EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO REGIME DE TRABALHO DE REFRIGERADOR DE GRÃOS INTEGRADO A TUBOS CANADIANOS

Eduarda Costa [(1)] (eeuarda.costa@hotmail.com), Matheus Silva [(2)] (matheus.junio@live.com), Ramiro Bertolina [(3)] (ramirodematosbertolina@gmail.com), Thiago Gomes [(4)] (thiago.gomes@udf.edu.br)

[(1)] UDF – Centro Universitário
[(2)] UDF – Centro Universitário
[(3)] UDF – Centro Universitário
[(4)] UDF – Centro Universitário

RESUMO: *Uma maneira de manter a qualidade dos grãos é resfria-los artificialmente por meio do insuflamento de ar refrigerado no sistema de aeração. Essa técnica é eficaz para a manutenção da qualidade do produto, uma vez que diminui a taxa metabólica dos grãos e retarda o desenvolvimento de insetos-praga, independentemente das características climáticas da região. Esse estudo consiste em uma análise analítica do gasto energético de um equipamento refrigerador de grãos quando o sistema é integrado a tubos canadianos. No resfriamento, a temperatura do ar ambiente captado faz com que o equipamento consuma muita energia para alcançar as condições adequadas para conservação do grão. O consumo energético diminui quando o sistema é incorporado a tubos canadianos, uma vez que a temperatura do ar inserido no processo é reduzida por meio do trocador de calor ar-solo. A média de gasto por ciclo de refrigeração em silo de 400t é igual a R$ 4.391/ciclo e com a integração dos dutos canadianos, esse gasto decai para R$ 1.036/ciclo, uma redução de 76,4%. Assim, o equipamento de refrigeração seria menos requisitado e haveria uma maior eficiência energética no processo.*

PALAVRAS-CHAVE: *REFRIGERADOR DE GRAOS, TUBOS CANADIANOS, EFICIÊNCIA, AERAÇÃO*

ENERGY EFFICIENCY IN THE GRAIN REFRIGERATOR WORK SYSTEM INTEGRATED TO CANADIAN PIPES

ABSTRACT: *One way to maintain the quality of the beans is to cool them artificially by blowing cool air into the aeration system. This technique is effective for maintaining product quality, since it is at a metabolic rate of the grains and slows down the development of insect pests, regardless of the climatic characteristics of the region. This study consists of an analytical analysis of the energy expenditure of a grain cooler when the system is integrated with Canadian pipes. Without cooling, the ambient air temperature captured causes the equipment to consume a lot of energy to reach the necessary conditions for grain conservation. The internal energy consumption when the system is incorporated into Canadian tubes, since the temperature of the air inserted in the process is reduced through the air-to-ground heat exchanger. The average expense per refrigeration cycle in a 400t silo is equal to R$ 4,391 / cycle and with the integration of Canadian pipelines, this expense drops to R$ 1,036 / cycle, a reduction of 76.4%. Thus, the refrigeration equipment would be less necessary and there would be greater energy efficiency in the process.*

KEYWORDS: *GRAIN COOLER, CANADIAN TUBES, EFFICIENCY, AERATION*

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio no Brasil é uns dos pilares da economia, sendo este o único setor produtivo com alta no PIB no segundo trimestre de 2020, época em que o país atravessava a pandemia causada pelo covid-19. Conforme a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA (2020), mesmo o crescimento sendo menor do que o esperado, produtos como a soja (5,9%), o arroz (7,3%) e o café foram os principais destaques da produção.

A qualidades dos grãos está atrelada com a propulsão de todo agronegócio, e para garanti-la é necessário um eficiente sistema de armazenamento. Para que a qualidade dos grãos seja mantida, os silos devem oferecer um ambiente que seja desfavorável para o desenvolvimento de insetos-praga e para isso são empregados diferentes processos nesta etapa.

A aeração é um dos métodos mais eficientes para a conservação da qualidade dos grãos e sua principal função é o resfriamento. Nessa técnica, o ar passa pelos espaços entre os grãos propiciando assim uma troca constante de calor e umidade, evitando condições favoráveis para desenvolvimento de organismos indesejáveis e os riscos de perda por deterioração (ELIAS, 2018).

Em regiões com clima tropicais, como o Brasil, a aplicação das técnicas de resfriamento utilizando o ar natural se mostra ineficiente devido as altas temperaturas. Nesses casos, utilizar o ar resfriado artificialmente é uma alternativa viável, e a utilização de equipamentos refrigeradores é uma maneira de se garantir que as baixas temperaturas sejam alcançadas.

