequadas, pode tornar o processo ineficiente ou provocar a perda de material pela torra, em caso de sólidos.

Resultados e Discussão

Análise do comprimento da guia de onda

A Figura 2 contém os perfis de campo eletromagnético para os diferentes comprimentos de guia de onda e a Tabela 2 contém os valores de temperatura final da água que foi posicionada no interior da cavidade para aquecimento durante 60 segundos.

Tabela 2: Resultados de temperatura de água com relação ao comprimento da guia de onda.

Comprimento [mm]	Temperatura final [K]
61,2	303,74
81,6	303,68
102,0	303,70
122,4	303,58
142,8	303,61
163,2	303,83
183,6	303,48
204,0	303,46
224,4	303,49
244,8	303,41

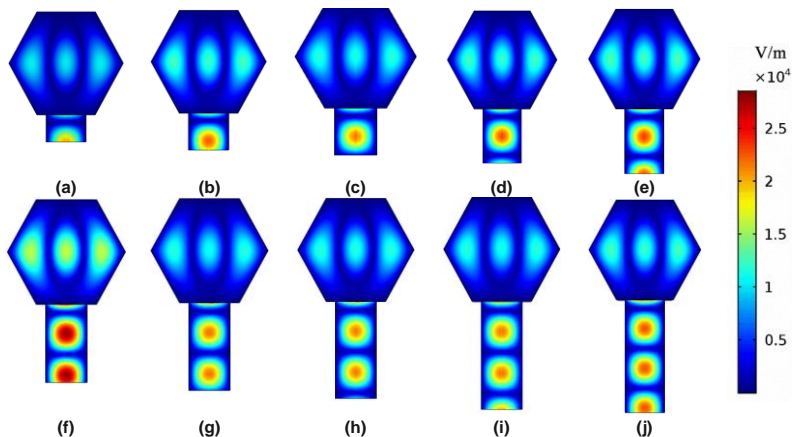


Figura 2: Campo elétrico para o comprimento de guia de onda de (a) 61,2 mm; (b) 81,6 mm; (c) 102,0 mm; (d) 122,4 mm; (e) 142,8 mm; (f) 163,2 mm; (g) 183,6 mm; (h) 204,0 mm; (i) 224,4 mm e (j) 244,8 mm.

Analisando a Figura 2 é possível perceber que o perfil do campo eletromagnético na cavidade não varia com o comprimento da guia de onda. Entretanto há uma pequena variação da intensidade do campo eletromagnético na cavidade, essa variação torna-se um pouco mais acentuada para o comprimento de 163,2 mm. O aumento da intensidade de campo eletromagnético para esse comprimento é refletido em um aumento da temperatura média de saída da água conforme pode ser observado na Tabela 2. Entretanto, vale ressaltar que o aumento do ganho de energia utilizando esse comprimento é muito baixo.

Para a região da guia de onda há variação do perfil de campo eletromagnético

com a variação do comprimento, alterando o número de *hotspot* completos e incompletos. Uma guia de onda bem projetada não deve possuir *hotspot* incompletos, pois isso favorece a dissipação de energia na forma de calor. Assim sendo, os comprimentos ideais para a guia de onda para essa cavidade são de 102,0 mm, 122,4 mm, 183,6 mm e 204,0 mm, sendo que nas duas primeiras é obtido 1 *hotspot* completo e nas duas últimas é obtido 2 *hotspots* completos, respectivamente.

Porém, vale enfatizar novamente a guia de onda de comprimento igual a 163,2 mm, sendo que para esse comprimento tem-se 1 *hotspot* completo e 1 incompleto na guia de onda. No entanto, a intensidade de esses *hotspots* está superior às demais guias de onda. Entretanto, como já foi citado o aumento do ganho de energia é de baixa magnitude e, considerando o erro numérico que está associado a processo de simulação, os valores de temperatura final praticamente se sobrepõe.

Com isso, pode-se concluir que o comprimento da guia de onda não influencia no processo de aquecimento, no entanto, possui influência nos perfis eletromagnéticos e conseqüentemente no número de *hotspots*.

