



MINI USINA DE BENEFICIAMENTO DE LEITE: DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO DA TUBULAÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR E DA POTÊNCIA DA BOMBA

M. C. DIAS¹, A. D. LIMA², L. C. ASSIS³

^{1,2,3} Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

RESUMO – O objetivo desse trabalho é determinar o comprimento da tubulação do trocador de calor para sistema de pasteurização e a potência da bomba necessária para realizar a circulação do leite in natura nesse sistema. A instalação e a operação do pasteurizador em mini usinas de processamento de leite em pequenas propriedades não é complexa. Sua instalação traz alguns benefícios para as pequenas propriedades produtoras de leite assim como para as pequenas e médias cooperativas tais como: geração de empregos nas comunidades rurais e a melhoria da economia no setor agropecuário. Através dos cálculos realizados nesse trabalho o comprimento da tubulação para atender as características das mini usinas de beneficiamento de leite para pequenas propriedades foi 4 m e a potência da bomba para o bombeamento de leite no sistema foi 108,3 W. Os resultados encontrados ficaram dentro do esperado por não necessitar de uma estrutura de grande porte para fazer a instalação da rede de tubos do trocador de calor assim como a bomba por ser de potência relativamente pequena não necessita de estrutura diferenciada para a sua instalação.

1. INTRODUÇÃO

Um dos alimentos básicos essenciais para o ser humano é o leite, esse é um dos motivos para ser a primeira fonte alimentar para recém-nascidos. Com proteínas de valor biológico expressivos assim como vitaminas, sais minerais e cálcio, o leite pode ser fonte de alimentação para seres humanos de todas as idades. O consumo de leite na forma fluida ou de seus derivados segundo o Ministério da Saúde deve ter os seguintes valores: para crianças até dez anos é de 400 ml/dia chegando a 146 litros/ano, já para jovens com idade variando de 11 a 19 anos 700 ml/dia ou 256 litros/ano e para adultos acima dos 20 incluindo os idosos 600 ml/dia ou 219 litros/ano (ZOCCAL, 2010).

Em relação à quantidade de leite no cenário brasileiro com base no censo agropecuário feito pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a quantidade de leite cru adquirido e industrializado em 2019 teve um aumento que ficou em torno de 3% em relação ao ano de 2018 conforme mostram os dados do censo agropecuário trimestral feito pelo IBGE demonstrados na tabela 1.



Tabela 1: Quantidade de leite cru adquirido e industrializado.

Meses	Adquirido			Industrializado		
	2018	2019	Varição	2018	2019	Varição
Janeiro	2 161 220	2 209 044	2,2	2 159 512	2 204 437	2,1
Fevereiro	1 890 351	1 932 030	2,2	1 888 078	1 930 214	2,2
Março	1 967 861	2 060 206	4,7	1 965 697	2 058 087	4,7
Total do 1º Trim.	6 019 432	6 201 280	3,0	6 013 287	6 192 737	3,0

Fonte: IBGE - Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária - Pesquisa Trimestral do Leite.
Nota: Os dados relativos ao ano de 2019 são preliminares.

O aumento da quantidade de leite cru no primeiro trimestre de 2019 descrito na tabela 1 é resultado do aumento na quantidade de propriedades rurais, melhores técnicas de manejo de animais, aumento de maquinário e melhores condições sanitárias. Nesse sentido vale ressaltar que o confronto de dados do censo agropecuário feito pelo IBGE do ano de 1975 até o ano de 2017 evidenciou por exemplo um decréscimo em torno de 62,8% na pastagens naturais, por outro lado o número de pastagens plantadas teve um aumento de 281,5%. Esse cenário foi propício para o aumento da produtividade leiteira tendo um aumento de 353,5% no período considerado conforme o quadro 1.

Quadro 1: Confronto dos resultados dos dados estruturais dos Censos Agropecuários Brasil - 1975/2017.