Com capacidade de refrigeração que podem ir até 125kW (MARCOLD GROUP, 2020), o custo de adquirir esses aparelhos e o gasto em energia são muito altos. Considerando que muitas vezes é necessário realizar mais de um ciclo de refrigeração nos silos, muitos produtores não tem condições de manter esses equipamentos em funcionamento, colocando em risco a qualidade de seus produtos.

A Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que o calor flui de forma espontânea e irreversível de uma fonte de maior temperatura a uma de menor temperatura, até que o diferencial térmico se anule (ÇENGEL, 2007). Em máquinas térmicas, quanto menor for esse diferencial, menor será o trabalho realizado e o gasto de energia.

A proposta desse estudo é avaliar uma maneira de reduzir o gasto energético desses equipamentos. Para isso, o ar inserido dentro do processo de resfriamento terá sua temperatura reduzida por um sistema de dutos canadianos, que é um permutador de calor ar-solo e consiste em tubagens enterradas que permitem a troca térmica entre o ar e solo.

A análise será realizada de forma analítica, com dados obtidos através do dimensionamento de tubos canadianos feito por Costa *et. al* (2020), informações retiradas do manual de um modelo de resfriador de grãos da marca Marcold Group e de relações de máquinas refrigeradoras e termodinâmica presentes na literatura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Dentre os objetivos principais desse trabalho, tem-se a análise de gasto energético de um refrigerador de grãos utilizado na aeração de resfriamento em silos armazenadores, quando este está atrelado a um sistema de dutos canadianos.

1.1.2 Objetivos específicos

Em relação aos **objetivos específicos**, busca-se:

- Levantar dados referentes ao modelo de refrigerador estudado.
- Obter os resultados analíticos alcançados a partir do dimensionamento do sistema de ventilação geotérmica realizado por Costa *et. al* (2020).
- Comparar o gasto energético do refrigerador quando está submetido a dois diferentes regimes de trabalho.
- Avaliar o custo monetário do gasto em energia elétrica do refrigerador que trabalha no regime mais eficiente.

2. METODOLOGIA

Agora serão apresentadas a coleta de dados e a metodologia utilizada com a finalidade de analisar o desempenho do regime de trabalho do refrigerador, utilizando equações e conceitos descritos na literatura por Çengel e Boles (2011) e Van Wylen (2009).

2.1 Resfriador de grãos

O modelo do equipamento do resfriador de grãos escolhido foi o 37-80VE da linha Charly, comercializado pela empresa Marcold Group. Os refrigeradores dessa linha são capazes de refrigerar silos e armazéns pequenos e médios, com capacidade individual entre 300 e 10.000 toneladas, alcançando uma temperatura de 12º C. Abaixo, tem-se as informações técnicas do aparelho:

TABELA 1 – Informações técnicas do refrigerador.

MODELO 37-80VE CHARLY	
Gás refrigerante	R 134 A
Modelo do compressor	BITZER CSH-8553- 80
Vazão com perda de carga do ventilador	39800 m³/h
Potência máxima absorvida pelo compressor	88 kW
Peso	3300 kg

Fonte: Marcold Group (2020)

2.2 Sistema de ventilação geotérmica

A ventilação geotérmica consiste na ventilação através de tubagens enterradas no solo, que agem como um permutador de calor ar-solo, utilizando a inércia térmica da terra para climatização e arejamento (SOUSA, 2014). A finalidade do sistema é atrasar os picos de temperatura e insuflar um ar com a temperatura mais próxima à do solo, que se encontra mais frio que o ambiente. Alguns parâmetros que devem ser avaliados para um devido dimensionamento são: comprimento do poço, diâmetro do tubo, velocidade do ar, temperatura de saída e profundidade.

Costa et al. (2020) realizou um estudo e dimensionamento de um sistema de ventilação geotérmica a fim de resfriar o ar inserido no processo de aeração de resfriamento. Utilizando uma abordagem simplificada levando em consideração o comportamento térmico do solo e transferência de calor entre o solo e o ar que escoa nos dutos, os principais resultados foram:

- Tubos alocados em paralelo, para reduzir perda de carga
- Diâmetro da tubulação em paralelo: 0,71m
- Comprimento dos tubos em paralelo: 72 m
- Temperatura de saída de ar: 22 ºC
- Velocidade de saída do ar: 11,4 m/s
- Vazão mássica do sistema (m): 13,15 kg/s

2.3 Análise de eficiência do regime de trabalho

As leis da termodinâmica definem os limites teóricos para o desempenho de máquinas térmicas, refrigeradores e outros sistemas de engenharia. Essas máquinas são projetadas para produzir trabalho e os engenheiros estão em constante busca de melhoria na eficiência desses dispositivos, pois quanto maior a eficiência, menores são os gastos com energia

As máquinas térmicas cíclicas operam entre um meio de alta temperatura (Q_q) e um meio de baixa temperatura (Q_f), e ao final de cada ciclo, o fluido de trabalho volta ao estado inicial. O trabalho e a eficiência dessas máquinas podem ser otimizados ao utilizar processos reversíveis, que na prática não podem ser realizados, mas demarcam as fronteiras do desempenho real.

