

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO RESFRIAMENTO DE BANANA

João Damasceno Xavier Neto (UFOB) E-mail: [joaodamascenoxn@gmail.com](mailto:joaodamascenoxn@gmail.com)

Nilson Amaral Oliveira Filho (UFOB) E-mail: [nilsonamaraljr@gmail.com](mailto:nilsonamaraljr@gmail.com)

Ana Carolina Bomfim (UFOB) E-mail: [carolinabomfim15@gmail.com](mailto:carolinabomfim15@gmail.com)

Luiz Justino da Silva Junior (UFOB) E-mail: [luizjustinosj@gmail.com](mailto:luizjustinosj@gmail.com)

**Resumo:** Nesta pesquisa propôs-se simulação das condições de resfriamento convectivo de banana, utilizando a versão estudantil do *software Ansys workbench*. Devido à simetria do fruto utilizou-se uma superfície bidimensional para representá-lo possuindo como condições de contorno convecção na superfície externa e perímetro adiabático na superfície interna. Entre as malhas disponíveis no *software*, utilizou-se a malha triangular devido ao seu menor quantitativo de elementos o que reduz o esforço computacional e a regular convergência dos resultados com as outras variedades. Relacionou-se o tempo de resfriamento com o coeficiente convectivo, para obtenção de uma temperatura média de 14 °C no fruto, a fim de avaliar sua relação. Ocorreu grande redução do tempo para valores de coeficiente convectivo de até 100 W/m<sup>2</sup>.k, após este valor alterações no coeficiente não resultaram em significativa redução do tempo. Analisou-se o campo de temperaturas, ao longo do tempo, no interior do fruto o que revelou que a extremidade do eixo maior é um ponto crítico de resfriamento, pois estão localizados nessa região os maiores gradientes.

**Palavras-chave:** Banana, Refrigeração, Simulação Computacional.

## MODELING AND COMPUTATIONAL SIMULATION OF BANANA COOLING

**Abstract:** This research has proposed the conditions of convective cooling of banana, using the student version of the software *Ansys workbench*. Due to symmetry of the fruit, a two-dimensional surface was used to represent the boundary condition of the convection on the outer surface and the adiabatic perimeter on the inner surface. Among the meshes available on the software, it was employed a triangular mesh because of its smaller number of elements that reduce the computational effort and the regular convergence of the results with the other varieties. The cooling time was compared with the convective coefficient, to obtain an average temperature of 14 °C on the fruit, in order to evaluate its relation. There was great reduction of the time for convective coefficient values up to 100 W/m<sup>2</sup>.k, after this value changes on the coefficient did not result in a significant reduction of time. The temperature field was analyzed, over the time, inside the fruit which was revealed that the tip of larger axis is a critical point of cooling, because the highest gradients are located in this region.

**Keywords:** Banana, Refrigeration, Computational Simulation.

### 1. Introdução

A fruticultura brasileira tem potencial para produzir e exportar frutas ao longo de todo o ano (KIST, 2018) O País foi o terceiro maior produtor mundial de banana com uma produção de 6.675,100 toneladas em uma área 465,434 hectares no ano de 2017 (FAOSTAT, 2017). A cidade de Bom Jesus da Lapa localizada no oeste baiano tem se destacado na produção do fruto. No ano de 2016 contribuiu com 2, 38% em participação no total da produção nacional produzindo 160 000 toneladas de banana em uma área de 8500 hectares (IBGE, 2016).

A banana pode ser consumida *in natura* ou processada, a polpa pode ser aproveitada para a produção de farinhas, purês, sorvetes e doces, ou ainda consumida crua. Sua casca pode ser aplicada para enriquecer alimentos consumidos pelo ser humano quando processada, serve

ainda como alimentos para animais e até mesmo transformada em biocombustível (AMORIM, 2016).

Doenças causadas por patógenos prejudicam a qualidade e limitam a exportação do fruto brasileiro (COELHO *et al.*, 2009), além disso perdas significativas, qualitativas e quantitativas, ocorrem durante as etapas do processo produtivo da banana, no que se refere a colheita, armazenamento, distribuição e venda. Dentre os agentes responsáveis pelos danos está a falta de refrigeração no armazenamento após a colheita (TERUEL *et al.*, 2002).

