



## Simulação numérica do aquecimento ôhmico em amostra estática: Distribuição de temperatura e potencial elétrico

Numerical simulation of ohmic heating in a static sample: Temperature and electric potential distribution

R. F. Mamedio<sup>1\*</sup>; G. L. Ströher<sup>2</sup>; C. D. Santiago<sup>3</sup>; L. S. Pereira<sup>3</sup>; G. R. Ströher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Coordenação de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 86812-460, Apucarana-PR, Brasil

<sup>2</sup>Coordenação de Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 86812-460, Apucarana-PR, Brasil

<sup>3</sup>Departamento de Matemática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 86812-460, Apucarana-PR, Brasil

\*rafaelmamedio@alunos.utfpr.edu.br

(Recebido em 06 de abril de 2025; aceito em 24 de fevereiro de 2026)

O aquecimento ôhmico é uma técnica que se destaca entre os métodos de tratamento térmico de alimentos, pois pode proporcionar um aquecimento homogêneo, de alta eficiência e minimiza a formação de zonas mortas de temperatura do alimento. Esta tecnologia é caracterizada pela geração de energia térmica que ocorre no interior do material quando este apresenta resistência considerável à passagem de corrente elétrica. No presente trabalho, as equações governantes do fenômeno de geração e transferência de calor bem como da distribuição de potencial elétrico, em duas dimensões, são utilizadas para a simulação do aquecimento ôhmico em uma amostra estática. As equações são discretizadas por meio do método de diferenças finitas com aproximações de segunda ordem nas derivadas espaciais. As simulações numéricas foram realizadas em domínio computacional, com malhas ortogonais. Os parâmetros físicos foram obtidos da literatura com características semelhantes à de bifes bovinos com baixo teor de gordura e condutividade elétrica linearmente dependente da temperatura. A solução obtida em estado transitório permitiu a avaliação do aumento da temperatura em função do tempo durante um período previamente determinado. Foi possível identificar as regiões quentes e frias que se formam ao longo do tempo de aplicação do campo elétrico. O método numérico adotado, bem como o código desenvolvido, apresentaram bom desempenho.

Palavras-chave: efeito joule, tratamento térmico, diferenças finitas.

Ohmic heating is a technique that stands out among the heat treatment methods of food, as it can provide homogeneous, highly efficient heating and minimize the formation of dead zones in the food temperature. This technology is characterized by the generation of thermal energy that occurs inside the material when it presents considerable resistance to the passage of electric current. In the present work, the governing equations of the phenomenon of heat generation and transfer, as well as the distribution of electric potential, in two dimensions, are used to simulate ohmic heating in a static sample. The equations are discretized by means of the finite difference method with second-order approximations in the spatial derivatives. The numerical simulations were performed in the computational domain, with orthogonal meshes. The physical parameters were obtained from the literature with characteristics similar to those of low-fat beef steaks and electrical conductivity linearly dependent on temperature. The solution obtained in a transient state allowed the evaluation of the temperature increase as a function of time during a previously determined period. It was possible to identify the hot and cold regions that form over the time of application of the electric field. The numerical method adopted, as well as the code developed, presented good performance.

Keywords: joule effect, heat treatment, finite differences.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria de alimentos busca processos mais eficientes, controláveis e sustentáveis, e que permitam garantir a segurança microbiológica preservando a qualidade do produto final [1]. Metodologias de tratamento térmico convencionais muitas vezes apresentam limitações relacionadas ao desenvolvimento do perfil de temperatura, em que gradientes acentuados aparecem no material. Este fenômeno resulta em aquecimento heterogêneo indesejado, podendo causar danos, prejudicar a estrutura e comprometer a composição nutricional do alimento [2, 3]. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias capazes de promover um aquecimento uniforme tem se tornado prioridade no setor alimentício [4].

