

## SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DE UM TANQUE DE RESFRIAMENTO DE LEITE

RENAN P. REZENDE<sup>1</sup>, EDNILTON T. DE ANDRADE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro de Produção, Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, Brasil. renanprezende@gmail.com

<sup>2</sup> D. Sc. em Eng. Agrícola, DEG - Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, Brasil. ednilton@deg.ufla.br

Apresentado no  
XLVII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2018  
06, 07 e 08 de agosto de 2018 - Brasília - DF, Brasil

**RESUMO:** Um modelo é uma representação de um sistema real que permite analisar e prever diversas condições de funcionamento. Assim, o objetivo deste trabalho foi modelar um tanque de resfriamento que resfria o leite até 4 °C, de modo a manter sua qualidade após a ordenha em uma propriedade rural. O modelo do sistema foi construído e simulado no software ANSYS de análise de elementos finitos. Os resultados da simulação foram então comparados aos experimentais, e o modelo desenvolvido simulou o resfriamento do leite no tanque com um erro de aproximadamente 5%, o que configura um erro aceitável, possibilitando que o modelo possa ser utilizado para representar satisfatoriamente o sistema real. Com isso, testes de alternativas para melhorar e otimizar o processo, bem como uma melhor utilização do sistema podem ser feitas diretamente no modelo computacional, sem a necessidade de serem implementadas previamente no sistema real.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem; método dos elementos finitos; tanque de resfriamento.

### SIMULATION ON FINITE ELEMENTS METHOD OF A MILK COOLING TANK

**ABSTRACT:** A model is a representation of a real system that allows analysis and predictions of several conditions of operation. The aim of this study was to model a cooling tank, which cools milk to 4 °C in order to maintain its quality after the milking process on a farm. The model was built and simulated using the software ANSYS for finite element method analysis. The results of simulation were compared to the experimental values, and the developed model simulated the milk cooling with an error of approximately 5%, which configures an acceptable error, allowing the model to satisfactorily represent the real system. Thus, test of alternatives to improve and optimize the process, as well as a better utilization of the system can be made directly on the computational model, without the need to be implemented previously on the real system.

**KEYWORDS:** modeling; finite elements method; cooling tank.

**INTRODUÇÃO:** Em 2017, o Brasil atingiu uma produção de 34,5 bilhões de litros de leite, e irá apresentar uma taxa anual de crescimento entre 2,1 e 3,0% pelos próximos 10 anos (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2017). Tem havido uma concentração em melhorias no processo de produção e incorporação mais acelerada de tecnologias, sobretudo nos produtores de médio e grande porte (EMBRAPA, 2017). O setor também vem se notabilizando pelo acirramento das exigências de qualidade do produto, adotando medidas que tem como objetivo melhorar o padrão do leite brasileiro. A busca pela qualidade não se dá somente pelos ganhos de produtividade e de rentabilidade para o produtor e para a indústria, mas também pelos ganhos com a garantia da qualidade e segurança dos alimentos e principalmente, com a saúde dos consumidores (EMBRAPA, 2011). Como o consumo de leite e derivados está ligado a princípios de nutrição e saúde, garantir a segurança e a qualidade da fabricação desses produtos é essencial para a indústria. A

qualidade do leite deve ser garantida desde o momento em que ele é ordenhado, pelo fato de não haver como melhorar a qualidade do leite depois que ele sai da propriedade rural. Assim, o foco tem sido direcionado para o produtor, pois é nele que se dá início ao processo da qualidade. A temperatura de refrigeração do leite é diretamente relacionada à preservação de sua qualidade. De acordo a Instrução Normativa Nº 62 (2011), a temperatura de refrigeração deve ser de no máximo 7° C na propriedade rural, e o leite deve atingir essa temperatura em até 3 horas após a ordenha. Mesmo nessa temperatura ainda há riscos de aumento de carga bacteriana durante o armazenamento. Porém, se a temperatura for de até 4° C, a contagem bacteriana praticamente não se altera em 48 horas (CLÍNICA DO LEITE, 2016). Um modelo em computador é uma representação de algum problema ou sistema do mundo real e que ao usar um modelo, as alternativas de decisão podem ser analisadas antes de ter que escolher um plano específico para implementação no sistema real (RAGSDALE, 2009). Também, PENG et. al. (2017) citam que ao se utilizar um modelo, é possível propor melhorias, otimizar e testar alternativas, de modo a prever qual a melhor alternativa, sem ter que executar experimentos físicos. Com o aumento significativo de poder computacional, o método dos elementos finitos tem sido desenvolvido e amplamente utilizado por sua alta confiabilidade e precisão nos resultados (NINDUM et. al., 2015). Além disso, este método é também largamente empregado para análises térmicas de sistemas (ZHAO, 2014). Sendo assim, este trabalho tem como objetivo modelar um tanque de resfriamento de leite e fazer uma análise por elementos finitos, comparando os dados obtidos pela simulação com os resultados experimentais observados.