Após a colheita a banana sofre alterações bioquímicas em sua composição o que afeta seu amadurecimento, resultado da respiração do fruto. Um dos principais fatores é a conversão do amido em açúcares simples que causa mudanças significativas no amadurecimento do fruto. Isso dificulta o transporte do fruto para regiões distantes, fazendo necessário a aplicação de técnicas para evitar o amadurecimento rápido e o escurecimento da casca. A aceitação do fruto pelo consumidor é influenciada pela aparência externa, sabor, aroma e textura ao paladar. A taxa de respiração do fruto pode ser reduzida de 2 a 4 vezes com o armazenamento do fruto a temperatura apropriadas. O armazenamento ideal confere uma lenta deterioração do fruto, além de evitar o escurecimento da casca, da polpa e a perda de sabor (BRACKMANN *et al.*, 2006; VIVIANE E LEAL, 2007).

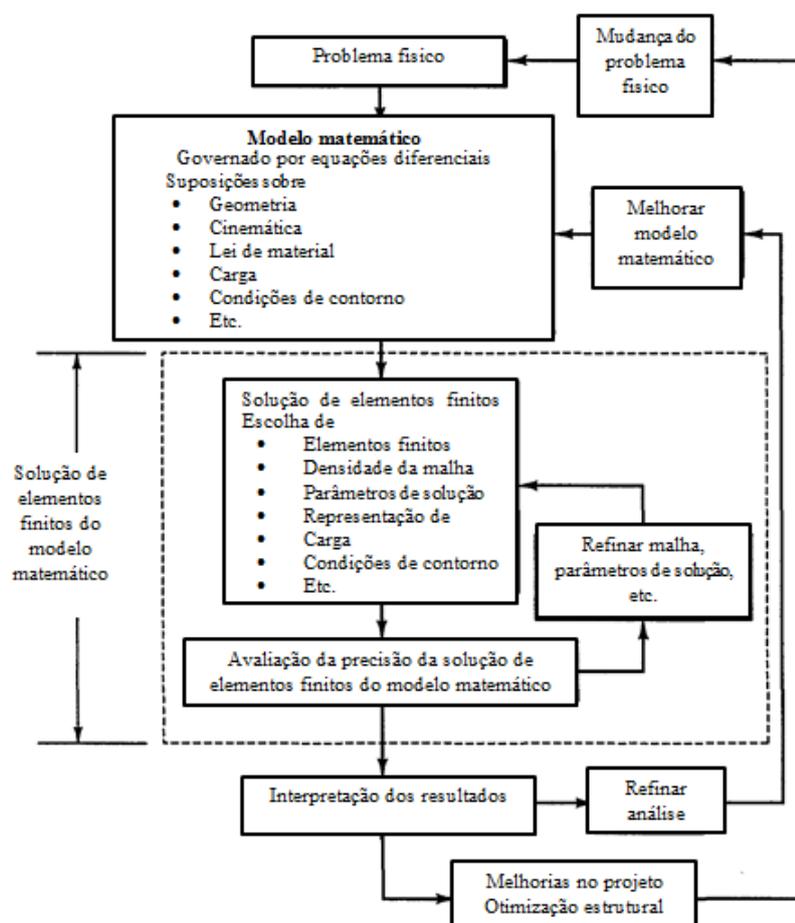
Para reduzir os problemas com perdas se faz necessário a implementação de uma Cadeia do Frio (CF) apropriada para garantir a qualidade do produto, dentre os elementos fundamentais do sistema CF estão as câmaras e sistemas de resfriamento rápido e estocagem e os meios de transporte com câmaras de refrigeração, com relação aos métodos de resfriamento se destacam os sistemas com resfriamento com ar forçado e com água gelada (TERUEL *et al.*, 2003).

Desta forma, propõe-se com este trabalho modelar e simular computacionalmente com a versão *Student* do *Software Ansys Workbench* as condições de transferência de calor em bananas a fim de analisar o comportamento do modelo sob refrigeração por convecção forçada.