O aquecimento ôhmico, também conhecido como aquecimento por efeito Joule, se destaca como uma alternativa promissora aos métodos tradicionais de tratamento térmico. Essa técnica tem como princípio a geração de energia térmica no interior do material por meio da conversão da energia elétrica, à medida que uma corrente elétrica alternada é aplicada, fazendo com que o alimento atue como um resistor elétrico [5, 6]. Além disso, o aquecimento ôhmico proporciona uma geração interna rápida e uniforme, permitindo a redução considerável do tempo de processamento [7]. Estudos recentes indicam que a tecnologia pode ser eficaz na preservação de compostos bioativos, como vitaminas, além de manter características sensoriais e de textura dos alimentos [1, 2, 8].

Apesar de eficaz, o aquecimento ôhmico envolve uma relação complexa de fenômenos físicos acoplados. A distribuição do campo elétrico, a geração de energia interna e a transferência de calor dependem diretamente das propriedades térmicas e elétricas do material, que podem variar com a temperatura [9]. A condutividade elétrica é o parâmetro principal que garante a eficiência do processo, sendo influenciada pela presença de íons livres e pela estrutura do alimento [6, 10]. Dessa forma, a compreensão detalhada desses fenômenos é fundamental para a previsão do comportamento térmico do processo e para a adequação das metodologias de controle operacional.

Embora o interesse pela tecnologia do aquecimento ôhmico tenha crescido nos últimos anos, limitações associadas à compreensão detalhada da distribuição espacial de temperatura e do campo elétrico ainda representam um desafio. Diante deste cenário, a modelagem matemática e a simulação computacional atuam como ferramentas essenciais para analisar o comportamento físico do sistema [4]. Estudos simulados permitem identificar a presença de zonas mortas de temperatura, contribuem no desenvolvimento de metodologias para processamento e reduzem a necessidade de ensaios experimentais [10].

O objetivo do presente trabalho é, a partir de uma amostra estática, realizar simulações computacionais do aquecimento ôhmico utilizando as equações governantes do fenômeno físico, que são a geração e transferência de calor e a distribuição de potencial elétrico, em duas dimensões cartesianas. Um código computacional foi desenvolvido para determinar a distribuição de temperatura e tensão elétrica na amostra.

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA E MÉTODOS NUMÉRICO

Nesta seção, são apresentadas as equações governantes que descrevem o fenômeno de aquecimento ôhmico, considerando a interação entre o potencial elétrico, a condução de calor e a geração de energia térmica em um meio estático. O problema é modelado por um sistema de equações diferenciais parciais dependentes do tempo, não lineares e acopladas, que relacionam a distribuição do potencial elétrico,  $V$ , e a temperatura,  $T$ , em um domínio bidimensional. A condutividade elétrica,  $\sigma(T)$ , é considerada dependente da temperatura, enquanto a geração de calor devido ao efeito Joule é incorporada ao balanço energético. Além disso, são aplicadas condições de contorno mistas para representar as interações físicas nas fronteiras do domínio. Para a resolução numérica desse sistema acoplado, é empregada uma metodologia baseada no Método de Diferenças Finitas (MDF) [11], utilizando malha uniforme e esquemas de aproximação de segunda ordem de acurácia. A abordagem metodológica é detalhada subseqüentemente, em que são descritos os procedimentos de discretização espacial e temporal, bem como a implementação das condições de contorno.

## 2.1 Equações governantes

A equação da conservação da corrente elétrica em um meio anisotrópico ou não homogêneo, frequentemente usada em problemas de condução elétrica em materiais com propriedades dependentes da temperatura [12], é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma(T) \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma(T) \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

em que  $V$  é o potencial elétrico,  $\sigma(T)$  é a condutividade elétrica. A Equação (1) expressa a forma bidimensional da equação da continuidade da corrente elétrica em um meio onde a condutividade depende da temperatura. Ela representa a conservação da corrente elétrica e é derivada da Lei de Ohm generalizada e da equação de continuidade. A condutividade elétrica é obtida com uma equação linear dada por

$$\sigma(T) = BT + C \quad (2)$$

em que as constantes  $B$  e  $C$  variam com o potencial elétrico utilizado. Nos contornos da amostra são aplicadas condições de contornos mistas para o potencial elétrico, Equação (1), que serão detalhadas na Seção 2.2.

