

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA PRODUÇÃO DE VINHOS

Marcos Smaniotto Slomp, marcosslomp@gmail.com¹
Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS.

Resumo: O propósito deste trabalho foi projetar e dimensionar um sistema de refrigeração voltado para os pequenos e médios produtores de vinhos, uma vez que é versátil e de baixo custo, podendo ser diretamente utilizado em tanques para vinificação já existentes nas vinícolas. Alguns dos parâmetros calculados para o dimensionamento do sistema foram: carga térmica, coeficiente convectivo, resistência térmica, potência do compressor, entre outros. Será demonstrada a concepção final do projeto em software de CAD. Após o desenvolvimento do projeto, concluiu-se que este é viável.

Palavras-chave: sistema de refrigeração, serpentina, vinificação, fermentação, estabilização.

1. INTRODUÇÃO

O vinho é uma das bebidas mais apreciadas ao longo da história e uma das primeiras criações da humanidade. No Brasil, a Serra Gaúcha, situada no nordeste do Rio Grande do Sul, destaca-se na produção de vinhos e na qualidade de seus produtos. Segundo o Instituto Brasileiro do Vinho - Ibravin - (2017), a Serra Gaúcha é responsável por 85% da produção de vinhos nacionais e é considerada a mais importante região vinícola do país. Desde o início, a produção vinícola teve influência direta e significativa sobre a economia, tanto da região quanto do país, uma vez que movimentou desde os trabalhadores envolvidos na atividade de produção até os turistas.

Com a globalização, este mercado está cada vez mais concorrido e para garantir a sobrevivência, especialmente das pequenas vinícolas, é fundamental que o produto tenha um custo coerente. Uma vez que o produtor encontre uma forma de garantir a qualidade de seus produtos, de uma forma simples e barata, estará agregando valor ao seu trabalho, garantindo a sua permanência no ramo.

A obtenção de um bom vinho não depende única e exclusivamente da qualidade das uvas visto que o processo de vinificação é composto por várias etapas, que podem influenciar diretamente a qualidade do produto final. O controle da temperatura durante a fabricação do vinho é importante em várias etapas. Um desses processos é a fermentação, que segundo Boulton *et al.* (1995) transforma os açúcares naturais do suco de uva em álcool e dióxido de carbono através de reações químicas exotérmicas com leveduras, resultando no vinho. Conforme Chaves (2007), o principal problema da fermentação é conseguir manter o controle da temperatura, uma vez que uma temperatura elevada inibe a ação das leveduras, bloqueando a fermentação e comprometendo a qualidade do vinho.

Segundo Calderón e Navascués (2002), quando ela ocorre em uma temperatura controlada, permite preservar o aroma das uvas, além de evitar paradas nesse processo. Boulton *et al.* (1995) ainda afirmam que o manejo correto da temperatura permite a formação de níveis maiores de álcool no produto final. Esse controle é importante, pois permite diminuir a quantidade de açúcar de cana adicionado ao mosto, especialmente na região sul do Brasil porque devido a fatores climáticos, a quantidade original de açúcares presentes nas uvas normalmente não é suficiente para a obtenção da graduação alcoólica considerada ideal.

Outro processo que requer um controle da temperatura é a estabilização do vinho. Após a fermentação, partículas presentes no mosto resultantes das ações das leveduras ficam suspensas no vinho, sendo necessário o seu depósito nos barris ou cubas. Essa estabilização pode ocorrer naturalmente com as baixas temperaturas do inverno, por meio da filtragem ou por sistemas de refrigeração artificiais. Caso essa etapa não seja realizada com êxito, pode ocorrer a formação de precipitados no fundo das garrafas, que conforme Boulton *et al.* (1995), é vista pelos consumidores como indicação de baixa qualidade do produto. A aplicação do sistema de refrigeração consegue acelerar essa etapa da produção e permitir um menor tempo entre a fermentação e o envase do produto final.

Os sistemas de refrigeração são considerados um significativo avanço para o controle dos fatores ambientais. Segundo Eich e Loris (2013), a refrigeração permite diminuir a temperatura de certos ambientes de forma controlada, atuando na viabilização de processos, para conservar produtos e para proporcionar um conforto térmico. Conforme Stoecker e Jones (1985), o ciclo de compressão a vapor é o mais utilizado na prática; nele, o vapor é comprimido e condensado, tendo sua pressão diminuída de modo que o fluido possa evaporar a baixa pressão. Para retirar o calor pela expansão do fluido refrigerante, é necessário um trocador de calor. Visou-se utilizar um trocador de

calor tipo serpentina, uma vez que para Silva Júnior (2015), o trocador tubular tipo serpentina apresenta uma alta taxa de transferência de calor e tem a vantagem de apresentar uma grande área superficial para um espaço reduzido.

Para a refrigeração em altas escalas, as vinícolas normalmente optam por utilizar sistemas com cubas de aço inoxidável com cintas de refrigeração, que requerem altos investimentos ou optam por trocadores bi tubulares externamente às cubas. Os pequenos produtores optam, em sua maioria, por não utilizar esses sistemas, de modo a deixar a fermentação e a estabilização ocorrerem naturalmente.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo o projeto de um sistema de resfriamento por serpentina no processo de fermentação e estabilização do vinho. No decorrer deste trabalho, foi demonstrado o dimensionamento, a concepção do trocador de calor tipo serpentina e a seleção dos itens base para a correta fabricação do sistema. Os quesitos sociais e econômicos também foram levados em conta, uma vez que o projeto em questão deverá ser facilmente adaptável aos tanques de fermentação já existentes, inclusive aos de madeira, especialmente nas vinícolas de pequeno e médio porte, além de ser um utensílio de baixo custo, acessível a todos.

Como diferencial aos sistemas já existentes, esse novo projeto permitiu a inversão do sentido do fluxo do refrigerante que circula na serpentina; dessa forma, não ocorre agitação através das correntes convectivas no vinho na estabilização. Já na fermentação, em contrapartida, a agitação do vinho é benéfica, podendo ser mais facilmente alcançada com esse projeto. Com isso, a qualidade do produto final pode ser elevada de forma simples.

Após a concepção inicial do equipamento, foi realizado o cálculo da carga térmica na fermentação e na estabilização do vinho, seleção do caso que necessita maior carga de refrigeração, cálculo do coeficiente global de transferência de calor da serpentina e seu dimensionamento, seleção dos equipamentos comerciais e demonstração do desenho técnico do projeto.