Planejamento Composto Central (PCC) para dimensões ótimas

Foram realizadas as simulações do planejamento composto central e foram avaliados os seguintes parâmetros, a temperatura média da água no interior da cavidade, a intensidade média de campo eletromagnético e a potência de saída na cavidade. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos nas simulações.

Tabela 3: Resultados do planejamento do ponto central de simulações do aquecimento micro-ondas.

Simulação	Largura (X ₁)	Comprimento (X ₂)	Temperatura (Y ₁) [°C]	Campo eletromagnético (Y ₂) [kV/m]	Potência de Saída (Y ₃) [W]
1	-1	-1	79,4	11865,1	745,0
2	1	-1	50,2	11592,8	337,6
3	-1	1	45,0	7035,9	265,2
4	1	1	60,3	6512,7	478,3
5	-1,14744	0	89,0	8571,5	879,5
6	1,14744	0	71,5	15619,3	634,1
7	0	-1,14744	61,6	11435,7	495,6
8	0	1,14744	31,8	6481,6	80,4
9	0	0	75,4	16413,7	689,6
10	0	0	75,5	15461,9	690,1
11	0	0	75,5	16747,7	690,2

Os resultados obtidos na Tabela 3 mostram que utilizando um magnetron de potência de 900W é possível alterar a potência de saída na cavidade de 80,4 W até

879,5 W, apenas alterando as dimensões do equipamento, sendo essas às simulações 8 e 5, respectivamente. As alterações das dimensões da cavidade também possuíram grande influência na temperatura final média da água no interior da cavidade, pois as dimensões da cavidade exerceram uma influência muito grande no ganho de temperatura do líquido, visto que a mesma é diretamente proporcional à potência de saída na cavidade. Já o comportamento da intensidade média do campo elétrico não apresentou o mesmo comportamento, mas pôde-se observar que houve variações significativas dos seus valores alterando as dimensões do equipamento, mostrando que o perfil eletromagnético no interior da cavidade também é função das dimensões da cavidade.

Comparando a influência de cada variável independente com os perfis de campo eletromagnéticos, a Figura 3 mostra os perfis eletromagnéticos do secador micro-ondas nas simulações 1 e 2, em que foram alteradas somente a largura das faces do hexágono e o comprimento foi fixado em 27,5 cm. Pode-se observar que a largura da cavidade afeta o campo eletromagnético em sua magnitude, mas não na quantidade de *hotspots* gerados. Através da Tabela 3 pode-se observar que a intensidade média do campo eletromagnético para essas duas simulações são próximos, no entanto, a simulação 1 apresenta maior intensidade na guia de onda em comparação com simulação 2 e já a simulação 2 apresenta maior valor de intensidade na cavidade em comparação com a simulação 1.

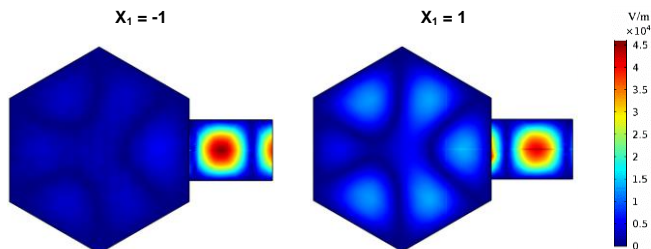


Figura 3: Perfil de campo elétrico no interior da cavidade alterando a largura do hexágono, fixando comprimento em $X_2 = -1$.

Analisando a Figura 4, temos o comprimento da cavidade fixado em 16 cm e foi alterado novamente a largura da geometria, com isso, pode-se observar que há variação do campo eletromagnético na cavidade e também na quantidade de *hotspots*, sendo que, na condição de 14 cm existem 6 *hotspots* na cavidade e na condição 16 cm há somente 2 *hotspots* de mais baixa intensidade.