## **2. Fundamentação Teórica**

### **2.1 Método dos Elementos Finitos**

De acordo com Bathe (1996), o método de elementos finitos (MEF) é usado para resolver problemas físicos em análise de engenharia e projetos. Ainda segundo Bathe (1996), por conta da técnica de solução de elementos finitos ser um procedimento numérico, é necessário acessar a precisão da solução. Se o critério de precisão não é encontrado, a solução numérica tem que ser repetida com parâmetros de solução refinada (como uma malha mais fina, por exemplo) até uma suficiente precisão ser alcançada. A Figura 1 resume o processo de análise de elementos finitos.



**Figura 1:** Processo de análise de elementos finitos.

Fonte: Bathe adaptado (1996).

Segundo Hoffman (1992), o MEF envolve a obtenção de solução aproximada para a resolução de equações diferenciais parciais, utilizando uma combinação linear de funções específicas, que são tipicamente polinomiais. Conforme Narasaiah (2008), no MEF, modelo físico é substituído por um modelo adequadamente simplificado sob hipóteses e critérios precisos, identificado por um número finito de elementos conectado em pontos comuns chamados nós, com um comportamento assumido ou resposta de cada elemento para um conjunto de cargas aplicadas, de forma a avaliar o campo de variáveis desconhecidas (deslocamento, temperatura, por exemplo) nesse número finito de pontos. A integração das soluções nodais, das variáveis do problema, compõe a solução global.

De acordo com Fish e Belytschko (2009), o MEF provê uma metodologia sistemática com a qual a solução pode ser determinada por meio de um programa de computador. Para problemas lineares, a solução é determinada pela resolução de um sistema de equações lineares; o número de incógnitas é igual ao número de graus de liberdade. Conforme Fish e Belytschko (2009), para obter uma solução razoavelmente exata, milhares de nós são geralmente necessários, assim os computadores são essenciais para resolver essas equações. Geralmente, a exatidão da solução melhora com o aumento do número de elementos (e nós), mas o tempo computacional e, em consequência o custo, também aumentam. Uma forma de reduzir o custo computacional é elevar o grau dos polinômios, ou a ordem das funções, que representam numericamente as variáveis incógnitas nodais em cada elemento finito, em toda a região, ou domínio, de solução do problema sob análise.

## 2.2 Equações Governantes

A convecção pode ser entendida como um fenômeno complexo por envolver efeitos combinados de difusão e advecção, entretanto a transferência de calor por este modo é proporcional a diferença de temperatura e pode ser expressa como ilustra a Equação 1, conhecida como lei de Newton do Resfriamento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; INCROPERA; DEWITT, 2017).

$$\dot{Q}_{con} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Onde  $\dot{Q}_{con}$  é a taxa de transferência de calor,  $A_s$  é a área de contato com o fluido do ambiente externo, enquanto que  $T_s$  e  $T_\infty$  são as temperaturas da superfície e do ambiente externo respectivamente. O termo  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção e é uma função de diversas propriedades do fluido como densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico além de dependerem da geometria da superfície e das condições de escoamento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Com relação ao transporte de energia térmica por condução a equação diferencial que governa este fenômeno é a equação do calor e em coordenadas cartesianas pode ser escrita conforme a Equação 2.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Onde x, y e z são as coordenadas retangulares (m), k é a condutividade térmica (W/mK), T é temperatura (K),  $\dot{q}$  é a taxa de geração de energia por unidade de volume (W/m<sup>3</sup>),  $\rho$  é a densidade (kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$  é o calor específico a pressão constante (J/kgK) e t é tempo (s). As parcelas de derivadas segundas com relação as coordenadas longitudinais estão relacionadas ao fluxo líquido de calor por condução para o interior do volume de controle. O  $\dot{q}$  é a taxa volumétrica de geração de calor e  $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$  é a taxa de de variação da energia térmica acumulada no interior do mesmo volume (INCROPERA; DEWITT, 2017).

## 3. Materiais e Métodos

Para realizar a simulação utilizou-se do *Software Ansys Workbench* na versão *Student* disponibilizada gratuitamente.

