

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE COZIMENTO DE LINGUIÇA CALABRESA

A. M. BUGIERECK¹, F. DALCANTON¹, T. CUNHA¹, E. VEDOVATTO³, J. DAL MAGRO^{1,2}, M. A. FIORI^{1,2}, J. M. M. MELLO^{1,2}

¹ Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação

² Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

³ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos

E-mail para contato: alexandrbugiereck@unochapeco.edu.br

RESUMO – A modelagem matemática juntamente com o algoritmo computacional é uma ferramenta essencial no entendimento e na previsão da evolução dos fenômenos envolvidos, inclusive em condições não testadas experimentalmente. Pensando nisso, este trabalho teve como objetivo desenvolver um programa computacional que simula numericamente o cozimento da linguiça calabresa. A equação da condução de calor, sem geração de energia, em coordenadas cilíndricas foi resolvida. O método de diferenças finitas com formulação explícita foi utilizado. O programa foi validado com resultados experimentais obtidos durante o processo de cozimento da linguiça calabresa através de um *datalogger*. Através de simulações numéricas de diferentes parâmetros do processo previu-se o perfil de temperatura no interior da linguiça calabresa. Com isso, pode-se dizer que o algoritmo computacional proposto possibilita a indústria de alimentos determinarem as condições operacionais ótimas do sistema.

1. INTRODUÇÃO

A linguiça calabresa, definida neste a partir de agora como LC, é um alimento processado, consumido pela praticidade que se encontra no mercado e pelo seu sabor característico. É classificada como um produto obtido de carne suína, curado, adicionado de ingredientes, devendo ter o sabor picante característico da pimenta calabresa submetida ou não ao processo de estufagem para desidratação e ou cozimento, sendo o processo de defumação opcional (Brasil, 1998). Sua fabricação consiste nas etapas de moagem da carne e toucinho, condimentação na misturadeira, embutimento, cozimento, defumação, resfriamento e embalagem (Santos, 2006). O processamento térmico é empregado para obter tanto o sabor desejado quanto a inocuidade adequada para o consumo humano. É nesta etapa que irão ocorrer as reações de maturação, e espera-se que a temperatura interna (ponto mais frio do alimento) atinja a temperatura ideal. No caso da LC, o produto deve permanecer na câmara (estufa) até a temperatura interna atingir 72°C (cerca de 4 horas), esse processo tem a finalidade de garantir a consistência firme, fixar a cor e prolongar a vida útil. O tratamento térmico é um dos métodos mais empregados na conservação de alimentos, sendo o tipo de tratamento que mais

modifica o produto, e a utilização de simulação matemática para transferência de calor na avaliação desses tratamentos térmicos na indústria de alimentos vem se mostrando uma ótima ferramenta para avaliar a segurança sem que comprometa a qualidade nutricional dos alimentos (Noronha, 1999).

A simulação numérica em mecânica dos fluidos e transferência de calor sempre esteve em grande desenvolvimento, sendo uma ferramenta poderosa para solução de importantes problemas aplicados as engenharias. A relativa facilidade de aplicação de métodos numéricos e a grande disseminação da computação foram os responsáveis pelo avanço nessa área (Maliska, 1995). Um modelo matemático poderá de uma forma simples, complementar conhecimentos sobre o cozimento da LC a partir dos detalhes das condições físicas do modelo. Nesse sentido, a modelagem matemática juntamente com a simulação numérica é uma ferramenta para otimização de processos muito utilizada para avaliar o desempenho do mesmo com maior flexibilidade e baixo custo. Por isto, o presente trabalho teve por objetivo simular numericamente o cozimento da LC, utilizando a equação da difusão do calor em coordenadas cilíndricas, discretizando o modelo matemático pelo método de diferenças finitas com formulação explícita.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

2.1. Modelo Matemático

A equação da difusão de calor é uma equação diferencial parcial parabólica de segunda ordem. Essa equação determina o campo de temperatura, ou seja, representa como a temperatura varia com a posição no meio e com o tempo (Incropera *et al.*, 2002). Para coordenadas cilíndricas, que é o caso da LC, ela é escrita conforme Equação 1.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

Onde k , ρ e C_p são as propriedades físicas do sólido, que são funções da temperatura e representam a condutividade térmica (W/(m.K)), massa específica (Kg/m³) e a capacidade calorífica do material (J/(kg.K)), respectivamente. t expressa o tempo (s), T a temperatura (K) e \dot{q} a taxa na qual a energia é gerada por unidade de volume no meio (W/m³).