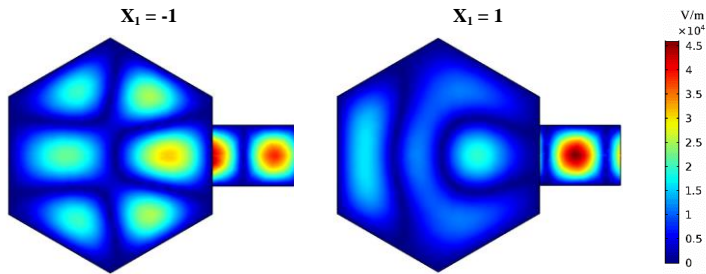


Figura 4: Perfil de campo elétrico no interior da cavidade alterando a largura do hexágono, fixando comprimento em $X_2=1$.

Na Figura 5, temos novamente o comprimento da cavidade fixada, mas agora no valor de 15 cm, com isso, foi alterado a outra variável independente a largura, novamente há variação da intensidade de campo eletromagnético e número de *hotspots*, para a condição de 12,85 cm, tem-se basicamente 1 *hotspot* central na cavidade, foi devido a isso que para essa geometria foi obtido o maior valor de potência de saída, pois a região onde foi colocado o béquer, tem o maior valor de campo eletromagnético comparados todas as geometrias utilizadas no planejamento composto central. Já para a condição de 17,15 cm não existe nenhum *hotspot* na região da cavidade e há somente 1 na guia de onda de baixa intensidade.

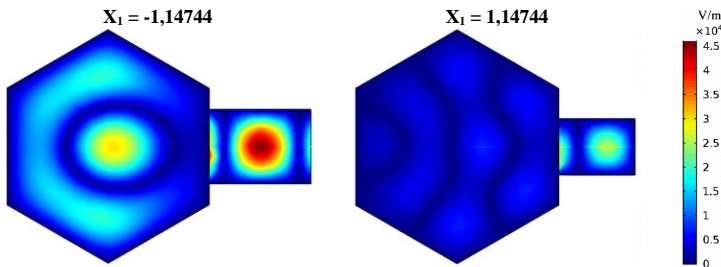


Figura 5: Perfil de campo elétrico no interior da cavidade alterando a largura do hexágono, fixando comprimento em $X_2=0$.

Observando agora a Figura 6, para analisar influência do comprimento da cavidade no campo eletromagnético, foi fixado a largura em 15 cm, com isso, pode-se observar que há variação do campo eletromagnético na cavidade e também na quantidade de *hotspots*, sendo que, na condição 27,06 cm não nenhum *hotspot* na cavidade, a mesma está com um baixíssimo valor de campo eletromagnético em seu interior, com isso, pode-se justificar porque para essa geometria foi obtido o menor valor de potência de saída, comparando todas as geometrias utilizadas. Já para a

condição 33,94 cm tem-se 6 *hotspots* na cavidade de baixa intensidade e 1 *hotspot* de alta intensidade na guia de onda.

Essa grande influência da dimensão do equipamento no campo eletromagnético, potência de saída e, conseqüentemente, temperatura da água tem relação com a evanescência das ondas ao se chocarem com as paredes que estão à uma distância que não coincide com o nó da onda eletromagnética. Esse fenômeno faz com que parte da energia enviada pelo magnetron seja dissipada pelo choque das ondas com as paredes. Se uma cavidade é bem projetada, as ondas se chocarão com a parede e sofrerão reflexão ao invés de se dissipar (POZAR, 1998).

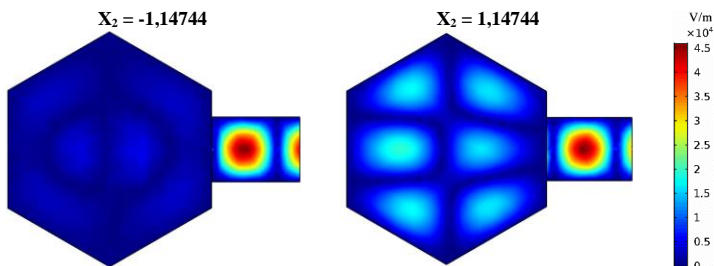


Figura 6 – Perfil de campo elétrico no interior da cavidade alterando a largura do hexágono, fixando comprimento em $X1=0$.