**MATERIAL E MÉTODOS:** Este trabalho foi desenvolvido no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e na Fazenda Xavier, localizada na zona rural do município de Ingaí-MG. Na propriedade, todo o leite que é produzido é armazenado em um tanque de expansão, onde é mantido até ser destinado ao laticínio. O leite é resfriado no tanque à medida que é ordenhado. Ao término da ordenha, todo o leite no tanque de expansão deve ser resfriado a 4°C em até 3 horas. São realizadas duas ordenhas durante o dia, na manhã e na tarde. O leite é enviado ao laticínio após a ordenha da manhã, quando o tanque é então esvaziado. A ordenha da tarde é a mais crucial, pois o tanque se encontra vazio e o resfriamento do leite leva mais tempo. Na ordenha da manhã, o leite produzido é adicionado ao tanque que já possui leite na temperatura de 4 °C, o que faz com que seu resfriamento seja mais rápido. O tanque de expansão tem formato cilíndrico, possui capacidade de 1650 litros, com altura de 0,96 m e diâmetro da base de 1,52 m. O material de revestimento é o aço inoxidável, com uma camada interna e outra externa, com isopor entre as camadas. O resfriamento é feito por um sistema de troca de calor, onde um gás é circulado entre o fundo do tanque, onde retira o calor, e o exterior, onde é resfriado, retomando o ciclo. Uma pá horizontal de aço inoxidável, com altura de 10 cm e comprimento de 60 cm, localizada próximo ao fundo do tanque e sustentada por uma barra vertical fixa à tampa superior, gira constantemente durante o resfriamento, agitando o leite de modo a evitar que apenas o leite do fundo seja resfriado e que este congele. Com esses dados, foi possível a construção de um modelo de simulação para representar o processo. A simulação foi realizada no software ANSYS, versão 14.2. A análise foi feita utilizando a ferramenta interna de fluidodinâmica computacional Fluent (pelo sistema de análise Fluid Flow), e a simulação foi no modo Transient, por se tratar de um sistema dinâmico no tempo. Não foi considerada a troca de calor entre o leite no tanque e o ambiente externo, nem a troca de calor entre o leite e o ar no espaço vazio dentro do tanque, uma vez que o fluxo de calor observado já considera o impacto do ar no tanque. Assim, apenas o volume ocupado de leite foi modelado. Foi também modelada a pá que agita o leite no fundo do tanque. Abaixo, na Tabela 1, são apresentadas as propriedades físicas consideradas na modelagem do sistema.

TABELA 1. Propriedades físicas consideradas para o leite e o aço inoxidável.

Material	Densidade (kg.m <sup>-3</sup> )	Calor Específico (J.kg <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )	Cond. Térmica (W.m <sup>-1</sup> .°C <sup>-1</sup> )	Viscosidade (kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> )
Leite	1030	3930	0,53	0,002
Aço Inoxidável	7700	502	17	-

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** O fluxo de calor para cada observação foi calculado a partir do volume de leite, tempo de resfriamento e a variação de temperatura. A unidade de fluxo de calor é  $W.m^{-2}$ . Como  $W$  é igual a  $J.s^{-1}$ , obteve-se a Equação 1.

$$\Phi = W/m^2 = (J/s) / m^2 = J/(s.m^2) \quad (1)$$

Na Equação 1, os valores para o tempo, em segundos, e a área de contato (fundo do tanque), em  $m^2$ , foram obtidos durante as observações. Para encontrar o calor, em joules, para resfriar o leite, utilizou-se a equação de quantidade de calor, representada pela Equação 2:

$$Q = m * c_p * \Delta t \quad (2)$$

em que,

$\Phi$  - fluxo de calor,  $W.m^{-2}$

$Q$  - quantidade de calor,  $J$

$m$  - massa do leite,  $kg$

$c_p$  - calor específico do leite,  $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

$\Delta t$  - diferença de temperatura,  $^{\circ}C$

Assim, foi possível obter os fluxos de calor para o resfriamento dos diversos volumes de leite, por meio da Equação 3.

$$\Phi = (m * c_p * \Delta t)/(s.m^2) \quad (3)$$

A Tabela 2 abaixo apresenta os resultados das observações. São mostrados o volume de leite no tanque, as temperaturas inicial e final, o tempo total e o fluxo de calor no fundo do tanque durante o resfriamento.

TABELA 2. Observações em diferentes dias, com volumes distintos de leite no tanque.