A modelagem matemática utilizada neste estudo para descrever o processo de cozimento da LC é a equação da difusão de calor, Equação 1, onde foi considerado que as propriedades físicas não variem significativamente na faixa de temperatura estudada, que o fluxo de calor é unidimensional na direção radial e que não há geração de energia no interior da LC. Introduzindo o parâmetro de difusividade térmica, α (m²/s), e as considerações acima, a Equação 1 é escrita conforme a Equação 2.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (2)$$

O conhecimento das condições, espaciais e temporal, da temperatura advém da solução da equação diferencial do modelo, visto que a Equação 2 é uma equação derivada de segunda ordem com a posição e de primeira ordem em relação ao tempo, e para a sua resolução deve-se ter duas condições

de contorno e uma condição inicial. Para tanto, é necessária a apresentação de condições que viabilizem sua solução (Maliska, 1995). Neste trabalho, as condições dadas pelas Equações 3, 4 e 5 foram adotadas, de acordo com Çengel e Ghajar (2012), as quais expressam a condição inicial e as condições de contorno para o problema, respectivamente.

$$t = 0 (\forall r): T = T_0 \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h(T_\infty - T_{o,t}) \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (5)$$

onde T_0 é a temperatura da linguiça inicial (K), ou seja, quando entra na estufa; T_∞ é a temperatura da estufa (K) e h representa o coeficiente convectivo de transferência de calor ($W/(m^2.K)$). De acordo com Piaia (2009) as variações dos coeficientes convectivos de transferência de calor estão relacionadas aos gradientes locais de velocidade no interior do equipamento, produzindo tensões cisalhantes do ar diferenciadas junto à superfície do material, ou seja, é diretamente proporcional a velocidade de ar que terá dentro da estufa, além das propriedades físicas do fluido e do sólido, bem como de sua geometria. Não existe uma única equação que possibilite relacionar todos esses parâmetros, o que se tem na literatura são correlações empíricas ou soluções analíticas utilizando definições de camada limite, que podem trazer valores aproximados. A Equação 4, escrita para a superfície da LC, descreve a condição de contorno de Robin, demonstra que tudo que chega até a superfície por convecção entrará no sólido por condução. Enquanto que a Equação 5, escrita para o centro da LC, condição de contorno de Neumann, considera que o fluxo térmico seja nulo.

Para a validação dos resultados gerados, via simulação numérica do processo de cozimento da LC, foram necessárias as medições experimentais de temperatura e o conhecimento dos parâmetros físicos da mesma. Os dados experimentais de temperatura em função do tempo, durante o processo de cozimento da LC, foram obtidos utilizando-se um *datalogger* (Marca T.RH%Logger). O espeto do *datalogger* foi inserido no centro da LC. As tomadas de temperatura do produto foram realizadas nas linguiças que se encontravam na parte frontal da gaiola, tendo como parâmetro de avaliação o ponto crítico do processo de cozimento, ou seja, a região na estufa em que a distribuição da temperatura é defasada, pois neste ponto o fluxo de calor é menor. Os experimentos foram realizados em uma unidade processadora de carne suína de Chapecó – SC.