Para verificar a tendência do comportamento das variáveis dependentes com relação às variáveis independentes, foram geradas superfícies de resposta, apresentadas na Figura 7, para confecção das superfícies de resposta foi utilizado o *software* Statistica 7.

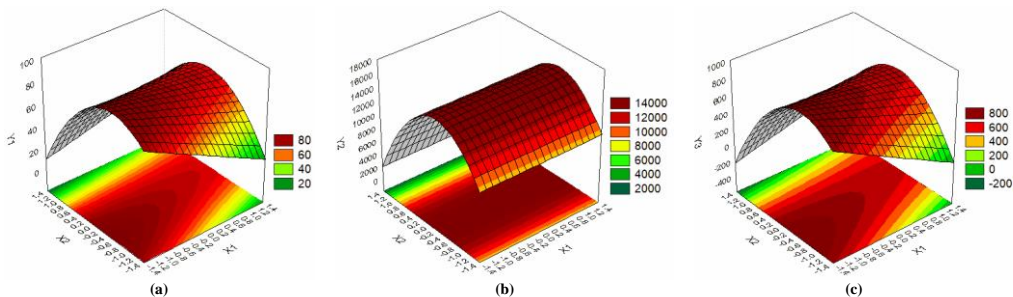


Figura 7 – Superfícies de resposta a) Para a temperatura ($Y1$); b) Para o campo elétrico ($Y2$); c) Para a potência de saída ($Y3$).

Através das superfícies de resposta, contidas na Figura 7 é possível observar a influência de uma variável independente com relação às variáveis dependentes. Com relação à variável de largura do hexágono ($X1$), o mesmo apresentou um

comportamento linear, para as três variáveis dependentes, possuindo um perfil mais uniforme para a análise do campo eletromagnético, como pode ser observado na Figura 7.b. Analisando o comportamento da largura da cavidade na temperatura final e a potência de saída, temos o mesmo perfil, novamente linear, porém neste caso a largura tem uma influência maior nessas variáveis e, conforme diminui há um aumento da potência de saída e conseqüentemente um aumento da temperatura final.

Realizando a mesma análise para o comprimento do hexágono (X_2), o mesmo apresentou um comportamento parabólico, com relação as três variáveis de resposta, mostrando que há um ponto de ótimo local no intervalo testado, ou seja, há um comprimento ótima a se utilizar para gerar a menor dissipação das ondas eletromagnéticas gerando, conseqüentemente, uma maior potência de saída.

Ainda pela análise das superfícies de resposta é possível verificar que os valores de largura e comprimento ótimas para obter uma maior potência de saída foi de 12,85 cm e 30,5 cm, respectivamente, gerando uma potência teórica de 879,5 W para 1 magnetron.

Influência da potência de saída com o volume de água para o experimento ótimo do PCC

Após obter o ponto ótimo do PCC, foi possível obter as seguintes dimensões da cavidade, 12,85 cm de largura e 30,5 cm de comprimento. Utilizando esta cavidade foi realizado a influência do volume de líquido na potência de saída. Os volumes testados foram de 40 cm³, 100 cm³, 200 cm³, 400 cm³, 600 cm³, 800 cm³ e 1000 cm³ esses resultados estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Potência de saída em função do volume de água para o ponto ótimo obtido através do planejamento do ponto central.

Volume [cm³]	Temperatura final (K)	Potência de Saída (W)
40	565,0	751,5
100	411,1	784,2
200	362,2	879,5
400	329,6	847,4
600	320,4	887,8
800	315,3	899,6
1000	311,6	864,8

Analisando a Tabela 4, pode-se observar que realmente existe variação da potência de saída com o volume de líquido a ser aquecido, porém essa variação não é diretamente proporcional, pois para os volumes igual a 400 e 1000 cm³, foi aumentado o volume de líquido com relação à simulação anterior e o valor da potência de saída foi reduzido. Também pode-se observar que a potência de saída não é uma função muito sensível do volume de líquido, ou seja, para altas variações do volume é obtido baixas variações no valor da potência de saída, sendo isso uma vantagem, pois assim

tem-se um controle melhor da temperatura. A menor e a maior eficiência de transferência de potência, foram de 83,5% e 99,9%, respectivamente, vale ressaltar que a eficiência é definida como a razão entre a potência de saída pela potência de entrada.