Censos	Dados estruturais					
	Propriedades (Nº)	Utilização das terras		Tratores	Efetivo animal (1) (3) Bovinos	Produção animal Leite de vaca (1000 l)
		Pastagens naturais	Pastagens plantadas (1) (2)			
1975	4.993.252	125.950.884	39.701.366	323.113	101.673.753	8.513.783
1980	5.159.851	113.897.357	60.602.284	545.205	118.085.872	11.596.276
1985	5.801.809	105.094.029	74.094.402	665.280	128.041.757	12.846.432
1995/1996	4.859.865	78.048.463	99.652.009	803.742	153.058.275	17.931.249
2006	5.175.636	57.633.189	102.408.873	820.718	176.147.501	20.567.868
2017 (1)	5.072.152	46.847.430	111.775.274	1.228.634	171.858.168	30.100.791

Fonte: IBGE, Censos Agropecuários 1975/2017 (modificado). (1) Datas de referência: para 1975, 1980, 1985 e 2006: 31.12; para 1995-1996: 31.07; e para 2017: 30.09. (2) Pastagens plantadas, em más condições por manejo inadequado ou por falta de conservação, e em boas condições, incluindo aquelas em processo de recuperação em na data de referência. (3) Efetivo de animais – animais existentes no estabelecimento na data de referência.



Assim muitos produtores de leite estão buscando novos caminhos para melhorar o retorno financeiro da sua produção em relação ao beneficiamento do leite. Mini usinas de beneficiamento do leite cru surgem como uma opção para o produtor melhorando o seu retorno financeiro e fornecendo produtos de qualidade ao consumidor final. Para a produção e operação nessas usinas não é necessário equipamentos de grande complexidade, com isso o benefício das mini usinas estende-se à geração de empregos nas comunidades rurais, promove a difusão do desenvolvimento tecnológico e ajuda a alavancar a economia no setor agropecuário. Segundo o Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria do Desenvolvimento Rural do leite produzido no Brasil cerca de 40% ou 2,6 bilhões de litros anuais é comercializado na forma de leite cru, é nesse montante que as mini usinas de beneficiamento de leite tem papel importante, dos benefícios citados anteriormente destacamos ainda a solução de problemas que há no transporte de leite das regiões mais afastadas até o centro comercial evitando que o leite cru fique muito tempo sem ser pasteurizado evitando assim desperdícios na produção, (Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria do Desenvolvimento Rural, 1995).

A pasteurização do leite é um processo para eliminar as bactérias que são nocivas à saúde e diminuir a quantidade daquelas que não fazem mal, mas azedam o leite. Esse processamento faz com que o leite aumente sua vida útil e não ofereça ameaça para o consumo humano. Há dois processos principais para fazer a pasteurização. O primeiro (artesanal) expõe de maneira lenta o leite em temperatura mais baixa 65 °C por um período de tempo de 30 minutos. Esse processamento é utilizado em pequenas indústrias, nesse processo o resfriamento deve ser rápido para evitar o crescimento bacteriano. O segundo (industrial) de forma rápida expõe o leite em uma temperatura maior 75 °C por um período de 15 segundos, esse processo é o mais utilizado em indústrias de médio e grande porte. O baixo tempo de processamento nesse tipo de pasteurização foi determinado em função da eliminação da bactéria *Coxieta burnetti* (febre Q) uma das bactérias mais resistentes a altas temperaturas e que pode ser encontrada no leite (VENTURINI; SARCINELLI; SILVA, 2007).

Para a fazer a pasteurização do leite cru são utilizados trocadores de calor, existem vários modelos de trocadores de calor. Nesse contexto esse artigo tem como objetivo determinar o comprimento da tubulação de pasteurização e a potência da bomba necessária para ser utilizada no trocador de calor tubular simples.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Estudando possibilidade de montagem de uma unidade de pasteurização em uma cooperativa de leite, idealizou-se uma unidade com capacidade de processamento de 7.000 l/dia de leite cru oriundos de pequenas propriedades com e sem ordenha mecânica. Os cálculos do trabalho serão realizados em virtude da operação de uma mini usina de pasteurização de leite com trocador de calor por vapor de água, o banco de tubos terá 1,2 cm de diâmetro interno, o vapor irá condensar na parte de fora da tubulação a 1 atmosfera, o leite deverá entrar no tubo a 4 °C e ser aquecido até 72 °C a uma taxa volumétrica de 0,75 L/s.