Dentre os parâmetros físicos, o limitante é o coeficiente de transferência de calor por convecção, denotado por h , pois ele é sensível aos parâmetros do processo experimental, como velocidade e propriedades térmicas do ar de cozimento, geometria do sistema, local onde a temperatura do fluido é medida, entre outros. Portanto, neste trabalho o valor de h foi estimado, ajustando os dados encontrados numericamente aos dados obtidos via experimento. Esta técnica é muito utilizada em situações onde o h é difícil de calcular. A condutividade térmica foi determinada de acordo com Silva (2011) o qual obteve valores em torno de $0,42 W/(m.K)$. Já a densidade e a capacidade calorífica da LC estudada por Sun e Hu (2003), é de $0,90 kg/m^3$ e $3600 J/(kg.K)$.

2.1. Desenvolvimento Numérico – Método de Diferenças Finitas

A equação da difusão de calor para o cozimento da LC, Equação 2, foi discretizada utilizando o método de diferenças finitas. A ideia básica deste método é substituir as derivadas parciais de uma equação diferencial por expressões algébricas que envolvem a função incógnita, por expressões algébricas utilizando séries de Taylor na região dos pontos de interesse (Franco e Landgraf, 2006). Neste trabalho, a formulação explícita foi utilizada, ou seja, as temperaturas vizinhas ao ponto P foram avaliadas no instante anterior do tempo, o termo transiente foi aproximado pelo método de Crank-Nicolson. O termo condutivo foi truncado no segundo termo da série de Taylor, e para a avaliação das variáveis e de suas derivadas nas faces dos volumes de controle, para este termo utilizou-se a função de interpolação de diferenças centrais. A equação da difusão de calor, bem como suas condições de contorno, Equação 2, 4 e 5, respectivamente, discretizadas pelo método de diferenças finitas, são apresentadas pelas Equações 6, 7 e 8, respectivamente.

$$T_{(i+1,j)} = \left(1 - \frac{2\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\right) T_{(i,j)} + \left(\frac{\alpha\Delta t}{r_{(i,j+1)}2\Delta r} + \frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2}\right) T_{(i,j+1)} + \left(\frac{\alpha\Delta t}{\Delta r^2} - \frac{\alpha\Delta t}{r_{(i,j-1)}2\Delta r}\right) T_{(i,j-1)} \quad (6)$$

$$-k \left(\frac{T_{[i,j+1]} - T_{[i,j-1]}}{2\Delta r}\right) = h (T_{[i,j+1]} - T_{\infty}) \quad (7)$$

$$T_{[i,2]} = T_{[i,1]} \quad (8)$$

Onde os subscritos i e j são o contador no tempo e na posição, respectivamente. Neste trabalho, avaliou-se o comportamento do perfil de temperatura frente a diferentes valores do coeficiente convectivo de transferência de calor, diferentes temperaturas iniciais e diâmetros da LC. O programa computacional foi desenvolvido em linguagem Delphi 6.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ajuste do Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor, h

Durante o processo de cozimento da LC a estufa passa por diversos programas de tempo e temperatura, de circulação de ar com e sem fumaça, porém as etapas são fixas para a LC, programação que garante o cozimento da mesma. Frente a tantas variáveis difíceis de serem mensuradas, e pela dificuldade em encontrar os parâmetros necessários para utilizar as correlações empíricas ou modelo analítico presentes na literatura, neste trabalho foi realizado um ajuste do coeficiente convectivo de transferência de calor. O ajuste foi realizado através da simulação numérica, em comparação com os resultados do perfil de temperatura obtido experimentalmente. Para essas simulações fixou-se os parâmetros físicos (apresentados na modelagem matemática), o calibre da LC em 38 mm (valor padrão utilizado pela empresa), tempo e temperatura (seguiu-se a programação da estufa fornecida pela indústria). Os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor, h , estudados para cada simulação (mantidos constantes ao longo do processo de cozimento) foram de: 10, 2, 0,1, 0,05, 0,01, 0,008 W/(m².K). Os perfis de temperatura obtidos pela simulação, bem como o perfil de temperatura obtido experimentalmente estão representados na Figura 1.