Outro ponto que vale ressaltar é a distorção gerada no campo eletromagnético no interior da cavidade devido a presença do bquer em essa região, isso pode ser observado na Figura 8, onde também pode-se observar que conforme existe um aumento do volume do bquer a intensidade dos *hotspots* formados diminuído, entretanto o perfil praticamente independe do volume de líquido no interior da cavidade.

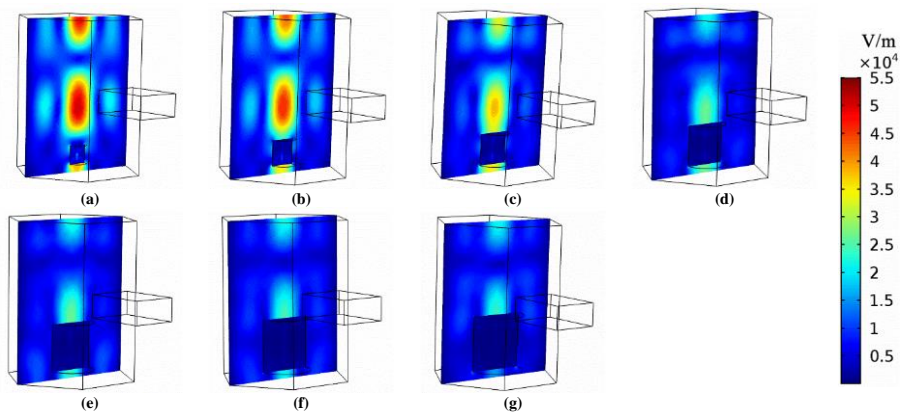


Figura 8: Perfis de campo eletromagnético com a vista lateral para o volume de (a) 40 cm³, (b) 100 cm³, (c) 200 cm³, (d) 400 cm³, (e) 600 cm³, (f) 800 cm³ e (g) 1000 cm³.

Simulação com as dimensões ótimas e análise do perfil térmico do líquido

Foi realizado a simulação da cavidade com as dimensões ótimas obtidas através do PCC, sendo 12,85 cm de largura e 30,5 cm de comprimento. O comprimento da guia de onda utilizado foi o de 163,2 mm, entretanto poderia ser utilizar qualquer valor de comprimento, pois como já foi dito essa variável não influencia no ganho de energia do líquido.

Foi realizado a simulação do campo eletromagnético para essa geometria e foi obtido os perfis representado na Figura 9, onde pode-se observar um *hotspot* na cavidade na região central analisando a vista superior, no entanto, quando observa-se o plano central, vemos que existem três *hotspots* de média intensidade, sendo as regiões preferencias para colocar o líquido ou sólido a ser aquecido. Na região da guia de onda foi obtido um *hotspot* completo e um incompleto de alta intensidade e, o valor médio do campo eletromagnético no interior da cavidade foi igual a 8820,04 V/m.

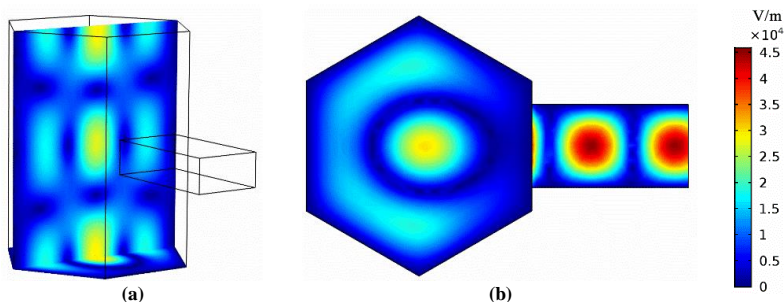


Figura 9: Perfil de campo eletromagnético para a geometria ótima(a) vista lateral e (b) vista superior.