2. DESENVOLVIMENTO

O sistema proposto por este trabalho constitui-se de um dispositivo capaz de resfriar o produto da uva durante a fermentação alcoólica e a estabilização do vinho. Com o enfoque nas pequenas vinícolas, buscou-se um equipamento versátil para ser inserido e retirado das cubas já existentes. Para o dimensionamento, adotou-se como parâmetro a utilização de cubas de madeira com capacidade de 5 m³ (5000 litros) com portas de visita superior de aproximadamente 0.4m x 0.4m.

Para absorver o calor do mosto e do vinho, optou-se por utilizar um trocador de calor do tipo serpentina que será inserido no interior das cubas. Como fluido de refrigeração, utilizou-se etanol, que por meio de uma bomba circulará pela serpentina e por um outro trocador de calor anexo a uma unidade de refrigeração que utilizará gás R22, conforme representado na Fig. 1. A seleção do fluido é decorrente da análise de possíveis vazamentos, uma vez que caso ocorra esse incidente em pequena escala durante a utilização do equipamento, não haverá risco à saúde de seus consumidores, visto que o etanol já está presente no produto em fabricação. A escolha do material da serpentina levou em conta a utilização de um material de custo mais acessível e resistente comparado a materiais necessários no caso de uso de gás ao invés de líquido à pressão ambiente.

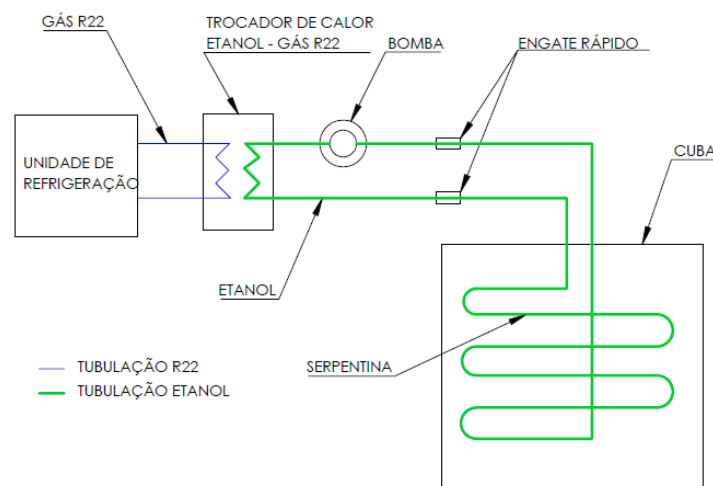


Figura 1. Representação do sistema de refrigeração proposto.

A seguir, serão apresentados itens subsequentes à escolha do fluido de refrigeração, iniciando pela demonstração do cálculo de carga térmica na fermentação. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, cada tópico será aprofundado conforme os parâmetros iniciais estipulados. Serão utilizados métodos semi empíricos sugeridos por Incropera *et al.* (2008) e hipóteses simplificadoras para a obtenção de resultados fidedignos à realidade.

2.1. Cálculo da Carga Térmica na Fermentação

Na busca do controle da temperatura na fermentação, faz-se necessário determinar a temperatura indicada e quantidade de calor liberado nessa reação química. Segundo Calderón e Navascués (2002), a temperatura ideal na fermentação de vinhos tintos é de 28 °C a 30 °C; no caso de vinhos brancos, indica-se uma faixa de temperaturas logo abaixo dos 20 °C. Boulton *et al.* (1995) afirmam que o calor liberado na fermentação de um mosto com 22 Brix (escala da quantidade aproximada de açúcar na solução) corresponde à 133 MJ/m³; contudo, aproximadamente 10% desse calor é liberado do mosto na forma de vapor proveniente da fermentação. Boulton ainda recomenda utilizar para o cálculo do sistema de refrigeração a quantia de 120 MJ/m³ de calor liberado para o caso de 22 Brix.

Para determinar a taxa total de calor liberado na fermentação, considerando o tanque isolado, utiliza-se a Eq. (1).

$$Q = \frac{q V}{t} \quad (1)$$

Onde:

Q = taxa de calor total liberado na fermentação [W];

q = quantia de calor liberado [MJ/m³];

V = volume [m³];

t = tempo [s].

Para iniciar o dimensionamento, substituem-se os valores de $q = 120 \text{ MJ/m}^3$ e $V = 5 \text{ m}^3$ na Eq. (1). Sabendo que a fermentação ocorre de 4 à 6 dias, sendo o caso mais crítico de 4 dias, correspondente a 345600 segundos, obtém-se uma taxa de calor liberado de 1736.1 W.

Devido à temperatura média do verão ser em torno de 30 °C, é necessário considerar a taxa de calor transferido do meio ambiente para o tanque, pois no caso mais crítico a temperatura recomendada de fermentação é de 20 °C. Segundo Stoecker e Jones (1985), essa taxa de troca de calor, desconsiderando a radiação, pode ser obtida pela Eq. (2).

$$Q = \frac{\Delta T A}{R} \quad (2)$$

Onde:

Q = taxa de transferência de calor [W];

ΔT = variação da temperatura [°C];

A = área superficial [m²];

R = resistência térmica total [m²°C/W].

Para uma cuba de madeira com espessura de 40 mm, considera-se a resistência térmica como a soma da resistência proveniente da película de ar externa do tanque (convecção) e da resistência da madeira (condução), que segundo Stoecker e Jones (1985), correspondem a 0.029 m²°C/W e 0.2524 m²°C/W, respectivamente. Então, obtém-se uma resistência total de 0.2814 m²°C/W.

Considerando um tanque cilíndrico de madeira com diâmetro externo e altura de 1.85 m, através da Eq. (3), é possível determinar a sua área externa de troca de calor.

$$A = 2\pi r h + 2\pi r^2 \quad (3)$$

Onde:

A = área [m²];

r = raio [m]

h = altura [m].

Substituindo os valores acima citados, encontra-se uma área de 16.13 m². Sabendo que a diferença de temperatura crítica é de 10 °C, substituem-se os valores na Eq. (2), obtendo-se uma taxa de transmissão de calor de 573.2 W. Ao somar esse último valor obtido à taxa de calor da fermentação, obtém-se a taxa total de transferência de calor de 2309.3 W.