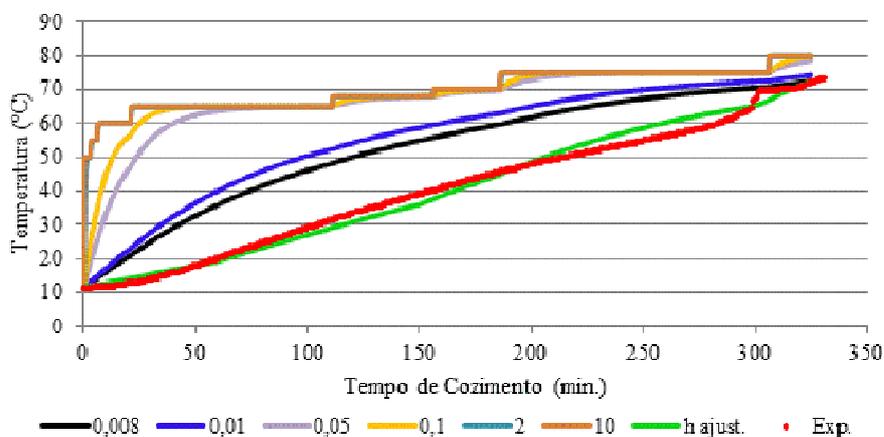


Figura 1–Perfil de temperatura no centro da linguiça, em relação ao tempo para os diferentes valores de h e o perfil de temperatura obtido experimentalmente.

Durante o processo de cozimento, a temperatura da estufa vai alterando ao longo do tempo, ou seja, no início do processo a temperatura é menor, e a cada tempo estipulado pela indústria, há um aumento, até atingir a temperatura desejada, processo chamado de rampas de temperatura. As rampas de temperatura são muito bem visualizadas quando o valor do h é elevado, neste caso, $h = 10$ W/(m² K), conforme Figura 1. Isso porque o h é diretamente proporcional ao fluxo de calor, quanto maior seu valor, mais rapidamente ele será sentido, ou seja, há um rápido incremento de temperatura, já inversamente, onde o $h = 0,008$ W/(m² K) a curva se torna mais acentuada. Para um valor de h elevado, o perfil de temperatura simulado se distancia do perfil real, a mesma situação pode ser vista para as simulações de h nos valores de 2, 0,1 e 0,05 W/(m².K). Como os valores de h foram fixos em todo o tempo do processo, verificou-se que o perfil de temperatura não estava representando adequadamente o processo real, isso porque o coeficiente convectivo de transferência de calor é sensível aos parâmetros do processo experimental, como velocidade e propriedades térmicas do ar, geometria do sistema, local onde a temperatura do fluido é medida, entre outros (Pirozzi e Amendola, 2005). Em função disso, realizou-se uma simulação utilizando diferentes valores de h para as etapas distintas do processo de cozimento. Os valores adotados encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de h utilizados nas etapas do processo de cozimento da linguiça calabresa.

Etapa do processo	1	2	3	4	5	6	7	8
h (W/m ² .K)	0,002	0,0035	0,0038	0,0062	0,0069	0,0070	0,0074	0,022

Pela Figura 1, pode-se observar que o perfil de temperatura obtido com o valor de h ajustado (linha verde), foi muito próximo do perfil obtido experimentalmente (linha vermelha), representando melhor o processo real. Essa metodologia, para estimar o valor de h , ajustando os dados encontrados numericamente aos dados obtidos experimentalmente, foi utilizada por diversos autores, dentre os quais pode-se citar Pirozzi e Amendola (2005), Amendola *et al.*, (2009), Castro e Amendola (1999), Teruel (2000) e Pinho (2003), onde através de modelos matemáticos e métodos numéricos distintos,

simularam o resfriamento de frutos e estimaram o valor de h . Uma vez que, para o processo de cozimento da LC, se obteve a menor diferença quando comparadas as curvas obtidas numericamente e experimentalmente, pode-se estabelecer os valores de h que são representativos para esse processo. A comparação entre o perfil de temperatura experimental e o perfil de temperatura obtido através da simulação numérica, utilizando os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor ajustado, pode ser visualizada na Figura 2.