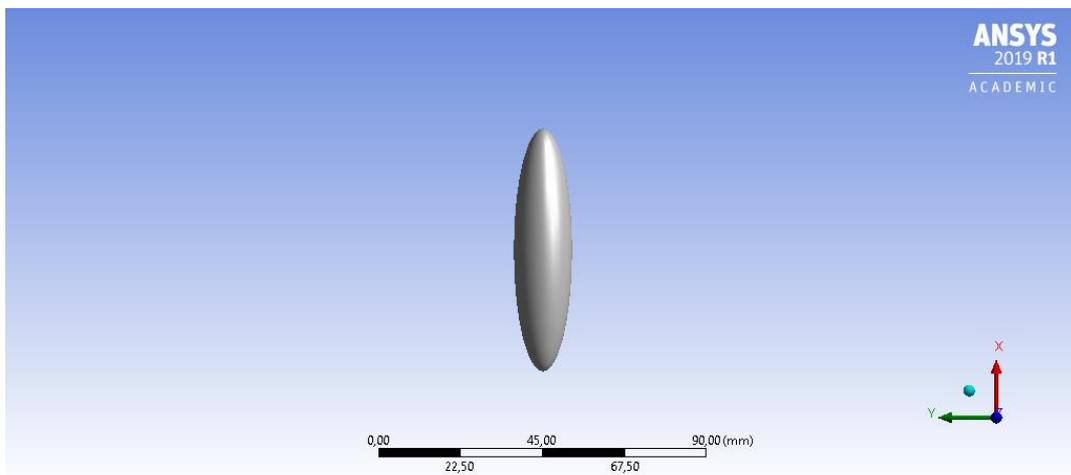
### 3.1 Setup Computacional

Utilizou-se o laboratório de informática do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB. As simulações foram realizadas em um computador com sistema operacional Windows de 64 bits, processador Intel Core i5-6500 de 3.20 GHz e memória RAM de 8 GB.

### 3.2 Geometria e Malha

Para o desenvolvimento da geometria da banana no *Software* utilizou-se como aproximação de sua curvatura um esferóide prolato, seguindo a metodologia de Amorim (2016). O

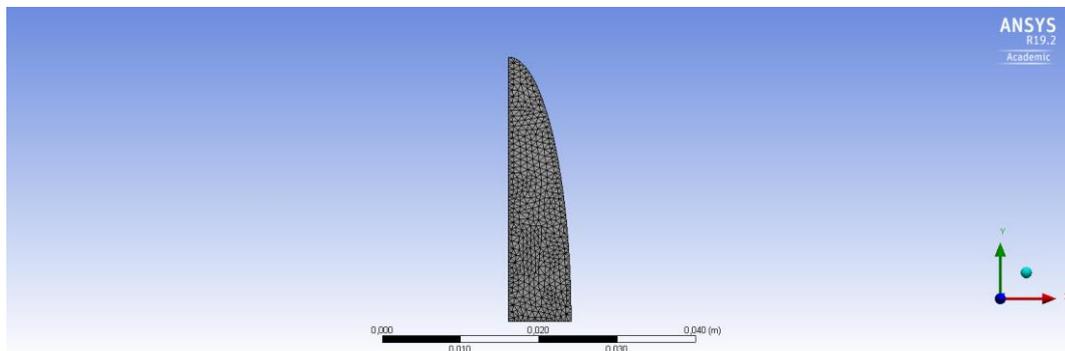
esferóide prolato consiste em uma rotação de uma elipse ao redor do seu eixo maior obtendo assim um elipsoide de revolução, como ilustra a Figura 2.



**Figura 2** - Banana 3D.

Fonte: Elaborado pelos autores.

No presente trabalho simplificou-se a geometria visando reduzir o tempo computacional na obtenção dos resultados, observando uma simetria no modelo analisado, desta forma optou-se por utilizar uma geometria bidimensional correspondente a  $\frac{1}{4}$  de elipse, conforme representado na Figura 3. As dimensões utilizadas foram de 16 mm no eixo X e 67,25 mm entorno do eixo Y, de acordo com Amorim (2016).