2.2. Cálculo da Carga Térmica na Estabilização

Para o cálculo da carga térmica da refrigeração na estabilização é necessário conhecer o calor específico do vinho. Segundo Calderón e Navascués (2002), para esse caso, esse valor é aproximadamente 4.50 KJ/Kg°C, acrescentando ainda que a temperatura ideal para esse processo é de 0 °C. Boulton *et al.* (1995) considera que a densidade do vinho é 990 kg/m³. Para Incropera *et al.* (2008), a taxa de calor proveniente pode ser obtida pela Eq. (4).

$$Q = \frac{\rho V c \Delta T}{t} \quad (4)$$

Onde:

Q = taxa de transferência de calor [W];

ρ = densidade [kg/m³];

V = volume [m³];

c = calor específico [kJ/kg°C];

ΔT = variação da temperatura [°C];

t = tempo [s].

Ao se considerar o vinho inicialmente à 30°C refrigerando até 0°C em um período de 5 dias - correspondente a 432000 segundos -, e substituindo os valores na Eq. (4), obtém-se uma taxa de transferência de calor de 1933.6 W.

Para garantir o correto funcionamento do sistema, é necessário que o calor transferido para o vinho na condição mais crítica de 0°C não seja superior à capacidade de refrigeração do sistema. Para o cálculo dessa transmissão, utiliza-se a Eq. (2), aplicada em uma diferença de temperatura (ΔT) de 30 °C. Como resultado, encontra-se uma taxa de 1719.6 W.

2.3. Determinação da Vazão Volumétrica de Etanol e suas Propriedades

Para o correto dimensionamento, é necessário obter a vazão volumétrica mínima do fluido refrigerante secundário - etanol - para que a troca de calor ocorra. Nos cálculos a seguir, considerou-se como condição de análise a taxa de transferência de calor na fermentação, visto que é o caso o qual apresenta o valor mais significativo nesse quesito. Da mesma forma, também foi utilizada a temperatura na estabilização, uma vez que é a maior variação de temperatura. Assim, adotou-se como parâmetro o caso mais crítico - no qual o produto está próximo de 0°C - em que a temperatura de entrada e de saída da serpentina correspondem a -5°C e 5°C, respectivamente. Vale ressaltar que nas demais situações de resfriamento, a vazão volumétrica do etanol necessária será menor do que a obtida nesse caso.

De acordo com Perry *et al.* (1997), as propriedades do etanol a 0°C estão apresentadas na Tab. 1 abaixo.

Tabela 1. Propriedades do etanol a 0°C.

Propriedade	Valor
Calor específico (kJ/kg K)	2.2481
Viscosidade dinâmica (Pa s)	1813.45×10 ⁻⁶
Condutividade térmica (W/mK)	0.1724
Volume específico (m ³ /kg)	0.001212

Pode-se reescrever a Eq. (4), resultando na Eq. (5).

$$Q = \rho v' c \Delta T \quad (5)$$

Onde:

Q = taxa de transferência de calor [W];

ρ = densidade [kg/m³];

v' = vazão volumétrica [m³/s];

c = calor específico [J/kg°C];

ΔT = variação da temperatura [°C];

Dessa forma, chega-se em uma vazão volumétrica de 1.245×10⁻⁴ m³/s. Com esse resultado associado ao tubo de aço inoxidável de diâmetro externo de 19.05 mm e espessura de 1 mm utilizado na serpentina, chega-se a uma área transversal de 2.283 ×10⁻⁴ m². Consequentemente, dividindo a vazão volumétrica encontrada pela área transversal da serpentina, obtém-se o valor de 0.545 m/s para a velocidade mínima do fluido.

Ao se analisar o número de Reynolds pela Eq. (6) para o valor mínimo encontrado para a velocidade, observa-se que se trata de um escoamento em transição de laminar para turbulento, uma vez que o número de Reynolds é 4227.78 nessas condições. Todavia, conforme Incropera *et al.* (2008), um escoamento turbulento apresenta maior taxa de transferência de calor em comparação ao escoamento laminar; dessa forma, o número de Reynolds foi aumentado de tal forma que se tornasse um escoamento plenamente turbulento que resulta em uma maior taxa de troca de calor - 15514.80 -, resultando, por fim, em uma velocidade de 2 m/s.

$$Re(d) = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (6)$$

Onde:

$Re(d)$ = número de Reynolds;

ρ = densidade [kg/m^3];

V = velocidade média do escoamento [m/s];

d = diâmetro interno do tubo [m];

μ = viscosidade dinâmica [$Pa \cdot s$].

2.4. Determinação do Coeficiente Convectivo Interno à Serpentina

Segundo Kern (1980), os coeficientes do interior do tubo da serpentina são em torno de 20% maiores que os coeficientes referentes a um tubo reto devido ao aumento da turbulência. Diante disso, utilizar-se-ão correlações para tubos retos de forma conservativa.

Uma das maneiras de se encontrar o valor do coeficiente convectivo (h) é pelo número de Nusselt. Todavia, como para encontrar esse número é necessário também o número de Prandtl, os dois serão calculados em sequência. Na Eq. (7) está apresentado o número de Prandtl, demonstrado por Incropera *et al.* (2008).

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (7)$$

Onde:

Pr = número de Prandtl;

C_p = calor específico [$J/kg \cdot ^\circ C$];

μ = viscosidade dinâmica [$Pa \cdot s$];

k = condutividade térmica [W/mK].

O autor ainda afirma que para o caso de escoamento turbulento em tubo circular liso, o número de Nusselt é obtido pela correlação semi empírica demonstrada na Eq. (8).

$$Nu(d) = 0.023 Re(d)^{0.8} Pr^n \quad (8)$$

Onde:

$Nu(d)$ = número de Nusselt;

$Re(d)$ = número de Reynolds;

Pr = número de Prandtl;

n = coeficiente, sendo $n = 0.4$ para aquecimento e $n = 0.3$ para resfriamento.

Dessa forma, para o resfriamento, obtém-se como resultado 133.80 para o número de Nusselt. Com base nesse valor, o coeficiente convectivo é encontrado rearranjando a Eq. (9).

$$Nu(d) = \frac{h d}{k} \quad (9)$$

Onde:

$Nu(d)$ = número de Nusselt;

h = coeficiente convectivo [$W/m^2 \cdot K$];

d = diâmetro do tubo [m];

k = condutividade térmica [W/mK].

Como resultado, foi encontrado o valor 1352.91 $W/m^2 \cdot K$ para o coeficiente convectivo.