A equação da condução de calor bidimensional com geração interna, em regime transiente é dada por:

$$\rho Cp \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{U} \quad (3)$$

em que,  $\rho$  é a massa específica,  $Cp$  é o calor específico,  $k$  é a condutividade térmica,  $T$  é a temperatura. As condições de contorno são do tipo Neumann nos contornos esquerdo e direito e do tipo Robin nos lados inferior e superior, dado por  $-k\partial T/\partial n = h(T_{cc} - T_{\infty})$ .

O termo de geração interna de calor,  $\dot{U}$ , devido ao efeito Joule, é dado pela equação

$$\dot{U} = \eta \left[ \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \sigma(T) \quad (4)$$

em que  $\dot{U}$  é a taxa de geração volumétrica de calor, isto é, energia dissipada por unidade de volume. Não há geração de calor nas paredes, portanto  $\dot{U} = 0$  nos contornos.

A Equação (4) descreve a potência dissipada por unidade de volume devido à passagem de corrente elétrica em um material com condutividade  $\sigma(T)$ . É frequentemente usada em estudos de aquecimento resistivo e na modelagem de problemas de condução térmica acoplados à corrente elétrica, como em dispositivos eletrônicos, materiais condutores e processos eletrotérmicos.

As equações governantes do aquecimento ôhmico, Equações (1) a (4), com as condições de contornos bem definidas, formam um sistema de equações diferenciais parciais não-lineares e acoplados pelo potencial elétrico,  $V$ , temperatura,  $T$ , e geração de energia,  $\dot{U}$ .

## 2.2 Modelo numérico

As equações governantes foram aproximadas com o Método de Diferenças Finitas (MDF) [11] utilizando malha ortogonal. Um esquema completamente implícito foi usado para resolver o problema transiente [13]. Neste esquema o sistema de equações algébricas não linear é aproximado em cada passo de tempo. Nas derivadas espaciais foram usados esquemas de aproximação de segunda ordem de acurácia (CDS-2). Em malhas 2D uniformes nas duas direções com o MDF têm-se  $N_x = N_y = N$ , neste caso  $\Delta x = \Delta y = h$ . Cada ponto da malha é definido por  $x_i = y_i = (i - 1)h$ , onde  $h$  é a distância entre dois pontos consecutivos, dada por  $h = L/(N - 1)$ , em que  $L_x = L_y = L$  é o comprimento do domínio em cada direção coordenada. Em nossas simulações  $L = 0,1 \text{ m}$ .

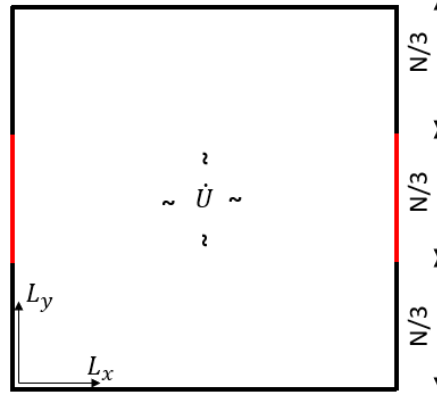


Figura 1: Domínio computacional para  $T$ ,  $\dot{U}$  e  $V$ , com indicação da localização do potencial elétrico ( $V$ ).

Para cada um dos  $N - 1$  pontos interiores ao domínio computacional, Figura 1, considerando o método de diferenças finitas e um esquema completamente implícito no tempo, a discretização resulta em três sistemas de equações algébricas acoplados.

Negligenciando os erros de truncamento, a primeira derivada parcial de  $V$ , Equação (1), na direção  $x$  é aproximada como

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2h} \quad (5)$$

Os valores da condutividade elétrica  $\sigma(T)$ , são avaliados nos pontos intermediários e aproximados por média aritmética simples, portanto, a derivada de segunda ordem em  $x$  resulta em

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma(T) \frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{1}{h_{xy}} \left( \sigma_{i+\frac{1}{2},j} \frac{V_{i+1,j} - V_{i,j}}{h} - \sigma_{i-\frac{1}{2},j} \frac{V_{i,j} - V_{i-1,j}}{h} \right) \quad (6)$$