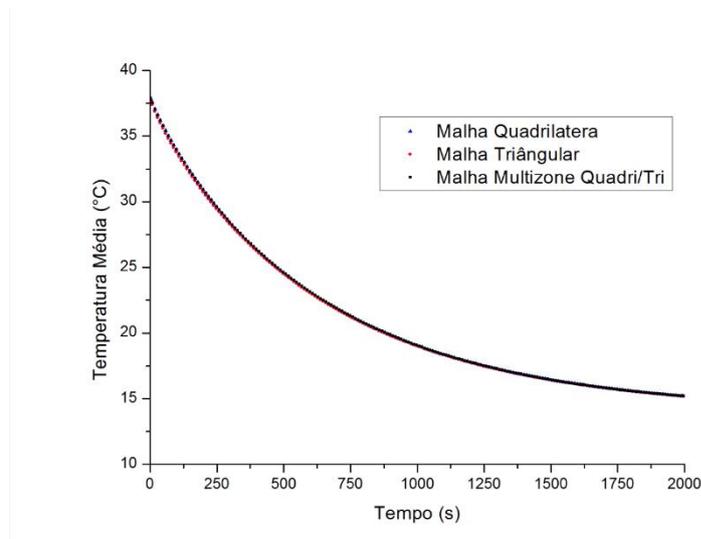
**Figura 3:** Geometria de estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para validação dos resultados buscou-se analisar três malhas distintas, verificando assim a que convergia melhor e mais rápido. Na primeira malha escolheu uma discretização quadrática, por meio do método *Quadrilateral dominant*, que gerou um total de 1347 elementos e 4232 nós. A segunda malha foi gerada pelo método *Triangles*, que produziu uma discretização triangular com 943 elementos e 2082 nós. Por fim gerou-se a terceira malha através do método *MultiZone Qua/Tri* acarretando em um total de 1316 elementos e 4145 nós. Em todas as análises alterou-se apenas o parâmetro Use Adaptive Sizing, mantendo os demais inalterados.

A critério de comparação gerou-se um gráfico relacionando a temperatura média com o tempo de resfriamento até a temperatura de 13° C para os três métodos. A Figura 4 representa os resultados obtidos. Como é notável, para os três métodos utilizados a variação obtida foi

aproximadamente nula. Com isso pode-se subter que as três malhas resultariam em valores próximos.



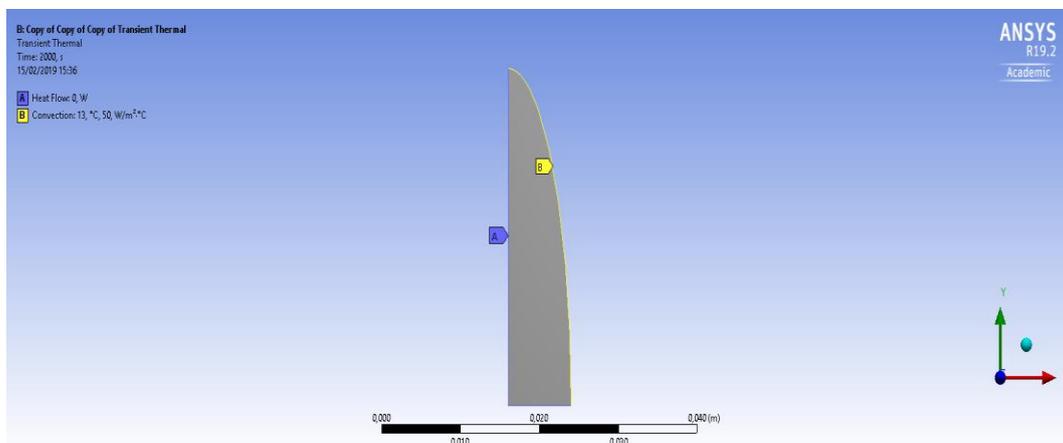
**Figura 4:** Gráfico de convergência de malha.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir disso, escolheu-se um dos métodos para ser utilizado no presente trabalho. Considerando a proximidade das malhas, optou-se por escolher a malha triangular, ilustrada na Figura 1, devido ao seu menor número de nós e elementos que resultaria em um reduzido número de equações e consequentemente baixo tempo de processamento.

### 3.3 Condições de contorno

Para a solução numérica da equação da energia através dos métodos finitos, se fez necessário a utilização das seguintes condições de contorno: (A) devido a simetria do fruto a superfícies internas são tratadas como adiabáticas, visto que o gradiente de temperatura nas respectivas superfícies é nulo e (B) para a superfície externa do fruto ocorre transferência de calor somente por convecção, o coeficiente de película foi tratado como uma variável do problema alterando sua magnitude desde coeficientes relativos a convecção natural até forçada. A Figura 5 ilustra as condições de contorno supracitadas.