Considerando a equação do balanço de energia definida pela Primeira Lei da Termodinâmica, o trabalho (W) realizado por esses dispositivos térmicos definido pela Equação 1 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$W = Q_q - Q_f \tag{1}$$

A fração de calor fornecido que é transformado em trabalho resulta na eficiência térmica do sistema. Na termodinâmica, a eficiência define o grau de sucesso com qual um processo de

transferência ou conversão de energia é realizado e, para ciclos de refrigeração, é chamado de COP – Coeficiente de Desempenho e é definido pela Equação 2 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$COP = \frac{1}{\frac{Q_q}{Q_f} - 1} \tag{2}$$

Em um ciclo de refrigeração, o processo não é espontâneo, ou seja, a troca térmica não ocorro de forma natural. Os refrigeradores necessitam de uma adição de trabalho para realizar a transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. Mas o objetivo desse estudo não é avaliar o trabalho realizado no ciclo de refrigeração, e sim do sistema em geral. Considerando o refrigerador como um trocador de calor que opere no regime permanente, o balanço de energia se dá de acordo com a Equação 3 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$W - \mathrm{Q_e} + \dot{m}h_e = \dot{m}h_s \tag{3}$$

sendo $-Q_e$ o calor retirado na entrada (Q_q), m a vazão mássica e h_e e h_s as entalpias do fluido na entrada e saída, respectivamente.

Se o volume de controle a ser considerado é todo o trocador, o trabalho é igual a 0 pois não há interações de trabalho e as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis. Em gases reais, a variação de entalpia pode ser substituída por $c_p \Delta T$, sendo c_p o calor específico do fluido e ΔT a variação de temperatura do fluido. Assim, tem-se a relação proposta na Equação 4 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$Q_e = -\dot{m}c_p(T_s - T_e) \tag{4}$$

Em máquinas térmicas reversíveis que operam segundo o Ciclo de Carnot, a relação entre as fontes e a temperatura é estabelecida pela Equação 5 (VAN WYLEN, SONNTANG e BORGNAKKE, 2000), considerando as leis da termodinâmica e que todas as transferências de calor sejam positivas:

$$\frac{Q_q}{T_e} = \frac{Q_s}{T_s} \tag{5}$$

sendo Q_s o calor liberado na saída (Q_f) e T_e e T_s as temperaturas de entrada e saída do fluido, respectivamente.

O gasto monetário em energia do equipamento é medido pelo trabalho multiplicado pela tarifa vigente para cada kWh, que é dada pela Equação 6:

$$\text{Consumo(R\$)} = W \cdot \text{tarifa} \tag{6}$$

Segundo o Decreto 9.642/2018, o setor de agronegócio possui 8% de desconto na tarifa vigente. Dados divulgados pela ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica (2020), definem o valor do kWh em Brasília/DF igual a 0,518 R$/kWh, com vigência a partir de outubro de 2019.

Costa *et. al* (2020) traz um estudo de viabilidade da aplicação de um sistema de ventilação geotérmico para reduzir a temperatura do ar que é inserido no processo de resfriamento. Por meio de tubagens enterradas no solo, esse sistema faria com que o regime de trabalho do refrigerador fosse menos requisitado, já que o diferencial de temperatura de entrada e saída seria menor. Na Figura 1, é possível visualizar um desenho esquemático do funcionamento do refrigerador sem a adição dos tubos:

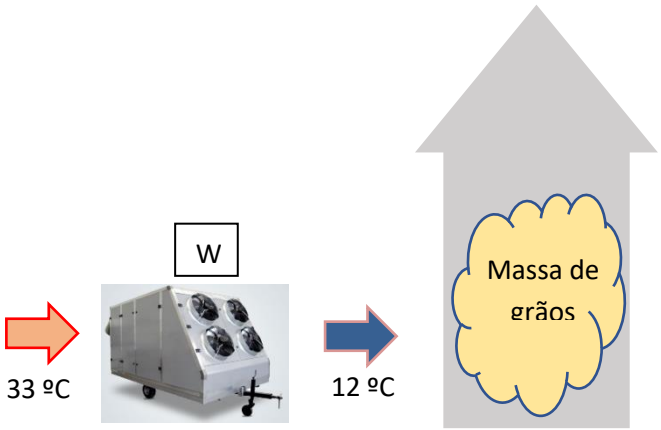


FIGURA 1 – Resfriamento do silo no modo convencional. Fonte: Autoria Própria (2020)