De maneira análoga, a derivada segunda de  $V$  em relação a  $y$  é

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma(T) \frac{\partial V}{\partial y} \right) = \frac{1}{h_{xy}} \left( \sigma_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j}}{h} - \sigma_{i,j-\frac{1}{2}} \frac{V_{i,j} - V_{i,j-1}}{h} \right) \quad (7)$$

em que:  $\sigma_{i+\frac{1}{2},j} = (\sigma_{i,j} + \sigma_{i+1,j})/2$ ,  $\sigma_{i-\frac{1}{2},j} = (\sigma_{i,j} + \sigma_{i-1,j})/2$ ,  $\sigma_{i,j+\frac{1}{2}} = (\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j+1})/2$  e  $\sigma_{i,j-\frac{1}{2}} = (\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j-1})/2$ .

Substituindo as Equações (6) e (7) na Equação (1), tem-se

$$\frac{1}{h} \left( \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i+1,j}}{2} \frac{V_{i+1,j} - V_{i,j}}{h} - \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i-1,j}}{2} \frac{V_{i,j} - V_{i-1,j}}{h} \right) + \frac{1}{h} \left( \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j+1}}{2} \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j}}{h} - \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j-1}}{2} \frac{V_{i,j} - V_{i,j-1}}{h} \right) = 0 \quad (8)$$

Rearranjando os termos e identificando os coeficientes, obtém-se

$$\begin{aligned} Ae &= \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i+1,j}}{2h^2} & Aw &= \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i-1,j}}{2h^2} \\ An &= \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j+1}}{2h^2} & As &= \frac{\sigma_{i,j} + \sigma_{i,j-1}}{2h^2} \\ Ap &= Ae + Aw + An + As \end{aligned}$$

A equação geral discretizada tem a forma

$$ApV_{i,j} = AeV_{i+1,j} + AwV_{i-1,j} + AnV_{i,j+1} + AsV_{i,j-1} + bp \quad (9)$$

Como não há termo fonte explícito na Equação (1), o termo fonte da equação discreta para os pontos internos é zero,  $bp = 0$ .

As condições de contornos são dadas da seguinte forma: No contorno esquerdo,  $\forall y \in (N/3, 2N/3)$ ,  $V = 0$  e  $\partial V/\partial n = 0$  fora do intervalo. No contorno direito  $\forall y \in (N/3, 2N/3)$ ,  $V = 35v$  e  $\partial V/\partial n = 0$  fora do intervalo. Nos contornos superior e inferior,  $\partial V/\partial n = 0$ , pertencente a  $[0, L_x]$ , conforme ilustra a Figura 1.

A derivada temporal da Equação (3) foi aproximada com um esquema completamente implícito, [13], que resulta em

$$\rho Cp \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^n}{dt} = k \left( \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i-1,j}^{n+1}}{h^2} \right) + k \left( \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{h^2} \right) + \dot{U}_{i,j} \quad (10)$$

Rearranjando os termos para obter os coeficientes da equação geral discretizada, tem-se

$$Ae = Aw = An = As = \frac{kdt}{\rho Cp h^2}; Ap = 1 + \frac{4kdt}{\rho Cph} \text{ e } bp = T_{i,j}^n + \frac{U_{i,j}dt}{\rho Cp}$$

A equação do processo iterativo se torna

$$ApT_{i,j}^{n+1} = AeT_{i+1,j}^{n+1} + AwT_{i-1,j}^{n+1} + AnT_{i,j+1}^{n+1} + AsT_{i,j-1}^{n+1} + bp \quad (11)$$

A geração da energia interna, Equação (4), é obtida com a aproximação dos gradientes do potencial, isto é

$$\dot{U}_{i,j} = \eta \left[ \left( \frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2h} \right)^2 + \left( \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j-1}}{2h} \right)^2 \right] \sigma_{ij} \quad (12)$$

As Equações (9), (10) e (12) são válidas para os pontos internos do domínio de cálculo. O domínio computacional para as equações discretas está mostrado na Figura 1.