**Figura 5:** Condições de contorno.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para que o modelo utilizado se aproxime das condições reais se faz necessário utilizar as propriedades adequadas para o material estudado. As propriedades termofísicas do fruto utilizadas na simulação foram obtidos na literatura, as condições iniciais buscam retratar as condições climáticas da cidade de Bom Jesus da Lapa – BA, situado no interior do estado, que se destaca pela grande produção anual de banana.

**Tabela 1:** Dados para a Simulação

Dados	Valor	Fonte
Calor específico	3,56 kJ/kg·K	Ashrae (2006)
Concentração	20° Brix	Dias e Barreto (2011)
Condutividade térmica	0,328 W/m·K	Silva <i>et al.</i> (2018)
Temperatura no refrigerador	13°C	Dossat (2004)
Temperatura inicial do fruto	38°C	Autor

Fonte: Elaborado pelos autores

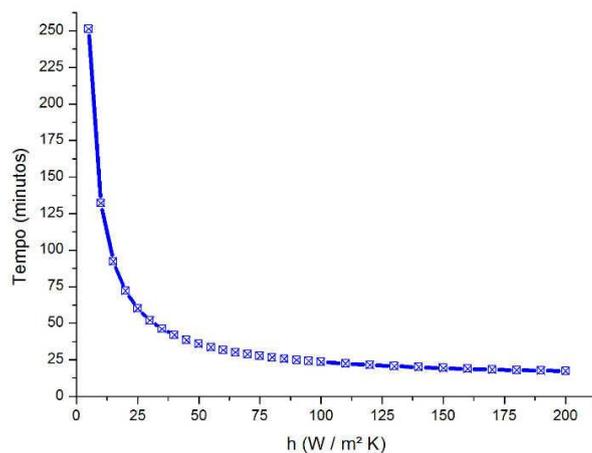
**Tabela 2:** Densidade da Banana, para 20 °Brix.

Temperatura °C	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
5	1083,42
10	1074,87
15	1067,82
20	1065,27
25	1053,22
30	1051,17
40	1032,07
50	1017,97
60	1009,87
70	996,77
75	982,72
80	985,67

Fonte: Adaptado de Tsen e King (2002)

#### 4. Resultados

Após definida a malha e as condições de contorno, iniciou-se a simulação com um coeficiente de película igual a 5 W/m<sup>2</sup>·k uma aproximação do coeficiente de convecção natural de Silva (2018) que é de 4,93 W/m<sup>2</sup>·k. Em seguida variou-se o coeficiente convectivo a cada 5 W/m<sup>2</sup>·k até 100 W/m<sup>2</sup>·k e a partir disso aumentou-se o intervalo para 10 W/m<sup>2</sup>·k até um valor final de 200 W/m<sup>2</sup>·k. Cada simulação foi avaliada o tempo necessário em minutos para que a temperatura média do fruto chegasse a 14° C. O resultado está ilustrado na Figura 6.

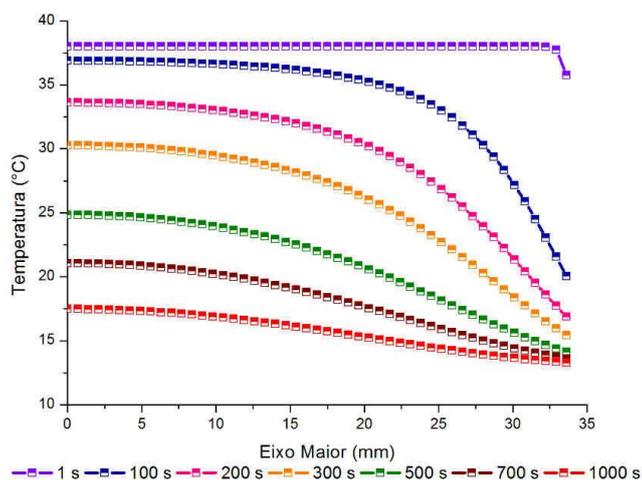


**Figura 6:** Gráfico de tempo de resfriamento.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Como observado quando se aumenta o valor do coeficiente de película diminui o intervalo de tempo para o resfriamento do fruto, a diferença entre o tempo de resfriamento da convecção natural para a forçada com o coeficiente de convecção de 100 W/m².k é 10,7 vezes menor revelando a importância da aplicação da convecção forçada para a economia de tempo, além disso duplicando o coeficiente convectivo reduz-se o tempo de resfriamento em apenas 26,3%, o que indica um limiar para a redução do tempo de resfriamento a partir do aumento do coeficiente convectivo.