Na Figura 2, nota-se que o refrigerador é menos requisitado se for integrado ao sistema de dutos canadianos:

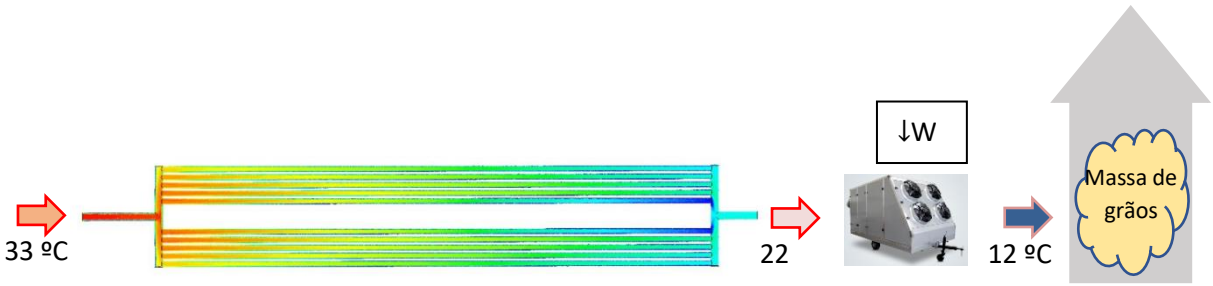


FIGURA 2 – Resfriamento integrado aos dutos canadianos. Fonte: Autoria Própria (2020)

3. RESULTADOS E CONCLUSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados que foram obtidos através da análise analítica e comparação da eficiência do sistema quando está submetido a dois diferentes regimes de trabalho.

3.1 Eficiência térmica quando a temperatura de entrada é igual a 33º C

Quando captado em temperatura ambiente, o ar possui uma temperatura mais elevada. Nesse caso, considera-se uma temperatura de 30 ºC acrescidos de mais 3ºC devido ao ventilador instalado no sistema de aeração. A finalidade do resfriador é reduzir essa temperatura até 12ºC.

Considerando que o refrigerador atue segundo um ciclo de refrigeração de Carnot, quando T_e=33 ºC e T_s=12 ºC, tem-se Q_q=278,1kW e Q_f=259 kW. Assim, o coeficiente de desempenho (COP), seguindo a Equação 2, é:

$$COP = \frac{1}{\frac{Q_q}{Q_f} - 1} = 13,57$$

O trabalho (W) é igual a 19,1 kW.

3.2 Eficiência térmica quando a temperatura de entrada é igual a 22º C

Ao integrar o sistema do refrigerador com os dutos canadianos, a temperatura de entrada no ar no sistema é reduzida para valores próximos a 22ºC. Assim, o valor de Q_q se reduz para 132,4kW, Q_f=128kW, quando considerado o ciclo de refrigeração de Carnot, e a eficiência (COP) é:

$$COP = \frac{1}{\frac{Q_q}{Q_f} - 1} = 28,5$$

O trabalho (W) é igual a 4,5 kW.

3.3 Comparação de gasto monetário dos regimes

Os refrigeradores de grãos permanecem ligados constantemente até que se alcancem as condições necessárias para a conservação dos grãos, e esse período, em horas, é chamado de ciclo de refrigeração. Pelos resultados obtidos acima, percebe-se que o sistema com a menor variação de temperatura requer menos trabalho inserido. Considerando os valores de tarifa e o trabalho consumido, para cada regime tem-se, por hora, os gastos:

- Refrigerador não-otimizado: gasto de R$ 9,11/h

- Refrigerador integrado aos dutos canadianos: gasto de R$ 2,15/h

3.4 Conclusões

Aplicando esses valores num sistema real, segundo Silva (2000), um silo de 700t de grãos de soja precisa de em média 482 horas com o sistema de refrigeração ligado para que se atinja as condições adequadas de conservação da qualidade dos grãos. Nesse sistema, a média de gasto por ciclo de refrigeração seria igual a R$ 4.391/ciclo. Com a integração dos dutos canadianos, esse gasto decai para R$ 1.036/ciclo, uma redução de 76,4%, como pode ser visto no gráfico expresso na Figura 3:

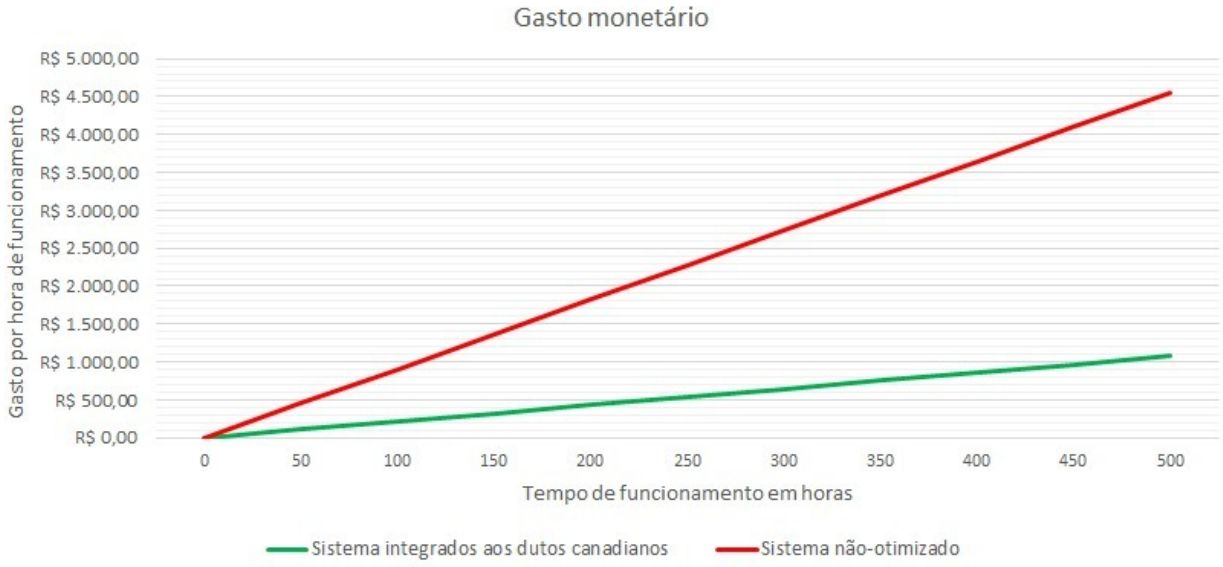


FIGURA 3 – Comparação de gasto monetário entre os sistemas. Fonte: Autoria Própria (2020)

Conclui-se então, que resfriar o ar inserido no processo de resfriamento de grãos por meio de dutos canadianos, é uma alternativa eficaz para reduzir o consumo de energia. Lembrando que a análise foi feita considerando que os processos são reversíveis e sem avaliar o ciclo de refrigeração do equipamento, então, essa diferença de gastos monetários podem ter valores maiores se considerar um sistema real.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 3ª ed. AMGH, 2007

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica**. 5ª ed. Michael Graw Hill, 2011

ANEEL. **Ranking das Tarifas**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

BRASIL. Decreto nº 9.642, de 27 de dezembro de 2018. **Dispõe sobre a redução gradativa dos descontos concedidos em tarifa de uso do sistema de distribuição e tarifa de energia elétrica**. Diário Oficial da União, 2018.

CNA. **CNA mostra que PIB do agro é destaque no 2° trimestre de 2020**. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/cna-mostra-que-pib-do-agro-e-destaque-no-2-trimestre-de-2020>. Acesso em: 02 de setembro de 2020

COSTA, E.S; SILVA, M.J.S; BERTOLINA, R.M; GOMES, T.F. **Dimensionamento e análise CFD de tubos canadianos para aeração de refrigeração**. UDF Centro Universitário. Brasília, 2020.

ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M; VANIER, N.L. **Manejo da Aeração dos Grãos na Unidade Armazenamento para Preservar a Qualidade dos Grãos**. Universidade Federal de Pelotas, 2018.

MARCOLD GROUP. **Refrigeração para grãos e sementes**. Disponível em: <http://marcoldbrasil.com.br/sistemas-de-refrigeracao-e-secagem-para-graos-e-sementes>. Acesso em: 13 de agosto de 2020

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, Aprenda fácil, 2000

SOUSA, M.M.L.A. **Análise do desempenho energético de sistemas de ventilação geotérmica**. Universidade de Coimbra, 2014

VAN WYLEN, J.G.; SONNTANG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4ªed., Editora Blucher, 2009.