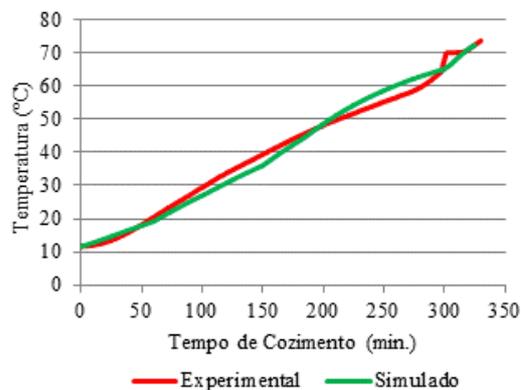


Figura 2 – Perfil de temperatura obtido experimentalmente e o perfil de temperatura obtido através da simulação numérica com valores de h estimado.

Nota-se pela Figura 2, que os resultados obtidos pela simulação foram próximos à realidade do processo de cozimento da LC. Neste caso, o tempo necessário para que o centro da LC atingisse a temperatura de 72°C foi de 323 minutos, já para o processo real o tempo foi de 320 minutos, garantindo o PCC (Ponto Crítico de Controle). O erro foi calculado ponto a ponto entre o experimental e o simulado, e o maior valor encontrado foi assumido como o crítico, sendo de 9,4%. Outro ponto importante, é que a simulação do processo foi acima da condição observada experimentalmente, sendo esta uma área segura, pois o processo já havia atingido o ponto mais frio do produto estudado, garantindo a inativação microbiana.

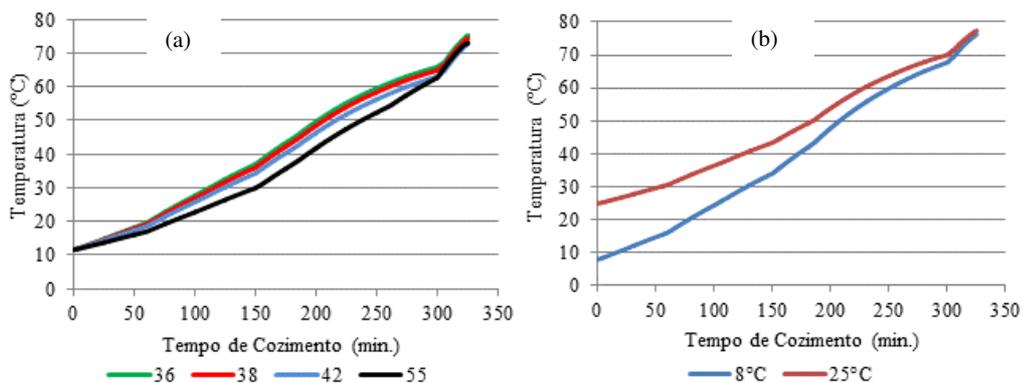


Figura 3– (a) Perfis de temperatura para diferentes calibres da linguiça; (b) Perfis de temperatura para diferentes temperaturas iniciais da linguiça.

Sem alterar a programação da estufa para o processo de cozimento, de modo a não modificar os valores de h estimados, realizou-se uma simulação numérica variando-se o calibre e a temperatura inicial da LC. Estas simulações têm por objetivo demonstrar que a modelagem matemática e a simulação numérica podem prever resultados sem a necessidade de realizar experimentos. Os resultados das simulações estão demonstrados na Figura 3 (a) para variações no calibre e 3 (b) para variações na temperatura inicial. Os demais parâmetros do processo foram mantidos constantes.

Analisando a Figura 3 (a), verificou-se que o tempo necessário para a linguça atingir $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de 316, 318, 321 e 323 minutos para o calibre 36, 38, 42 e 55 mm, respectivamente, como era esperado, pois o tempo para que a temperatura no centro da LC atinja $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ varia proporcionalmente em função do calibre, ou seja, menor calibre, menor tempo para atingir a temperatura desejada. Na Figura 3 (b) estão demonstradas as variações na temperatura interna inicial do produto, como pode ser visualizado, para a temperatura inicial de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ o tempo necessário para que a temperatura interna da LC atinja $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de 307 minutos, enquanto que para a temperatura inicial de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ o tempo foi de 311 minutos. Os resultados demonstram que quando o produto entra na estufa com uma temperatura interna maior, o tempo para que ele atinja $72\text{ }^{\circ}\text{C}$ tende a ser menor do que quando ele entrar com uma temperatura mais baixa.