Para a realização dos cálculos as seguintes hipóteses foram consideradas: 1 - Para efeito de troca térmica a tubulação não será considerada como isolada do ambiente; 2 - Não foi considerado o tempo de retenção do leite na tubulação do trocador de calor; 3 - A tubulação será considerada como cheia de leite; 4 - As propriedades do leite serão consideradas constantes, não há pontos de estagnação na tubulação e a temperatura ambiente será considerada como 25 °C. Para o modelamento matemático foram utilizadas as expressões de 1 a 10. A vazão em massa de escoamento de fluido é apresentada na equação 1.

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (1)$$

Onde:

\dot{m} → é a vazão em massa do escoamento (kg/s).

Q → é a vazão volumétrica do escoamento (m³/s).

ρ → é a massa específica do fluido que está escoando (kg/m³).

O número de Reynolds é dado pela equação 2.

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad (2)$$

Onde:

Re → é o número de Reynolds, grandeza adimensional ela representa a classificação do escoamento (laminar, transição ou turbulento), $Re < 4.000$ – escoamento laminar, $4.000 < Re < 10.000$ transição e $Re > 10.000$ turbulento.

V → é a velocidade de escoamento do fluido (m/s).

D_h → é o diâmetro hidráulico (m).

ν → é a viscosidade cinemática do fluido (Stokes).

Para escoamentos laminar em tubos lisos com a temperatura da superfície constante faz se necessário a utilização do número de Nusselt para a determinação do coeficiente de troca de calor por convecção h . O valor do coeficiente de condutividade térmica k na equação de Nusselt deve ser avaliado em função da temperatura média da massa fluida, ou seja, a média aritmética da temperatura de entrada e saída do fluido na tubulação. (ÇENGEL; GHAJAR, 2012)

A equação de Nusselt é dada pela equação 3.

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (3)$$

Onde:

Nu → é o número de Nusselt, grandeza adimensional.

h → é coeficiente de troca de calor por convecção (W/m².K).



$k \rightarrow$ é o coeficiente de condutividade térmica do material (W/m.K).

$Pr \rightarrow$ é o número de Prandtl, grandeza adimensional.

$D_h \rightarrow$ é o diâmetro hidráulico (m).

Para temperaturas constantes em superfícies de escoamento a variação de temperatura média ΔT_{ln} é dada aproximadamente pela diferença média logarítmica da temperatura, ela é representada pela equação 4.

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_e - \Delta T_i}{\ln(\Delta T_e / \Delta T_i)} \quad (4)$$

Onde:

$\Delta T_{ln} \rightarrow$ é a diferença média logarítmica (K).

ΔT_e e $\Delta T_i \rightarrow$ são as diferenças entre as temperaturas do fluido e da superfície de saída e entrada do tubo (K), respectivamente.

A transferência de calor por convecção é dada pela equação 5.

$$Q_{conv} = h.A_s.\Delta T \quad (5)$$

Onde:

$Q_{conv} \rightarrow$ é a quantidade de calor transferido por convecção (W).

$h \rightarrow$ é coeficiente de troca de calor por convecção (W/m².K).

$A_s \rightarrow$ é a área onde ocorre a transferência de calor (m²).

$\Delta T \rightarrow$ é a variação de temperatura da superfície onde ocorre a transferência de calor e o meio.