2.5. Determinação do Coeficiente Convectivo Externo à Serpentina

Na determinação do coeficiente convectivo externo à serpentina, Kern (1980) indica que para o caso de fluido sem agitações mecânicas, deve-se utilizar as correlações empíricas de convecção natural em escoamento externo para cilindro horizontal longo. Dessa forma irá se estimar o coeficiente convectivo a partir da metodologia sugerida por Incropera *et al.* (2008). Contudo, será necessário obter as propriedades para o vinho em tal situação; Boulton *et al.* (1995) sugere que, para este caso, deve-se utilizar as propriedades apresentadas na Tab. 2 que resultarão em uma boa aproximação para o dimensionamento do sistema de refrigeração, uma vez que essas propriedades variam com inúmeros fatores.

Tabela 2. Propriedades do vinho. Boulton *et al.* (1995).

Propriedade	Valor
Calor específico (kJ/kg K)	4.50
Viscosidade dinâmica (Pa s)	1.55×10^{-3}
Condutividade térmica (W/mK)	0.536
Densidade (kg/m ³)	990

Uma vez estabelecidos os valores para as propriedades do vinho, pode-se obter a viscosidade cinemática que, segundo Incropera *et al.* (2008), é calculada através da Eq. (10).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (10)$$

Onde:

ν = viscosidade cinemática [m²/s];

μ = viscosidade dinâmica [Pa s];

ρ = densidade [kg/m³].

O resultado dessa equação é a viscosidade cinemática (1.566×10^{-6} m²/s). Outra propriedade necessária para a determinação do coeficiente convectivo é a difusividade térmica que, segundo Incropera *et al.* (2008), pode ser calculada pela Eq. (11).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (11)$$

Onde:

α = difusividade térmica [m²/s];

k = condutividade térmica [W/mK];

C_p = calor específico [J/kg °C];

ρ = densidade [kg/m³].

Dessa forma, o valor para a difusividade térmica é 1.203×10^{-7} m²/s. Assim, com base na metodologia adotada por Incropera *et al.* (2008), será utilizada a Eq. (12) que indica o número de Rayleigh.

$$Ra(d) = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) D^3}{\nu \alpha} \quad (12)$$

Onde:

$Ra(d)$ = número de Rayleigh;

g = aceleração da gravidade [m/s²];

β = coeficiente de expansão volumétrica térmica [1/K];

T_s = temperatura da superfície [°C];

T_∞ = temperatura do meio [°C];

ν = viscosidade cinemática [m²/s];

α = difusividade térmica [m²/s].

Considerando os parâmetros já determinados anteriormente para uma diferença de temperatura de -5 °C à 5°C para a situação mais crítica - usando o coeficiente de expansão volumétrica térmica (32.74×10^{-6} 1/K) da água, uma vez que os resultados não apresentarão discrepâncias significativas -, obtém-se como resultado um valor de número de Rayleigh de 11.786×10^4 . Através da Eq. (7), para esse caso, pode-se determinar o número de Prandtl ao utilizar as propriedades do fluido determinadas anteriormente e, por consequência, obtém-se o valor 13.01.

Assim, para o caso de convecção natural aplicada a esse caso, Incropera *et al.* (2008) indica uma correlação para a obtenção do número de Nusselt representada pela Eq. (13).

$$Nu(d) = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra(d)^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.599}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right]^2 \quad (13)$$

Onde:

$Nu(d)$ = número de Nusselt;

Pr = número de Prandtl;

$Ra(d)$ = número de Rayleigh.

Por este meio, através da Eq. (13), chega-se a um número de Nusselt de 10.154. Substituindo esse valor na Eq. (9) e rearranjando-a de modo a isolar o coeficiente convectivo e sabendo que o diâmetro externo do tubo corresponde a 19.05 mm, obtém-se um valor de coeficiente convectivo externo de 285.698 W/m² K.

2.6. Resistência Térmica da Condução no Tubo de Aço Inoxidável

Para a serpentina, definiu-se como material utilizado para a sua construção aço inoxidável AISI 304. Essa escolha é devido à indicação desse material para o ramo alimentício, uma vez que é considerado inerte, sendo um dos materiais mais indicados para o manuseio do vinho; todavia, sua condutividade térmica é pequena quando comparada ao aço 1020, por exemplo. Interpolando os valores fornecidos por Incropera *et al.* (2008), obtém-se uma condutividade térmica de 14.8 W/mK.

2.7. Determinação da Resistência Térmica Total do Sistema

Na busca pela obtenção dos parâmetros necessários para o dimensionamento do sistema, é preciso conhecer a resistência térmica total. Essa resistência total é obtida pela soma de cada etapa, conforme representado na Fig. 2.

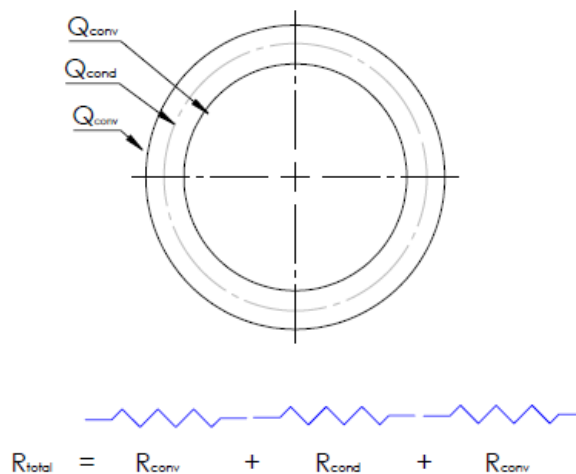


Figura 2. Representação da resistência total na seção transversal do tubo.

Assim, a resistência total pode ser obtida pela Eq. (14), conforme Incropera *et al.* (2008).

$$Rt = \left[\frac{1}{hi} + \frac{L}{k} + \frac{1}{he} \right] \quad (14)$$

Onde:

Rt = resistência térmica [m²K/W];

k = condutividade térmica [W/mK];

L = espessura [m];

he = coeficiente convectivo externo [W/m²K];

hi = coeficiente convectivo interno [W/m²K].

Substituindo os valores obtidos e considerando a parede do tubo de inox de 1 mm, consegue-se chegar em um valor de resistência térmica total de 4.307×10^{-3} m²K/W.

2.8. Determinação do Comprimento da Serpentina

Como meio para determinar o comprimento necessário para a serpentina de modo que a taxa de transferência de calor necessária seja atingida, é preciso calcular a área de troca térmica. Kern (1980) sugere utilizar o perímetro do diâmetro externo do tubo. Assim, a área de troca pode ser descrita pela Eq. (15).

$$A = \pi D l \quad (15)$$

Onde:

A = área de troca térmica [m²];
D = diâmetro externo [m];
l = comprimento [m].