Os sistemas de equações algébricos foram resolvidos com o método iterativo de Gauss Seidel com critério de parada baseado no resíduo. Os três sistemas de equações foram resolvidos dentro de um ciclo iterativo até ser interrompido com o  $\max(|T_{it} - T_{it-1}|) < 10^{-5}$  e atingir o tempo físico estabelecido em 1000 segundos, em que  $it$  é a iteração. A geração de energia interna,  $\dot{U}$ , foi atualizada logo após a atualização do potencial elétrico,  $V$ . A condutividade elétrica,  $\sigma(T)$ , foi atualizada com a Equação 2 durante o processo iterativo após a atualização da temperatura.

As propriedades físicas utilizadas nas simulações numéricas foram obtidas em [14] e estão resumidas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades físicas da amostra com baixo teor de gorduras.

| Propriedade  | Unidade            | Símbolo | Valor  |
|--|--------------------|---------|--------|
| Condutividade térmica                                | $W m^{-1}K^{-1}$   | $k$     | 0,51   |
| Coefficiente de transferência de calor por convecção | $W m^{-2}K^{-1}$   | $h$     | 4,4    |
| Coefficiente angular da condutividade elétrica       | $S m^{-1}K^{-1}$   | $B$     | 0,0118 |
| Coefficiente linear da condutividade elétrica        | $S m^{-1}$         | $C$     | 0,488  |
| Massa específica                                     | $kg m^{-3}$        | $\rho$  | 1070   |
| Calor específico                                     | $J kg^{-1} K^{-1}$ | $Cp$    | 3411   |
| Eficiência de geração de calor                       | %                  | $\eta$  | 0,85   |
| Dimensões  | $m$                | $L$     | 0,1    |

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O código computacional foi desenvolvido em Fortran 2013, utilizando aritmética de dupla precisão e compilado com o Visual Studio Community 2022. As simulações foram executadas em um computador equipado com processador Intel Core i7-9700, 3,00 GHz, e 24 GB de memória RAM.

Nas simulações foram adotadas temperatura inicial e do ar ambiente em 25°C. O estudo foi conduzido com voltagem de 35V conforme definido na seção anterior nas condições de contorno da amostra. Na Figura 2 estão mostradas a distribuição de temperatura Figura 2a, potencial elétrico, Figura 2b, condutividade elétrica, Figura 2c, e geração de energia interna, Figura 2d, após 1000 s.

Observa-se na Figura 2a que zonas de maior temperatura se formam nas regiões próxima de onde estão posicionados os eletrodos, como esperado. Na Figura 2b observa-se que a geração de energia interna é mais intensa onde a variação do potencial elétrico é significativa. A Figura 2c mostra que as áreas próximas às laterais do domínio apresentam os maiores valores de condutividade elétrica, mostrando que nessas regiões o material conduz melhor a corrente elétrica. Na comparação com a geração de energia interna observa-se que os pontos de maior geração de calor coincidem com áreas de condutividade elétrica elevada, sugerindo que a corrente elétrica se concentra nessas regiões, resultando em maior efeito Joule.

A Figura 2d mostra regiões com diferentes intensidades de geração de energia interna. Os valores mais altos indicam áreas onde ocorre maior dissipação de energia elétrica em calor, ou seja, apresentam picos de geração de energia, enquanto as regiões centrais apresentam valores menores.