A quantidade de calor necessária para elevar a temperatura do fluido é dada pela equação 6.

$$Q_s = \dot{m}.c_p.\Delta T \quad (6)$$

Onde:

$Q_s \rightarrow$ é a quantidade de calor sensível capaz de aumentar a temperatura do fluido (W).

$c_p \rightarrow$ é o calor específico a pressão constante (kJ/kg.K).

$\Delta T \rightarrow$ é a variação de temperatura.

O comprimento da tubulação é dada pela equação 7.

$$L = \frac{Q_s}{Q_{conv}} \quad (7)$$

Onde:

$L \rightarrow$ é o comprimento da tubulação (m).



$Q_s \rightarrow$ é a quantidade de calor sensível capaz de aumentar a temperatura do fluido (W).

$Q_{\text{conv}} \rightarrow$ é a quantidade de calor transferido por convecção (W).

A queda de pressão na tubulação é dada pela equação 8.

$$\Delta P = \frac{f \cdot L \cdot \rho \cdot V^2}{2 \cdot D_h} \quad (8)$$

Onde:

$\Delta P \rightarrow$ é a variação de pressão no escoamento (Pa).

$L \rightarrow$ é comprimento da tubulação (m).

$f \rightarrow$ é o fator de atrito de Darcy, grandeza adimensional.

$V \rightarrow$ é a velocidade de escoamento do fluido (m/s).

$D_h \rightarrow$ é o diâmetro hidráulico (m).

$\rho \rightarrow$ é a massa específica do fluido que está escoando (kg/m^3).

Para escoamento laminar o fator de atrito de Darcy é determinado pela equação 9.

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (9)$$

A potência necessária para vencer a perda de pressão do escoamento é dada pela equação 10.

$$W_B = \frac{\dot{m} \cdot \Delta P}{\rho} \quad (10)$$

Onde:

$W_B \rightarrow$ é a potência desenvolvida pela bomba (W).

$\rho \rightarrow$ é a massa específica do fluido que está escoando (kg/m^3).

$\Delta P \rightarrow$ é a variação de pressão no escoamento (Pa).

$\dot{m} \rightarrow$ é a vazão em massa do escoamento (kg/s).

Outras propriedades foram consideradas na realização dos cálculos, conforme mostra a tabela 2.



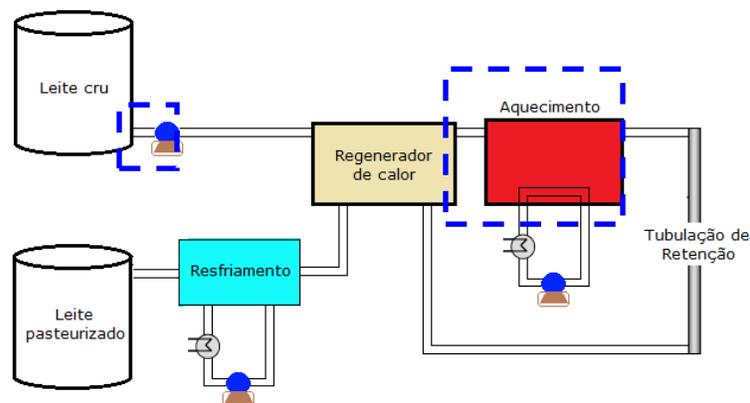
Tabela 2: Propriedades utilizadas no equacionamento dos cálculos.

Massa específica média do leite	1032 kg/m ³
Viscosidade cinemática do leite	2,45 cP
Calor específico a pressão constante do leite	3,925 kJ/kg.K
Coefficiente de condutividade térmica do aço inox 304	9,2 W/m.K
Número de Prandtl	6,62
Calor de vaporização a 1 atm para o vapor saturado	2257kJ/kg

Fonte: Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária, Secretaria do Desenvolvimento Rural, (1995).