Segundo Stoecker e Jones (1985), a transmissão de calor através da resistência térmica total é descrita pela Eq. (16).

$$Q = \frac{A \Delta T}{R_t} \quad (16)$$

Onde:

Q = taxa de transferência de calor [W]
A = área de troca térmica [m²];
 ΔT = variação de temperatura [°C];
R_t = resistência térmica total [m²K/W].

Assim, aplica-se a Eq. (15) na Eq. (16) e se rearranja-as de modo a se isolar o comprimento. Ao se considerar uma taxa de calor de 2309.3 W, em uma diferença de temperatura de 10 °C, em um tubo de diâmetro externo de 19.05 mm e utilizando a resistência encontrada anteriormente, obtém-se um comprimento total de serpentina de 17.54 m. Para que o equipamento seja adaptável para o tanque proposto, tem-se como diâmetro de espira máximo da serpentina 1.2 m. Com base no comprimento calculado, serão necessárias 4.6 espiras no trocador de calor.

2.9. Determinação da Potência Teórica do Compressor

Para o correto dimensionamento e seleção dos componentes é necessário conhecer a potência do compressor da unidade de refrigeração. Como definido anteriormente, o fluido selecionado no sistema de compressão a vapor foi o gás R22, devido a suas propriedades térmicas e sua larga utilização em sistemas de refrigeração. Considerou-se a temperatura de -8 °C para o evaporador e uma temperatura de 40 °C para o condensador. Retirando os valores de entropia e entalpia de Stoecker e Jones (1985), foi possível adaptar o diagrama pressão-entalpia, demonstrado na Fig. 3, com o objetivo de determinar a potência.

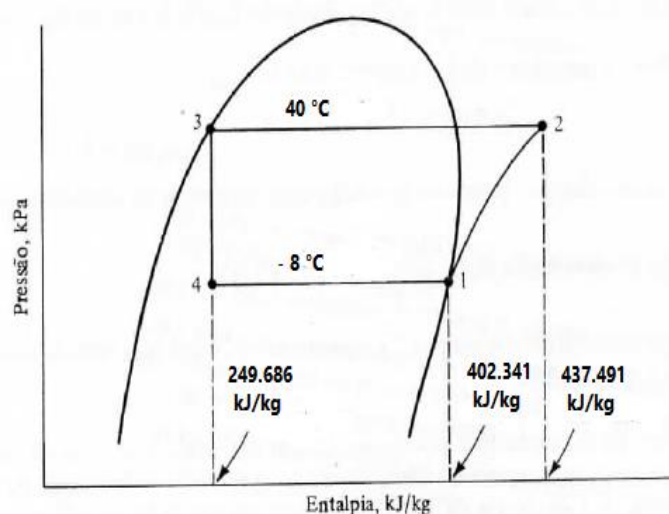


Figura 3. Diagrama pressão-entalpia do ciclo de compressão a vapor.

Com os valores do diagrama é possível calcular o efeito de refrigeração. Segundo Stoecker e Jones (1985), para o cálculo desse fenômeno deve-se utilizar a Eq. (17).

$$E_f = h_1 - h_4 \quad (17)$$

Onde:

E_f = efeito de refrigeração [kJ/kg];
 h_1 = entalpia do vapor saturado [kJ/kg];
 h_4 = entalpia líquido saturado [kJ/kg].

Assim, é possível chegar em um efeito de refrigeração total de 152.655 kJ/kg. Com esse resultado, pode-se determinar a vazão necessária do refrigerante através da Eq. (18) - esse valor é importante para a seleção da válvula de expansão, responsável por resfriar o fluido refrigerante na saída da unidade de refrigeração.

$$vz = \frac{Q}{E_f} \quad (18)$$

Onde:

vz = vazão de refrigerante [kg/s];
 Q = taxa de transferência de calor [kW];
 E_f = efeito de refrigeração [kJ/kg].

A partir dos valores anteriores, consegue-se determinar uma vazão de 0.0151 kg/s de fluido refrigerante. Substituindo esse valor na Eq. (19), consegue-se calcular a potência teórica do compressor.

$$Pot = vz (h_2 - h_1) \quad (19)$$

Onde:

Pot = potência teórica do compressor [kw];
 vz = vazão de refrigerante [kg/s];
 h_2 = entalpia do vapor superaquecido [kJ/kg];
 h_1 = entalpia líquido saturado [kJ/kg].

Então, a potência teórica do compressor necessária para o correto funcionamento do sistema é 530.76 W.

2.10. Perda de Carga na Tubulação de Etanol

Para a seleção da bomba que realizará a circulação do etanol é necessário conhecer a perda de carga do sistema. Os elementos que gerarão perda de carga no circuito de etanol nesse projeto são: a tubulação, o trocador de calor, as válvulas de engate rápido e os cotovelos de 90°. Na ligação entre o trocador de calor e a serpentina se optou por utilizar tubulação flexível polimérica atóxica. A perda de carga nas tubulações, segundo Fox *et al.* (2011), pode ser obtida pela Eq. (20).

$$\Delta P = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{v^2}{2} \right) \rho \quad (20)$$

Onde:

ΔP = perda de carga [Pa];
 f = fator de atrito;
 L = comprimento total da tubulação [m];
 D = diâmetro da tubulação [m];
 v = velocidade média do fluxo [m/s];
 ρ = densidade [kg/m³].

No cálculo da perda de carga, considerou-se o diâmetro interno da tubulação de 17.05 mm e toda a extensão da tubulação com um fator de atrito de 0.0265, obtido através do diagrama de Moody com um comprimento total de tubulação flexível de 10 m, que somado ao comprimento da serpentina resulta em 27.54 m. O comprimento equivalente devido aos 11 cotovelos de 90° ao longo da tubulação corresponde à 6.29 m. Por meio destas considerações e das variáveis determinadas anteriormente, obtém-se uma queda de pressão de 85.13 kPa.

Na válvula de engate rápido, selecionou-se um modelo com dupla retenção da marca PCL modelo 40, o qual, segundo o fabricante PCL (2017), apresenta a perda de carga de 6.90 kPa. No projeto serão utilizadas 2 válvulas,

resultando em 13.80 kPa. Para retirar o calor do etanol e transferi-lo para o gás R22 foi selecionado o trocador de calor de placas da marca Danfoss modelo B3-030-10-3.0-HQ. Segundo Danfoss (2017), a queda de pressão nesse produto é de 47 KPa. Obtém-se como resultado da soma das perdas de carga um valor total de 145.93 KPa.