O aquecimento do líquido, foi simulado em estado transiente, sendo assim, tem-se um perfil térmico para cada instante de tempo, a Figura 10 representada os perfis para os instantes de 0, 30 e 60 segundos. Observando esses perfis pode-se concluir que há regiões preferenciais de aquecimento da água. As regiões preferenciais de aquecimento estão posicionais perpendicularmente ao magnetron, isso ocorre, pois essa é a região do líquido que possui o primeiro contato com as ondas eletromagnéticas provenientes da mesma, logo o processo de aquecimento é mais intenso em essas regiões. Para esse aquecimento tem-se o valor médio da temperatura final da água igual a 361,74 K, sendo que, através da Figura 10.c, pode-se observar que há regiões onde a temperatura localizada alcança valores próximos a 500 K.

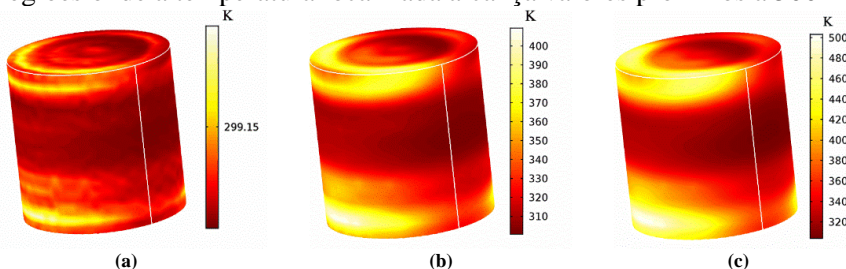


Figura 10: Perfil de temperatura do béquer contendo água para diferentes tempos a) Para o tempo de 0 s; b) Para o tempo de 30 s; c) Para o tempo de 60 s.

O conhecimento de essas região pode definir como um material deve ser distribuído em um processo de secagem, a fim de diminuir o tempo de processo e também evitar a torra do material aquecido, um exemplo seria colocar os sólidos com maior úmida nas regiões de aquecimento preferenciais, e os sólidos de menor úmida nas regiões onde o aquecimento é desfavorecido, pois assim tem-se a secagem de todos os grãos de forma a manter a úmida final do material granular o mais uniforme possível e também minimizar as perdas pela torra.

Considerações Finais

Para a análise do comprimento da guia de onda pode-se concluir, que o perfil do campo eletromagnético no interior da cavidade independe de seu comprimento, entretanto o perfil do campo eletromagnético na guia de onda varia com o seu comprimento. Outro ponto que vale ressaltar é que o ganho de energia por parte do líquido independe do comprimento da guia de onda, assim sendo, essa variável não interfere no processo de secagem.

Através do planejamento composto central foi possível otimizar as dimensões ótimas obtidas através do trabalho de Costa et al. (2021), sendo possível observar a influência da largura e comprimento da cavidade na intensidade do campo eletromagnético, potência de saída e temperatura final da água. A largura da cavidade apresentou um comportamento linear, com relação as variáveis dependentes, entretanto o coeficiente angular da reta possui um maior valor para a potência de saída e temperatura final, já para o comprimento da cavidade foi obtido um comportamento parabólico, sendo assim, tem-se um ponto obtido no intervalo testado. Portanto analisando as superfícies de resposta é possível verificar que os valores de largura e comprimento ótimas para obter uma maior potência de saída foi de 12,85 cm e 30,5 cm, respectivamente, gerando uma potência teórica de 879,5 W para 1 magnetron. Também vale ressaltar, que foi satisfatório a utilização do erro pela discretização numérica, para verificação da variabilidade através da repetição do ponto central em um planejamento de experimentos, pois com a variação do número de células foi possível alterar os valores de temperatura, intensidade de campo eletromagnético e potência de saída, para a mesma cavidade.

Através da simulação do secador micro-ondas com as dimensões ótimas obtidas no PCC, pode-se concluir que através de diferentes métodos estatísticos foi possível obter uma secador micro-ondas que é possível obter até mesmo 99,9 % de eficiência, sendo que para a pior condição foi obtido uma eficiência igual a 8,9 %. Com isso, é possível concluir que a largura e comprimento da cavidade influenciam diretamente as variáveis de resposta, entretanto o comprimento da guia de onda é irrelevante no processo de secagem.