Observação	Volume ( $m^3$ )	Temperatura ( $^{\circ}C$ )		Tempo (min)	Fluxo $\phi$ ( $W/m^2$ )
		Inicial	Final		
1	0,550	23,2	4,0	92,35	-4250,60
2	0,775	23,6	4,0	169,30	-3335,06
3	0,305	22,1	4,0	66,29	-3095,28
4	0,485	23,4	4,0	81,55	-4288,44
5	0,470	22,8	4,0	76,51	-4292,52

Observou-se uma tendência no comportamento do fluxo  $\phi$  em relação ao volume de leite. Os dados foram então ajustados por uma equação de 2º grau, que é representada pela Equação 4.

$$\phi = 20399 * v^2 - 22469 * v + 1839 \quad (4)$$

em que,

$\phi$  = fluxo de calor,  $W.m^{-2}$

$v$  = volume de leite,  $m^3$

Para este ajuste, foi encontrado um  $R^2$  de 0,9878. Este ajuste é válido para o intervalo onde os volumes foram observados, entre aproximadamente 0,3 e 0,8  $m^3$  de leite. Com isso, o modelo construído no ANSYS foi testado para três volumes distintos, com o objetivo de comparar com os resultados reais. A Tabela 3 apresenta o volume, o fluxo de calor e as temperaturas inicial e final, para cada simulação. Os fluxos de calor utilizados foram obtidos pela Equação 4.

TABELA 3. Valores de volume, fluxo de calor  $\phi^*$  (obtido pela Equação 4), temperatura inicial e temperatura final utilizados nas simulações.

Simulação	Volume (m <sup>3</sup> )	Fluxo $\phi^*$ (W/m <sup>2</sup> )	Temperatura (°C)	
			Inicial	Final
1	0,305	-3116,43	22,1	4,0
2	0,550	-4348,25	23,2	4,0
3	0,775	-3322,33	23,6	4,0

Após a simulação, os resultados foram transferidos para o software de pós-processamento CFD-Post, versão 14.2, que permite a visualização e análise dos resultados. A Tabela 4 abaixo apresenta o tempo real e o tempo da simulação para o resfriamento até 4 °C para cada volume simulado. O erro percentual absoluto foi calculado por meio da Equação 5.

$$\text{Erro} = |(\text{tempo de simulação} - \text{tempo real}) / (\text{tempo real})| \quad (5)$$

TABELA 4: Tempo real, tempo da simulação e erro percentual absoluto, para cada volume simulado.

Simulação	Volume (m <sup>3</sup> )	Tempo (min)		Erro absoluto (%)
		Real	Simulação	
1	0,305	66,29	65,71	0,87
2	0,550	92,35	90,22	2,31
3	0,775	169,30	170,03	0,43
Média				1,20

Observou-se um erro percentual absoluto médio de 1,20%. De acordo com MOHAPATRA e RAO (2005), desvios de até 10% entre os valores reais e os valores obtidos da curva estimada pelo modelo são considerados satisfatórios e indicam que o modelo pode ser utilizado.

**CONCLUSÕES:** Foi construído e simulado um modelo computacional de um tanque de resfriamento, que tem como objetivo resfriar leite a 4 °C, em até 3 horas. O modelo foi testado para três diferentes volumes no tanque, com diferentes temperaturas no início do processo. Observou-se um erro percentual absoluto médio de 1,20% entre o tempo decorrido na situação real e o tempo equivalente na simulação. Os resultados obtidos mostraram que o modelo pode ser utilizado para representar a situação real com um erro aceitável. Sem a necessidade de implementar alternativas diretamente no sistema real para testes, alterações para otimizar o processo podem ser testadas inicialmente no modelo computacional, o que permite obter uma maior eficiência no processo, com custos reduzidos de experimentação.

**REFERÊNCIAS:** CLÍNICA DO LEITE. Contagem Bacteriana Total. **Mapa da Qualidade do Leite**, 1ª edição, Out. 2016.

EMBRAPA. **Produção de leite com qualidade na propriedade rural**. 2011.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Instrução Normativa N° 62**. Dez. 2011.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Projeções do Agronegócio - Brasil 2016/17 a 2026/27**. Ago. 2017.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p.513-518, 2005.

NIMDUM, P.; PATAMAPROHM, B.; RENARD, J.; VILLALONGA, S. Experimental method and numerical simulation demonstrate non-linear axial behaviour in composite filament wound pressure vessel due to thermal expansion effect. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 40, p. 13231–13241, Out. 2015.

RAGSDALE, C. T. **Modeling & Decision Analysis - Revised Edition**. 1 ed.: Cengage, 590 p., 2009.

PENG, P.; SONG, H.; ZHANG, T.; ADDY, M. Concentrated high intensity electric field system for non-thermal pasteurization of liquid foods: Modeling and simulation of fluid mechanics, electric analysis, and heat transfer. **Computers and Chemical Engineering**, v. 97, p. 183–193, 2017.

ZHAO, B. Temperature-coupled field analysis of LPG tank under fire based on wavelet finite element method. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. v. 117, p. 413–422, 2014.