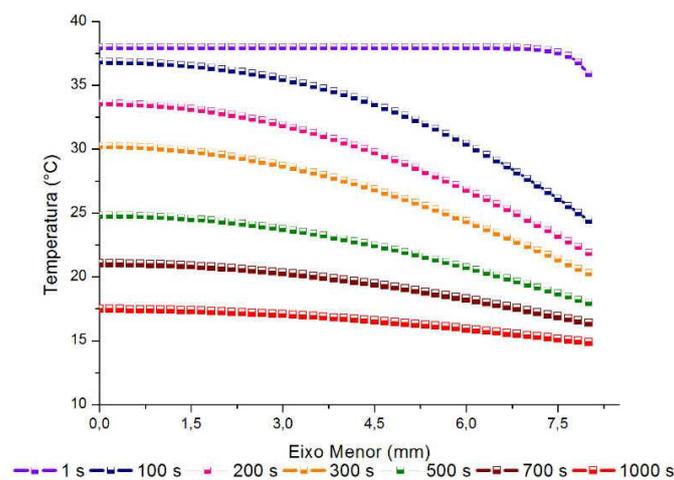
Para avaliar a variação do campo de temperatura plotou-se a temperatura em função do maior e menor eixo da elipse que representa a seção do fruto, como ilustram as Figuras 6 e 7.



**Figura 7:** Campo de temperatura no eixo maior.

Fonte: Elaborado pelos autores.

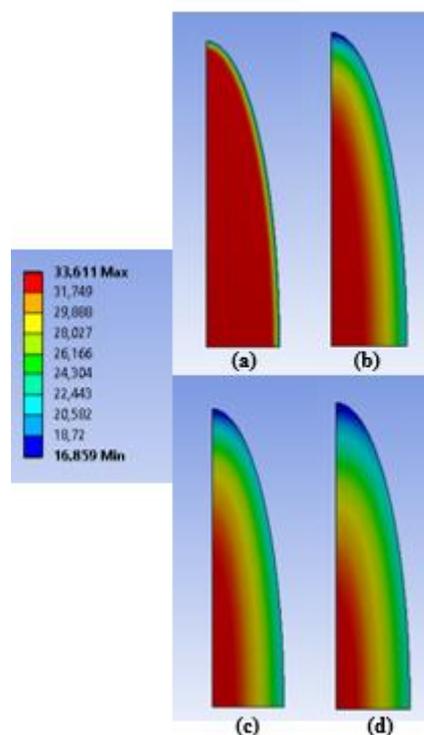
Para o eixo maior a variação de temperatura é muito intensa na extremidade o que torna este um ponto crítico no resfriamento na qual irá ocorrer maiores variações, podendo gerar lesões no fruto devido ao alcance de baixas temperaturas enquanto o interior demora mais tempo para refrigerar. Analisando a Figura 7 nota-se que o resfriamento ao longo do eixo menor ocorre de forma mais suave que a extremidade relativa ao eixo maior.



**Figura 8:** Campo de temperatura no eixo menor.  
Fonte: Elaborado pelos autores.

Como recomendação para evitar perda considerável da massa, retardar o amadurecimento e a elevação das taxas respiratórias, atrasar o amolecimento e outras transformações bioquímicas, Silva (2009) propõe a utilização de filmes plásticos para impermeabilização do fruto durante o armazenamento refrigerado.

Na figura 8 ilustra-se a evolução do campo de temperatura para toda a superfície do fruto, nela fica evidente o rápido resfriamento do fruto na extremidade superior enquanto que o contorno da lateral exterior possui transição mais suave no tempo. É preciso evidenciar ainda que os resultados obtidos aqui devem ser validados por experimentação para convalidar o modelo computacional a fim de ser utilizado em aplicações práticas.