2.11. Seleção dos Componentes

Através do dimensionamento realizado, optou-se por utilizar um fator de segurança para garantir o correto funcionamento do conjunto. Visando futuras ampliações, optou-se por uma unidade de refrigeração de 1 HP de potência. Já para transferir o calor do etanol para o refrigerante R22, optou-se pelo trocador do tipo de placas. A válvula de expansão foi selecionada com base na vazão e potência do sistema - do mesmo modo selecionou-se a motobomba centrífuga. Para inverter o sentido do fluxo na serpentina, visto que no processo de estabilização é benéfico que o vinho fique estático e na fermentação é melhor que ocorra a sua agitação, adicionaram-se válvulas de engate rápido ao sistema. Os principais itens selecionados estão representados na Fig. 4.



Componentes Selecionados					
Produto	Especificação	Produto	Especificação	Produto	Especificação
	Unidade de refrigeração 1HP		Válvula de expansão		Trocador de placa
	Motobomba Centrífuga Monoestágio 1/2 CV		Engate rápido retenção		Refrigerante R22

Figura 4. Representação dos itens selecionados para o projeto.

A partir dos componentes escolhidos, realizou-se um levantamento de preço aproximado dos equipamentos. Os preços dos produtos em questão estão baseados no valor de mercado do terceiro trimestre de 2017. Os valores médios estão representados na Tab. 3.

Tabela 3. Componentes do sistema com seus respectivos valores de mercado.

Modelo	Quantidade	Valor (R\$)
Unidade de refrigeração 1HP [UN]	1	1860,00
Trocador de placas Danfoss: BHPE - Modelo: B3-030-10-3.0-HQ [UN]	1	1000,00
Válvula de expansão Danfoss T2/02 [UN]	1	500,00
Tubo 3/4" INOX - AISI 304 [m]	27.54	710,01
Tubo 3/4" polimérico flexível atóxico [m]	10.00	360,00
Engate rápido PCL 40 com retenção [UN]	2	90,00
Motobomba centrífuga monoestágio 1/2CV [UN]	1	419,99
Gás R22 750g [UN]	1	50,00
Reservatório [UN]	1	50,00
Curvas 90° [UN]	11	44,00
Tubulação de cobre 3/8" [m]	2	14,00
Tubulação de cobre 1/2" [m]	1	12,00
Sistema eletrônico de controle da temperatura [UN]	1	200,00
TOTAL		5320,00

2.12. Projeto

Após o dimensionamento e a seleção dos equipamentos do sistema de refrigeração será demonstrada a modelagem do projeto em software de desenho assistido por computador (CAD) e o detalhamento técnico do mesmo. Assim, é possível se analisar a montagem e a disposição dos equipamentos. Na Fig. 5 é demonstrada a vista do equipamento desenvolvido no local de operação e seus principais componentes.

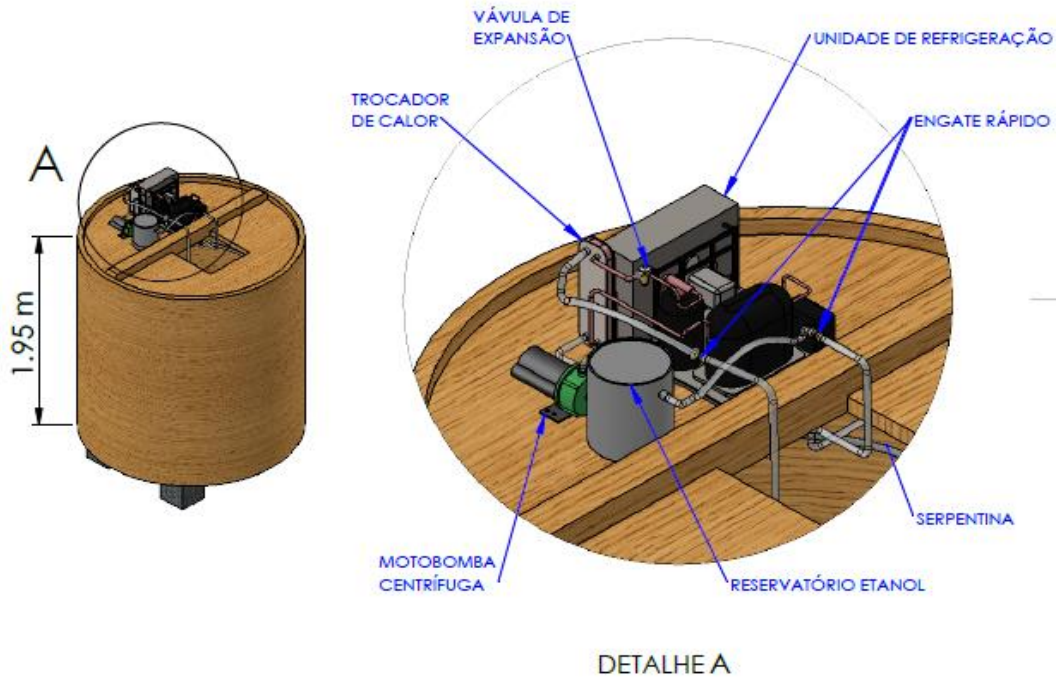


Figura 5. Representação do equipamento.

A unidade de refrigeração e seus acessórios devem ser montados conforme demonstrado na Fig. 6. Para a montagem do sistema, é necessário realizar a solda da tubulação de cobre por brasagem. Na tubulação flexível de polímero é realizada a união com abraçadeiras e conexões poliméricas.