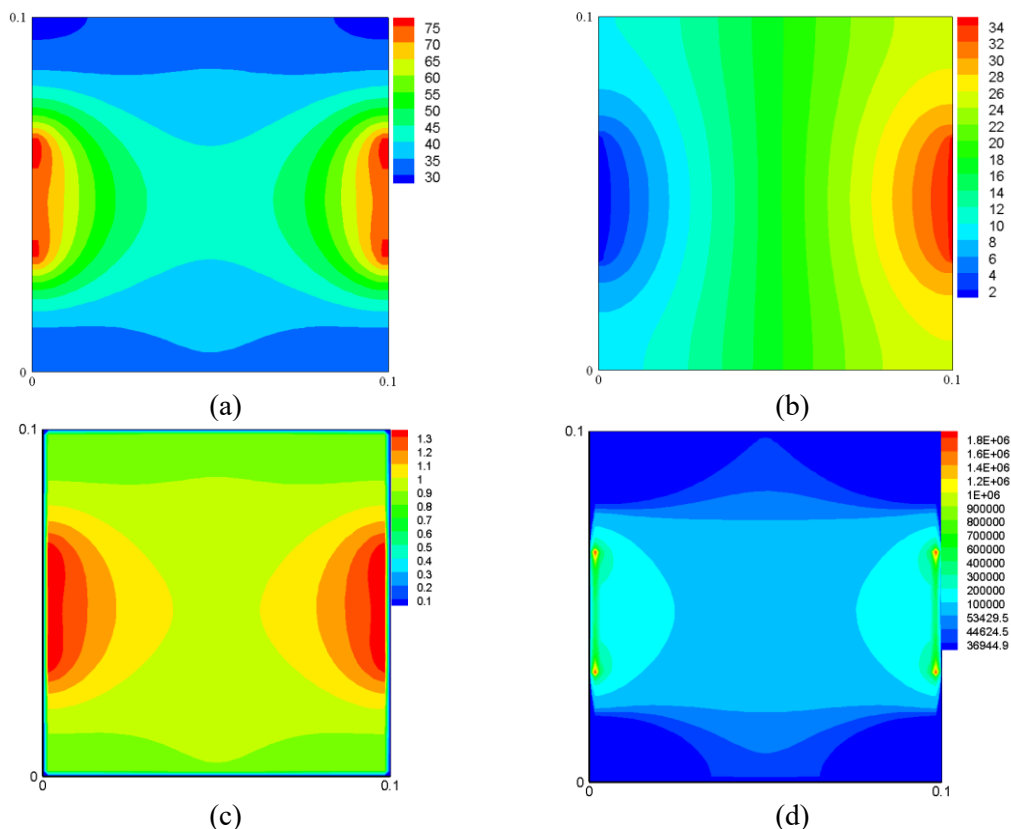


Figura 2: Distribuição de (a) Temperatura (°C), (b) Potencial Elétrico (V), (c) Condutividade elétrica (S/m) e (d) Geração de energia interna ( $W/m^3$ ).

Na Figura 3 são mostradas a condutividade elétrica, Figura 3a, geração de energia Figura 3b, elevação da temperatura, Figura 3c, e do potencial elétrico, Figura 3d em função do tempo em

diferentes pontos do domínio computacional. Os resultados das simulações mostradas na Figura 3 indicam como cada variável, se comportam em diferentes pontos da amostra ao longo do tempo a medida em que se distanciam dos eletrodos. Os pontos (0,025; 0,05) e (0,075; 0,05) que estão mais próximos dos eletrodos apresentam a maior condutividade elétrica e geração de energia, Figuras 3a e 3b, provendo um gradiente de tensão elétrica maior nessa região da amostra. Comportamento semelhante ocorre com o ponto central (0,05; 0,05), apresentando menor condutividade elétrica e geração de energia, devido a diferenças nas propriedades elétricas locais e a distribuição de tensão mais uniforme. A tendência crescente e o comportamento regular ao longo do tempo são característicos de um processo de aquecimento ôhmico bem controlado, onde o campo elétrico é aplicado de maneira constante.

A Figura 3c apresenta a variação da temperatura em função do tempo para os pontos analisados. Observa-se que o aumento de temperatura apresenta um comportamento quase linear em todos os pontos, com uma elevação mais acentuada no ponto (0,1; 0,05). Esse comportamento está diretamente relacionado à maior geração de energia localizada nessa região, conforme evidenciado pelos resultados anteriores. Os demais pontos exibiram incrementos de temperatura mais suaves e espacialmente simétricos, condizentes com a simetria geométrica e térmica intrínseca ao problema estudado. Essa distribuição uniforme e simétrica das temperaturas ao longo do domínio analisado reforça a consistência do modelo utilizado, indicando que o código implementado provê resultados que estão de acordo com as premissas teóricas e as características físicas do sistema. O comportamento linear do aumento da temperatura sugere que o modelo empregado nas simulações representa adequadamente o processo de transferência de calor por condução e a aplicação constante do campo elétrico.