4. CONCLUSÃO

Analisando o estudo obtido conclui-se que o coeficiente convectivo de transferência de calor é um parâmetro extremamente importante para o processo de cozimento de produtos, visto que pequenas variações em seu valor geram respostas que se distanciam da realidade. A faixa de valores do h estimada neste trabalho representou de forma satisfatória o processo de cozimento da LC, o que permitiu utilizar o ajuste para novas simulações. Com relação ao calibre da LC, quando utilizado o menor valor, pode-se retirar o produto da estufa com um tempo de 316 minutos e não 320 que é o real. Esses 4 minutos a menos de processo, em um ano de trabalho, resultam em um aumento de aproximadamente 40 bateladas. Os resultados numéricos apresentados neste trabalho demonstram que através da simulação numérica é possível prever o comportamento dinâmico e estacionário do processo de cozimento da LC, inclusive em condições não testadas experimentalmente, possibilitando a determinação das condições operacionais economicamente ótimas do processo bem como auxiliando no projeto de otimização.

6. REFERÊNCIAS

AMENDOLA, M.; DUSSÁN-SARRIA, S.; RABELLO, A. A. Determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor de figos submetidos ao resfriamento rápido. *Rev. bras. Eng. Agríc. Ambient.*, v. 13 n. 2, p. 176-182, 2009.

BRASIL. Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde. Portaria nº 1002, de 11 de Dezembro de 1998. *Lista os produtos, comercializados no país, enquadrando-se na categoria 8 carnes e produtos cárneos*. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/alimentos>. Acesso: 16 de set. 2013.

CASTRO, L.R.; AMENDOLA, M. Simulação numérica do processo de transferência de calor em vegetais esféricos. In: CONGRESSO IBERO-LATINO-AMERICANO EM MÉTODOS COMPUTACIONAIS E ENGENHARIA, 20., 1999, São Paulo. Anais. São Paulo. 1 CD ROM.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática*. 4 ed. Editora Mcgraw, 2012.

FRANCO, B. D. G. M.; LANDGRAF, M. *Microbiologia dos Alimentos*. São Paulo: Editora Atheneu, 2006.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, PBERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.

MALISKA, C.R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. São Paulo: Editora LTC, 1995, 424p.

NORONHA, J. F. *Notas sobre processamento térmico de alimentos*. Escola superior agrária de Coimbra, 1999. Disponível em: <<http://www.esac.pt/noronha/pgs/0708/aponta/ProcTermic1.htm>>. Acesso em: 15 de set. 2013.

PIAIA, J. C. Z. *Secagem da linguiça calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina. Doutor em Engenharia Química. 2009.

PINHO, C. R. G. *Modelamento matemático do processo de esterilização de alimentos condutivos em embalagem de vidro*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas-SP, 2003.

PIROZZI, D.C.Z.; AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica do resfriamento rápido de morango com ar forçado. *Rev. Eng. Agríc. Jaboticabal.*, v. 25, p. 222-230, 2005.

SANTOS, E. *Avaliação das propriedades tecnológicas de tripas naturais submetidas ao tratamento com soluções emulsificantes*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis-SC, 2006.

SILVA, M. de O. *Otimização de um processo de cozimento de linguiça*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da URI- Campus Erechim, 2011.

SUN, D.; HU, Z. CFD simulation of coupled heat and mass transfer through porous foods during vacuum cooling process. *Int. J. Refrig.*, v. 26, p. 19-27, 2003.

TERUEL, M. B. J. *Estudo teórico experimental do resfriamento de laranja e banana com ar forçado*. 2000. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas-SP, 2000.