Também foi realizado a análise da influência do volume de líquido na potência de saída utilizando a cavidade ótima obtida através do PCC, utilizando essa cavidade foi obtido uma menor dependência da potência de saída com o volume de líquido, sendo que a eficiência mínima e máxima foi de 83,5 % a 99,9 %, essas eficiência foram obtidas para os volumes de água iguais a 40 cm³ e 800 cm³, respectivamente. Vale ressaltar que para um melhor controle de temperatura do processo de secagem é recomendado possuir uma cavidade que a potência de saída possui uma baixa ou inexistente influência com o volume de líquido.

Através dos perfis térmicos para a água em diferentes instantes de tempo, foi possível concluir que existem regiões preferenciais de aquecimento do material, sendo que essas regiões preferenciais de aquecimento estão posicionais perpendicularmente ao magnetron, isso ocorre, pois essa é a região do líquido que possui o primeiro

contato com as ondas eletromagnéticas provenientes da mesma, logo o processo de aquecimento é mais intenso nessas regiões.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico-financeiro proporcionado pela FAPEMIG (APQ-00022-18), CNPq (427962/2018-8) e UFPA (PIDEG357-2018) e a licença gentilmente cedida pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) do software *COMSOL Multiphysics 4.4*.

Referências

BALDIM, G.F.; COSTA, F.O.; PETRI, I.J. Previsão dos campos eletromagnéticos em secador micro-ondas via fluidodinâmica computacional, **Revista Brasileira de Iniciação Científica (RBIC)**, v. 8, n.6, 2021. ISSN: 2359-232X.

BARTH, C. **Demonstração da participação do custo logístico de distribuição no custo final de produtos alimentícios**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Contábeis) – Curso de Ciências Contábeis - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

BOX, G.E.P., HUNTER, W.G., HUNTER, J.S. Statistics for Experimenters: *In Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. John Wiley & Sons, New York, 1978.

CONFORTI, E.; KIECKBUSCH, T. G.; MARSAIOLI, A. J. **A prototype 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**, *In press*, 2021.

CUNHA, M. L.; CANTO, M. W.; MARSAIOLI, A. J. Secagem de café cereja descascado por ar quente e micro-ondas. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v, 23, n. 3, p, 381-385, 2013. DOI: 10.1590/S0101-20612003000300015.

FEHER, L.; MANFRED, T. Microwave innovation for industrial composite fabrication - The HEPHAISTOS technology. **IEEE Transactions on Plasma**

Science. v.32, n.1, p.73-79, 2004. DOI: 10.1109/TPS.2004.823983.

JUNQUEIRA, J. R. J.; CORRÊA, G. 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.

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 Micro-ondas**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

PETRI, I. J. **Descontaminação de cascalhos de perfuração utilizando um secador micro-ondas semi-industrial em regime contínuo**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

POZAR, D. M. **Microwave Engineering**. United States: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

ROSSI, A. S.; FARIA, M. G.; PEREIRA, M. S.; ATAÍDE, C. H. Kinetics of microwave heating and drying of drilling fluids and drill cuttings. **Dry. Technol.** v 35, p. 1130–1140, 2017. DOI: 10.1080/07373937.2016.1233425.

SANTOS, J. M.; PETRI, I. J.; MOTA, A. C. S.; MORAIS, A. S.; ATAÍDE, C. H. Optimization of the batch decontamination process of drill cuttings by microwave heating. **J. Petrol. Sci. Eng.** v. 163, p. 349-358, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol. 2018. 01.003.

SHARMA, G. P.; PRASAD, S. Drying of garlic cloves by microwave-hot air combination. **Journal of Food Engineering**. v.50, n.2, p.99-105, 2001. DOI: 10,1016/S0260-8774(00)00200-4.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Rio de Janeiro, LTC, vol. 2, 2009.