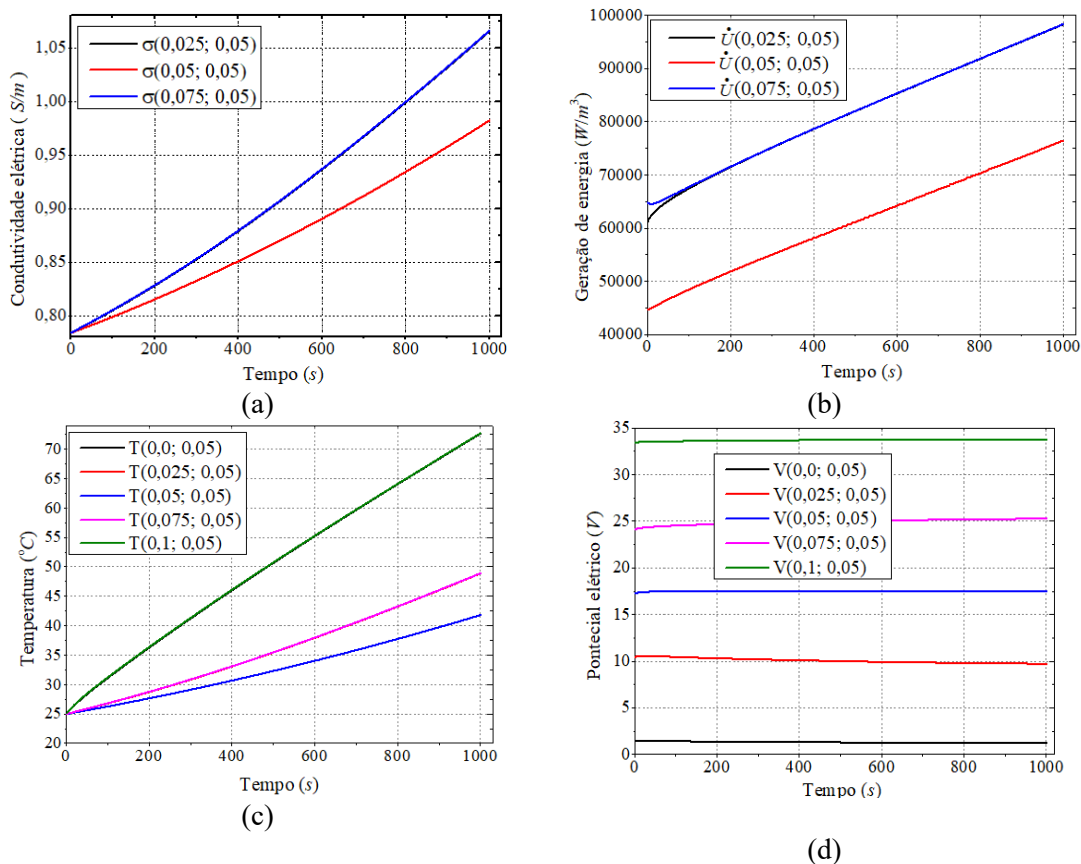


Figura 3: Representação da (a) Condutividade Elétrica, (b) Geração de Energia Interna, (c) Temperatura e (d) Potencial Elétrico.

A Figura 3d mostra evolução do potencial elétrico nos pontos selecionados. Observa-se que os valores do potencial estabilizam rapidamente e permanecem praticamente constantes ao longo do tempo. Isso sugere que o campo elétrico aplicado e as condições de condução elétrica estão bem definidos desde os instantes iniciais da simulação. Isso ocorre porque o potencial depende da condutividade elétrica, que, por sua vez, é influenciada pela temperatura, a qual evolui com o tempo. Isso sugere que o campo elétrico aplicado e as condições de condução elétrica são bem estabelecidos desde os instantes iniciais da simulação. É válido comentar que apesar do modelo matemático do potencial elétrico, Equação (1), não apresentar explicitamente a variável tempo, as Equações (1) a (4) são acopladas e, portanto, geram dependências entre todas as variáveis de campo.

Os resultados obtidos refletem o comportamento esperado para sistemas de aquecimento ôhmico e, qualitativamente são semelhantes aos demonstrados por De Alwis e Fryer (1990) [12]. A variação de temperatura e energia gerada em diferentes pontos ao longo da amostra evidencia a influência do quão distante está dos eletrodos e das propriedades elétricas e térmicas locais sobre o processo de aquecimento.