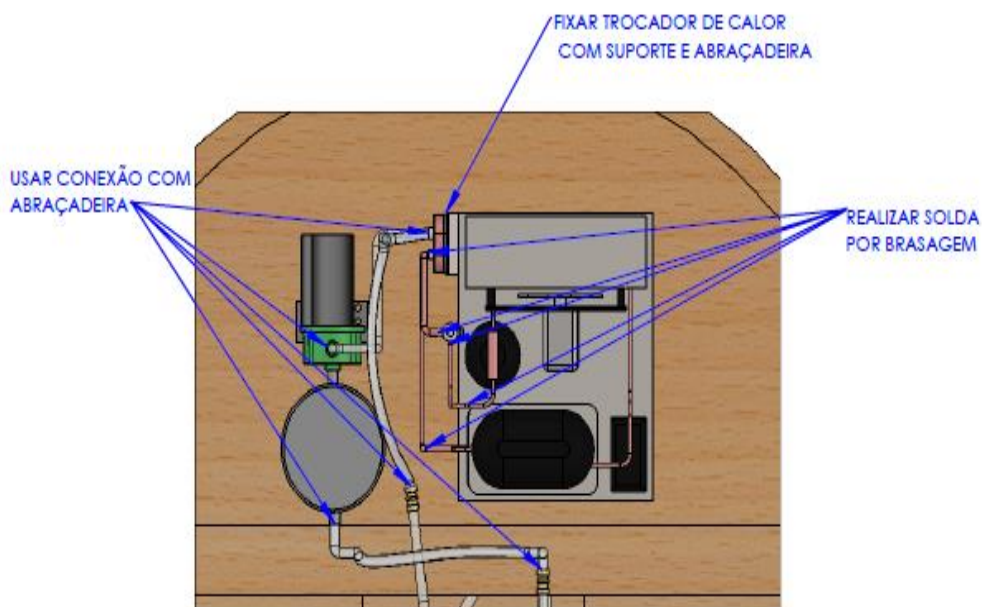


Figura 6. União da tubulação e do trocador.

Durante a modelagem tridimensional do equipamento, constatou-se que para inserir a serpentina no interior do tanque é necessário incliná-la 5 graus em relação ao eixo central. Dessa forma, com movimentos circulares em torno de seu eixo central na inclinação estabelecida, é possível acomodá-la no interior do tanque. A Fig. 7 demonstra o procedimento necessário para a instalação da serpentina no tanque.

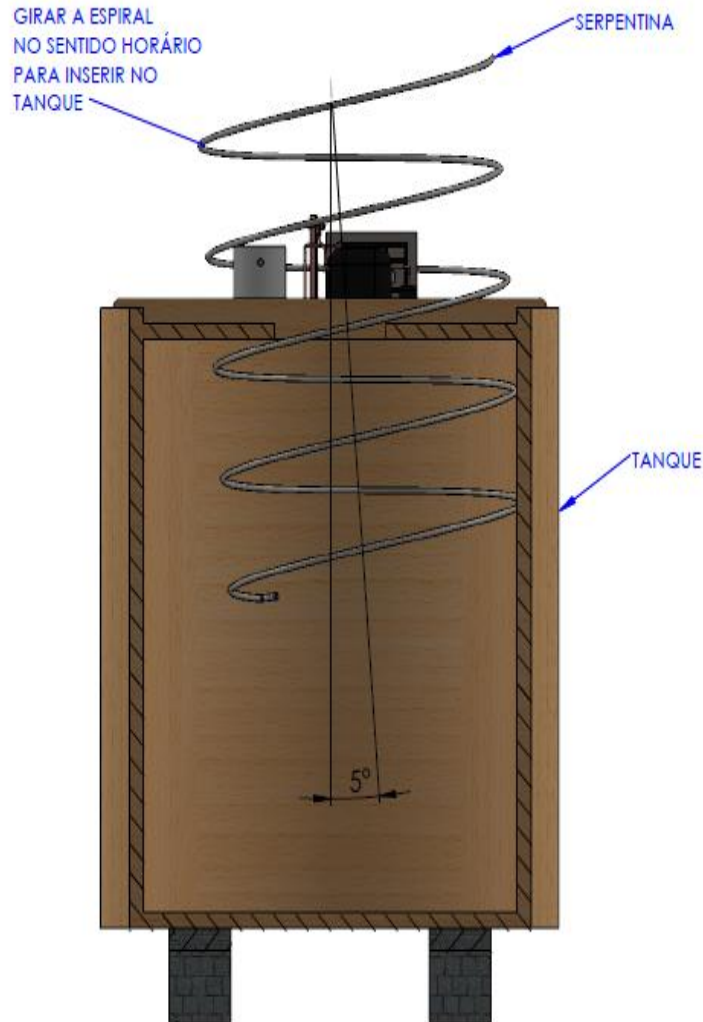


Figura 7. Desenho da inserção da serpentina.

Após inserir a serpentina no tanque, é necessário escolher o sentido do fluxo. Como Incropera *et al.* (2008) demonstra, a convecção faz com que quando exista uma diferença de temperatura em um fluido, a parcela quente se direcione para a parte superior, consequentemente direcionando a parcela fria para a parte inferior. Assim, na estabilização, visto que o vinho estará estático e a uma temperatura praticamente uniforme, o fluido refrigerante na serpentina circulará da base do tanque em direção a sua parte superior, evitando que ocorra a agitação do vinho. Em contrapartida, na fermentação, o sentido do refrigerante é invertido, agitando o vinho. A demonstração da serpentina instalada e do sistema de inversão do fluxo estão apresentados na Fig. 8.