Os valores idealizados no que diz respeito à coleta de leite cru juntamente com os dados coletados acerca da produção leiteira foram organizados e analisados matematicamente com as equações propostas para o cálculo dos parâmetros propostos, elas são apresentadas por Çengel e Ghajar (2012). A figura 1 demonstra de forma simplificada as etapas da pasteurização, desde o recebimento até o armazenamento do produto pasteurizado, os cálculos realizados teve como objetivo os locais nas linhas tracejadas em azul.

Figura 1: Esquema simplificado de beneficiamento de leite.



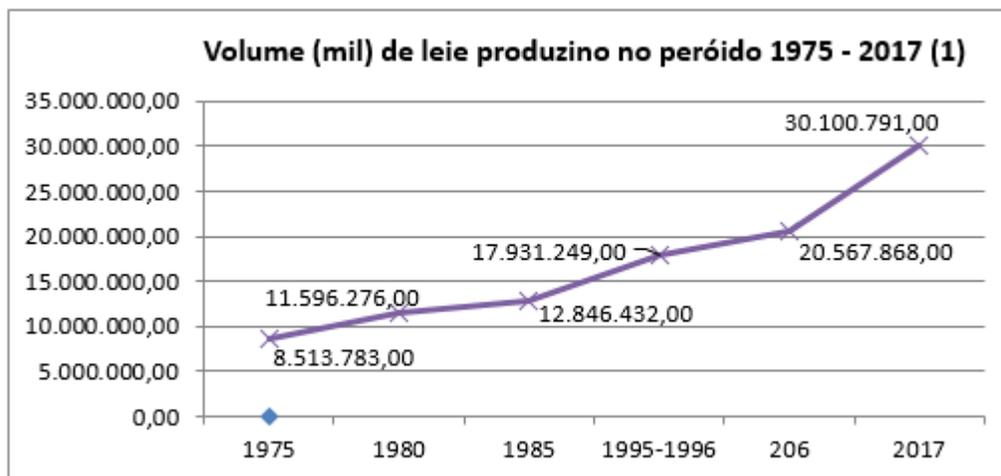
Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar do crescimento na quantidade de leite produzido no período que compreende o ano de 1975 até o primeiro semestre de 2017, segundo dados do IBGE conforme a figura 2, desse total ainda há uma grande quantidade de leite que é consumido e comercializado sem passar pelo processo de pasteurização. Essa falta de processamento do leite acaba sendo prejudicial à economia de determinadas regiões porque boa parte do leite que não é processado acaba ficando impróprio para o consumo.



Figura 2: Produção de leite entre os anos de 1975 – 2017 (1).



Fonte: IBGE, Censos Agropecuários 1975/2017.

Uma maneira de se evitar uma perda significativa na produção leiteira é a construção de mini usinas de processamento de leite. A instalação se faz necessário devido às condições de armazenamento do produto após a ordenha, na maioria dos casos o leite não é armazenado adequadamente, a distância da fonte produtora até os grandes laticínios também influenciam porque quanto maior o caminho percorrido pelo produto maior será a possibilidade de proliferação de bactérias. Outro fator importante é que os pequenos produtores e as pequenas cooperativas estão de olho nesse mercado promissor.

Diante desse cenário e através dos cálculos realizados é possível a construção de um trocador de calor para mini usinas de beneficiamento de leite em pequenas propriedades para que o produtor também possa ser incluído no mercado econômico, gerando renda e também postos de trabalho. Os resultados dos cálculos necessários para a determinação do comprimento de uma tubulação de trocador de calor e a potência necessária da bomba está descrito na tabela 3.



Tabela 3: Resultados obtidos de acordo com os dados de uma mini usina de beneficiamento de leite.

Vazão em massa do escoamento	0,774 kg/s
Velocidade de escoamento	6,63 m/s
Número de Reynolds (escoamento laminar)	3.351,99
Número de Nusselt do projeto	32,38
Diferença de temperatura pela média logarítmica	55,18 °C
Transferência de calor necessária por metro de tubulação	51,641 kW
Taxa de calor necessária para elevar a temperatura do leite de 4 °C até 72 °C	206,58 kW
Comprimento da tubulação	4 m
Fator de atrito do escoamento	0,019
Queda de pressão em cada tubulação	144,355 kPa
Potência necessária pela bomba por tubulação	108,266 W

Fonte: Autor.