#### 4. CONCLUSÃO

O estudo abordou a simulação computacional do aquecimento ôhmico em uma amostra estática para resolver as equações governantes que modelam a geração e transferência de calor, bem como a distribuição de potencial elétrico. As equações governantes foram discretizadas em um domínio bidimensional com o método de diferenças finitas e aproximações de segunda ordem nas derivadas espaciais. As simulações numéricas foram realizadas em malhas ortogonais. Os resultados mostraram que a abordagem adotada proporcionou bom desempenho do modelo numérico e do código computacional desenvolvido, permitindo a avaliação da evolução da distribuição de temperatura, campo elétrico e efeito joule ao longo do tempo de aquecimento, com potencial para fornecer resultados numéricos para a literatura.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sain M, Sharma A, Kaur S, Singh R. Effect of ohmic heating on food products: An in-depth review approach associated with quality attributes. *J Food Process Preserv.* 2024 Jan;48(1):e2025937. doi: 10.1155/2024/2025937
2. Dos Santos IF, Ribeiro APB, Cunha RL, Christiani LF. Ohmic heating in food processing: an overview of plant-based protein modification. *Processes.* 2024 Sep;12(9):1800. doi: 10.3390/pr12091800
3. Silva R, Ferreira DC, Guimarães JT, Balthazar CF, Cruz AG. What are the challenges for ohmic heating in the food industry? Insights of a bibliometric analysis. *Food Res Int.* 2022 Nov;157:111272. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111272
4. Doan NK, Lai DQ, Le TKP. Ohmic heating: its current and future application in juice processing. *Food Rev Int.* 2023 Sep;39(9):6908-33. doi: 10.1080/87559129.2022.2126855
5. Castro-Campos FG, Lannes SCS, Augusto PED. High amylose starch thermally processed by ohmic heating: Electrical, thermal, and microstructural characterization. *Innov Food Sci Emerg Technol.* 2023 Jul;87:103417. doi: 10.1016/j.ifset.2023.103417
6. Shao L, Zhao Y, Zou B, Li X, Dai R. Ohmic heating in fruit and vegetable processing: Quality characteristics, enzyme inactivation, challenges and prospective. *Trends Food Sci Technol.* 2021 Dec;118:601-16. doi: 10.1016/j.tifs.2021.10.009
7. Gavahian M, Farahnaky A, Sastry SK, Shrestha L. Roles of ohmic heating to achieve sustainable development goals in the food industry: From reduced energy consumption and resource optimization to innovative production pathways with reduced carbon footprint. *Trends Food Sci Technol.* 2025 Jan;159:104947. doi: 10.1016/j.tifs.2025.104947
8. Giuliangeli VC, Ströher GR, Shirai MA. Comparison of energy consumption, color, ascorbic acid and carotenoid degradation in guava (*Psidium guajava*) pulp during conventional and

- ohmic heating. *J Food Science and Technology*. 2023;60(1):222-32. doi: 10.1007/s13197-022-05607-w
9. Javed T, Oluwole-ojo O, Zhang H, Akmal M, Breikin T, O'Brien A. System design, modelling, energy analysis, and industrial applications of ohmic heating technology. *Food Bioprocess Technol*. 2025;18(3):2195-217. doi: 10.1007/s11947-024-03568-w
  10. Astráin-Redín L, Raso J, Cebrián G. Ohmic heating technology for food applications, from ohmic systems to moderate electric fields and pulsed electric fields. *Food Eng Rev*. 2024 Jun;16(2):225-51. doi: 10.1007/s12393-024-09368-4
  11. Tannehill JC, Anderson DA, Pletcher RH. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. 2. ed. Washington (US): Taylor & Francis; 1997.
  12. De Alwis AAP, Fryer PJ. A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. *Chem Eng Sci*. 1990;45(6):1547-59. doi: 10.1016/0009-2509(90)80006-Z
  13. Patankar SV. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Boca Raton: CRC Press; 1980. (Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences).
  14. Icier F, Ilicali C. The use of tylose as a food analog in ohmic heating studies. *J Food Eng*. 2005;69(1):67-77. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2004.07.011