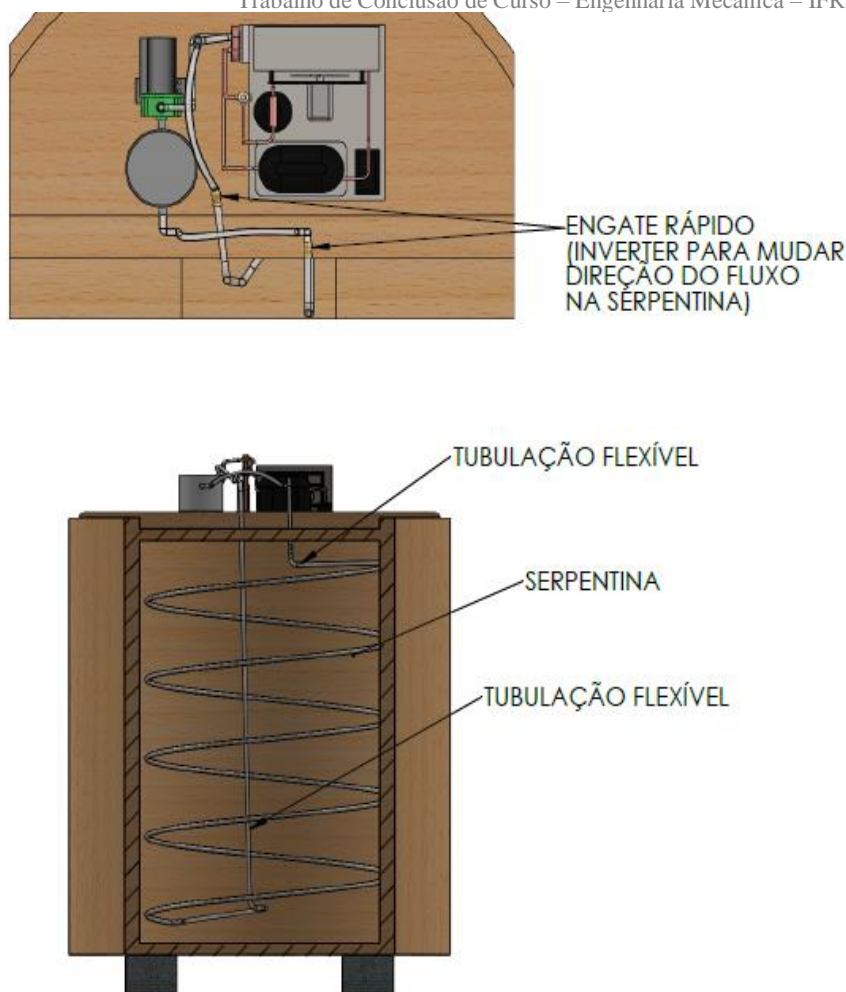


Figura 8. Desenho da instalação da serpentina e do mecanismo para inverter o fluxo do refrigerante.

Para controlar a temperatura do sistema, optou-se por utilizar um controlador eletrônico com sensores de temperatura responsável por ligar e desligar a motobomba centrífuga. Um dos sensores de temperatura será inserido na parte superior do tanque em contato com o vinho, visto que pelo princípio da convecção o calor tende a subir e será essa a área crítica do sistema. O outro será colocado na parte inferior do sistema para que na fermentação a temperatura não abaixe a ponto de parar esse processo. Assim, é possível regular a temperatura desejada do processo com o acionamento e a desativação da motobomba.

3. CONCLUSÃO

A implantação desse sistema de refrigeração em vinícolas visa aumentar o controle no processo de vinificação. Este avanço na produção propiciará uma elevação da qualidade final do vinho, além de adiantar o envase. Outra melhoria associada é a diminuição do uso de açúcar de cana, que serve para compensar a insuficiência de açúcares naturais da uva, muito comum na região sul brasileira.

Durante o desenvolvimento do sistema de refrigeração voltado para os pequenos produtores de vinho, o equipamento final se mostrou vantajoso se comparado a um sistema fixo em um reservatório, uma vez que pode ser utilizado em tanques já existentes devido a sua geometria e tamanho. Além disso, o conjunto pode ser utilizado em duas etapas da produção do vinho (fermentação e estabilização). Diferentemente dos equipamentos já existentes no mercado, esse projeto não agita o vinho na estabilização, visto que o mantém estático devido ao sentido do fluxo do refrigerante.

O valor monetário designado para a construção do projeto se mostrou acessível, tendo em vista que o seu desenvolvimento sempre considerou componentes de baixo custo e fácil manuseio. Após a realização da montagem, sua aplicação no interior do tanque é simples, não necessitando de amplo conhecimento técnico do operador sobre o assunto.

Para futuros trabalhos, sugere-se a formulação diferencial do problema proposto com o uso de métodos numéricos ou espectrais, de modo a garantir uma melhor aproximação do equacionamento empírico utilizado. Com o objetivo de realizar testes do modelo proposto, indica-se a construção de um protótipo. Assim, com essas análises, será possível aprofundar o estudo acerca do projeto proposto, podendo validar os resultados obtidos.

4. REFERÊNCIAS

- Boulton, R.B., Singleton, V.L., Bisson, L.F., Kunkee, R.E., 1995, “Principles and practices of winemaking”, Ed. Chapman & Hall, New York, NY, 604 p.
- Calderón, F., Navascués, E., 2002, “Necesidades frigoríficas en bodega”, Equipos de Frío, Tecnología Del Vino, Madrid, ES.
- Chaves, G., Júnior, M.T., 2007, “Larousse do vinho”, Ed. Larousse do Brasil, 2.Ed., São Paulo, Brasil, 399 p.
- Danfoss, Disponível em <<http://www.danfoss.com.br/produtos-e-solucoes/>>. Acesso em: 24/10/2017.
- Eich, G., Ioris, M., 2013, “Dimensionamento de um sistema de refrigeração para uma pasteurizadora”, monografia, FAHOR faculdade de Horizontina, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Fox, R.; Pritchard, P. J. e McDonald, A. T., 2011, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”. 7ª Ed., Ed. LTC, Rio de Janeiro.
- Ibravin - Instituto Brasileiro do Vinho. Disponível em <<http://www.ibravin.org.br>>. Acesso em: 22/09/2017.
- Incropera, F.P., Dewitt, D.F., Bergman, T.L., Lavine, A.S., 2008, “Fundamentos de transferência de calor e de massa”, Ed. LTC, 6 Ed., Rio de Janeiro, Brasil.
- Kern, D.Q., 1980, “Processos de transmissão de calor”, Ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, Brasil, 684 p.
- PCL Engates, Disponível em <http://www.engatespcl.com.br/pdf/Catalogo_completo.pdf>. Acesso em: 24/10/2017.
- Perry, R.H., Green, D.W., Maloney, J.O., 1997, “Perry’s chemical engineers’ handbook.”, Ed. McGraw-Hill Book CO, 7ª Ed., New York, USA.
- Stoecker, W.F., Jones, J.W., 1985, “Refrigeração e ar condicionado”, Ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil, 481 p.
- Silva Júnior, J.A., 2016, “Análise de um trocador de calor tipo serpentina de uma planta de hipoclorito de sódio”, Monografia, Universidade Estadual Paulistas, São Paulo, Brasil.

ABSTRACT

Marcos Smaniotto Slomp, marcoslomp@gmail.com¹
Sérgio Wortmann, sergio.wortmann@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul - Farroupilha Campus, São Vicente Avenue, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS.

***Abstract.** The purpose of this work is to develop and design a refrigeration system for small and medium wine producers, since it is versatile and inexpensive and can be used directly in wine tanks already existing in wineries. Some of the calculated parameters for the system design are: thermal load, convective coefficient, thermal resistance, compressor power, among others. The final design of the CAD software project will be demonstrated. After the development of the project, it is concluded feasible.*

***Keywords:** cooling system, serpentine, vinification, fermentation, stabilization.*