5. CONCLUSÃO

Em função da quantidade de leite que ainda é comercializado sem o devido tratamento é possível a inserção de unidades de pasteurização em pequenas propriedades rurais e cooperativas uma vez que não demanda uma quantidade expressiva de maquinário e nenhum equipamento específico. Com isso foi possível a determinação do comprimento da tubulação de um trocador de calor e a potência da bomba necessária para bombear o leite no processo de pasteurização. Estudos futuros para o desenvolvimento completo do sistema de pasteurização poderão ser realizados como por exemplo em função do número ideal de unidades de transferência (NUT), aplicação de outro modelo de trocador de calor como o sistema contra corrente. Diante disso é possível a implantação de mini usinas de processamento de leite sem a necessidade de equipamentos complexos, a implementação desse empreendimento traz benefícios econômicos podendo aumentar a venda de produtos derivados do leite e benefícios na saúde com o consumo de produtos saudáveis.



6. REFERÊNCIAS

- BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. **Fenômenos de Transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC-GEN, 2002. 838 p.
- BORTOLETO, Eloisa E. et al. **Leite: realidade e perspectivas**. São Paulo: SAA, 1997. 95p. (Coleção Cadeias de Produção da Agricultura, 3).
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de Calor e Massa Uma abordagem prática**. Porto Alegre: McGrawHill, 2012.
- CHARLES, Hibbeler R. **Mecânica dos Fluidos**. 1. ed. São Paulo: PEARSON, 2016. 818 p.
- FREEDMAN, Roger A.; YOUNG, Hugh D. **Física II: Termodinâmica e ondas**. 12. ed. São Paulo: PEARSON, 2008. 309 p.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, DO ABASTECIMENTO E DA REFORMA AGRÁRIA, SECRETARIA DO DESENVOLVIMENTO RURAL. **Mini-usina de pasteurização de leite**. Brasília: [s. n.], 1995.
- MORAN, Michel J. & SHAPIRO, Howard N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 4ª edição. LTC. 2002.
- MORICOCCHI, Luiz et al. Produção de leite no estado de São Paulo: potencial tecnológico. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.41, t.2, p.141-157, 1994.
- NORONHA, José F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 1987. 269p.
- POTTER, Merle C.; SCOTT, Elaine P. **Ciências Térmicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor**. 1. ed. São Paulo: THOMSON, 2007. 772 p.
- VENTURINI, Katiani S; SARCINELLI, Miryelle F; SILVA, Luís C. **Processamento do leite**. Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Programa Institucional de Extensão – Boletim Técnico – PIE-UFES; 02207, 2007.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Quantidade de leite cru adquirido e industrializado e variação, segundo os meses - Brasil - 2018 - 2019**. [S. l.], 1. sem. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9209-pesquisa-trimestral-do-leite.html?=&t=resultados>>. Acesso em: 6 jul. 2019.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário**. [S. l.], 1. sem. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuaria.html?edicao=21858&t=sobre>>. Acesso em: 6 jul. 2019.
-



III ENCONTRO DE
DESENVOLVIMENTO DE
PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS
Uniube - UFTM - IFTM

BOJANIC, Alan. Iniciativa regional da FAO aponta agricultura familiar como promotora do desenvolvimento rural sustentável e a agenda 2030. FAO, [S. 1.], 3 out. 2017. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1043666/>>. Acesso em: 6 jul. 2019.

ZOCCAL, Rosangela. **Leite: alimento básico para a saúde**. Embrapa - Rede de pesquisa e inovação em leite, [S. 1.], 21 maio 2010. Disponível em: <<http://www.repilite.com.br/profiles/blogs/leite-alimento-basico-para-a>>. Acesso em: 6 jul. 2019