**Figura 9:** Campo de temperatura para  $h = 100 \text{ W/m}^2\cdot\text{k}$  (a) com 1 s, (b) com 50 s, (c) com 100 s e (d) com 200 s de refrigeração.

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 5. Conclusão

Através do *Software* Ansys e utilizando as propriedades termofísicas da Banana disponíveis na literatura, simulou-se o resfriamento do fruto a fim de prolongar sua vida conservando as suas características organolépticas.

Constatou-se a grande influência do coeficiente convectivo no tempo de resfriamento até 100 W/m<sup>2</sup>.k, a partir disso a influência é demasiadamente reduzida. Além disso aferiu-se que as extremidades do eixo maior do fruto sofre com maiores taxas de variação de temperatura no tempo. Desta forma propõe-se a avaliação do resfriamento com embalagens para amortizar as lesões no fruto.

Como proposta futura, pode-se realizar uma validação experimental com relação aos resultados numéricos aqui discutidos, a fim de representar com maior grau de confiabilidade o processo de resfriamento da banana, permitindo um tratamento mais realístico.

## Referências

- AMORIM, H. C.** *Modelagem e Simulação da Transferência de Calor em Alimentos com Forma Esferoidal Prolata. Estudo de Caso: Resfriamento e Congelamento de Banana.* Universidade Federal de Campina Grande centro de Ciências e Tecnologia pós-graduação em Engenharia Mecânica, Campina Grande - PB, 2016.
- ASHRAE,** *ASHRAE Handbook - Fundamentals, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers,* Atlanta, 2006.
- BATHE, K-J.** *Finite Element Procedures.* New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- BRACKMANN, A., et al.** *Armazenamento em atmosfera modificada e controlada de banana prata com absorção de etileno.* Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 30, n. 5, p. 914-919, 2006.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.** *Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática.* New York: McGraw-Hill, ed. 4, 2012.
- COELHO, A. F. S., et al.** *Controle pós-colheita da antracnose da banana-prata anã tratada com fungicidas e mantida sob refrigeração.* Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 34, n. 4, p. 1004-1008, 2010.
- DIAS, J. do S. A.; BARRETO, M. C.** *Aspectos agrônômicos, fitopatológicos e socioeconômicos da sigatoka-negra na cultura da bananeira no Estado do Amapá.* 95 p, Macapá: Embrapa Amapá, 2011.
- DOSSATO, R. J.** *Princípios de refrigeração.* Hemus, ed. 2, 2004.
- FAOSTAT,** *Food and agriculture organization of the United Nations, 2017.* Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 31 de jan. de 2019.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T.** *Um Primeiro Curso em Elementos Finitos.* Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- HOFFMAN, J. D.** *Numerical Methods for Engineers and Scientists.* New York: McGraw-Hill, ed. 2, 1992.
- IBGE.** *Produção Agrícola Municipal.* Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 15 de fev. de 2019.
- INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T.** *Transferência de calor e massa.* Rio de Janeiro: LTC, ed. 7, p. 672, 2017.
- MARTINS, R. N., et al.** *Armazenamento refrigerado de banana 'Prata Anã' proveniente de cachos com 16, 18 e 20 semanas.* Ciência e Agrotecnologia. Lavras, v. 31, n. 5, p. 1423-1429, 2007.
- SILVA, W. P. da et al.** *Mathematical model for determining thermal properties of whole bananas with peel during the cooling process.* Journal Of Food Engineering, [s.l.], v. 227, p.11-17, jun. 2018. Elsevier BV.
- TERUEL, B., et al.** *Resfriamento de banana-prata com ar forçado.* Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 24, n. 1, p. 142-146, 2002.

**TSEN, J.-H. & KING, V.A.-E.** *Density of banana puree as a function of soluble solids concentration and temperature.* Journal of Food Engineering, v. 55, n. 4, p. 305–308, 2002.

**VIVIANE, L; LEAL, P. M.** *Qualidade pós colheita da banana prata anã armazenada sob diferentes condições.* Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal - SP, v. 29, n. 3, p. 465-470, 2007.