

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE GOIÁS
CAMPUS ANÁPOLIS DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS HENRIQUE
SANTILLO
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
FELIPE DE OLIVEIRA DOURADO

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE AERAÇÃO CONVENCIONAL E COM AR
ARTIFICIALMENTE RESFRIADO PARA GRÃOS DE MILHO**

ANÁPOLIS – GO
2021

FELIPE DE OLIVEIRA DOURADO

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE AERAÇÃO CONVENCIONAL E COM AR
ARTIFICIALMENTE RESFRIADO PARA GRÃOS DE MILHO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Goiás – UEG, Campus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola
Área de concentração CNPQ: Engenharia de Sistemas Agroindustriais.

Orientador: Prof. DR. Ivano Alessandro Devilla

ANÁPOLIS – GO
2021

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UEG
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

dD739

a

de Oliveira Dourado, Felipe
Avaliação de sistemas de aeração convencional e com
ar artificialmente resfriado para grãos de milho /
Felipe de Oliveira Dourado; orientador Ivano
Alessandro Devilla. -- Anápolis, 2021.
53 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
Mestrado Acadêmico em Engenharia Agrícola) -- Câmpus
Central - Sede: Anápolis - CET, Universidade Estadual
de Goiás, 2021.

1. Aeração com ar artificialmente resfriado. 2.
Tubo de vórtice. 3. Aeração convencional. 4.
Armazenamento de grãos. 5. Zea mays. I. Alessandro
Devilla, Ivano, orient. II. Título.

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Coordenação do Programa de Pós-graduação Stricto sensu em Engenharia Agrícola

ATA DE DEFESA DA DISSERTAÇÃO - M.sc

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

REALIZADA EM **trinta de abril de dois mil e vinte e um (30/04/2021)**
PROGRAMA de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

CANDIDATO: **Felipe de Oliveira Dourado**

BANCA EXAMINADORA:

1. Prof. Dr. **Ivano Alessandro Devilla** (Orientador/UEG)
2. Profa. Dr. **Elton Fialho dos Reis** (UEG)
3. Profa. Dr. **José Henrique da Silva Taveira** (UEG)

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: "**Avaliação de sistemas de aeração convencional e com ar artificialmente resfriado para grãos de milho**"

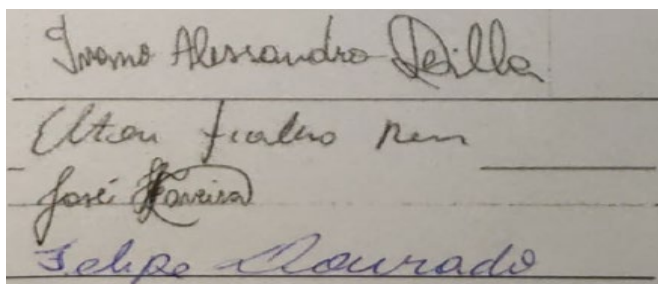
LOCAL: Via Webconferência - <https://meet.google.com/fkd-mheq-kkv?pli=1&authuser=0>
(Conforme Portaria CAPES n. 036/2020; e Instrução Normativa n. 1, 31/03/2020, da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-graduação -- UEG).

HORÁRIO DE INÍCIO: 15:00 horas, em sessão pública, após exposição de cerca de 31 minutos, o candidato foi arguido oralmente, pelos membros da banca, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, sendo aprovado por unanimidade, com correções.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente Ata que é assinada pelos membros da banca, e pelo candidato.

Anápolis, 30 de abril de 2021.

Orientador:



Ivano Alessandro Devilla
Elton Fialho dos Reis
José Henrique da Silva Taveira
Felipe Dourado

Candidato:

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela presença restauradora constante em todos os momentos, atuando como Mestre em meus pensamentos, orientando em minhas decisões e iluminando a trilha para a caminhada cada vez mais sábia.

Aos meus pais, por me encorajar a seguir meus sonhos independentes dos desafios, por me proporcionarem a oportunidade de cursar uma pós-graduação e me amarem com todos os meus defeitos.

A Universidade Estadual de Goiás, pela oportunidade de fazer o mestrado e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

O meu orientador Ivano Alessandro Devilla, por todas as palavras de apoio, pela orientação, paciência, e pela grande amizade construída.

Aos amigos que me ajudaram durante essa jornada, Guilherme, Diego, Gabriel, Afonso, minha irmã Camilla e minha namorada Thais, meu eterno obrigado!

RESUMO

O sistema de aeração é utilizado na preservação das qualidades dos grãos armazenados, tendo como objetivo resfriar e preservar a qualidade da massa de grãos. Apesar de ser o sistema mais difundido para preservação de grãos armazenados, a aeração tem limitações como a dependência das condições climáticas locais. Por isso o sistema de resfriamento pode ser uma tecnologia alternativa para substituir a aeração convencional. Este trabalho objetivou projetar, construir e avaliar um sistema de aeração artificialmente resfriado. Foram construídos dois silos protótipos com dimensões (0,9 m de diâmetro e 3 m de altura de fundo perfurado e adaptado para um sistema de aeração. Para o sistema de aeração artificialmente resfriado foi utilizado o tubo de vórtice, que foi acoplado na lateral do plenum, para insuflar o ar frio. No registro dos dados de temperatura, umidade intersticial do ar e a temperatura e umidade do ambiente, foi utilizado sensores SHT 75 que ficaram dispostos no centro do silo protótipo. Os sistemas de aeração convencional e artificialmente resfriado, foram acionados ao mesmo tempo todos os dias às 19 horas e desligados às 8 horas. Para análise estatística foi utilizado o teste de “t” de Student com nível de significância à 5% para comparação das médias de temperatura dos processos de aeração convencional e artificialmente resfriado. No período de avaliação dos sistemas a temperatura do ar não sofreu grandes variações, oscilando de 20,97 até 26,56 °C, em contrapartida a umidade relativa do ar sofreu grandes oscilações de 81,13 até 34,78 %. O tempo de avaliação foi de 26 dias e as temperaturas média registradas no final do experimento foi de 24,41 °C no silo com sistema de aeração convencional e no silo com aeração artificialmente resfriado 24,02 °C. O resultado da análise pelo teste de “t” de Student indicaram, que não houve variação significativa a 5% de probabilidade de erro. O sistema de aeração artificialmente resfriado funcionou de forma correta, diminuindo a temperatura do ar de aeração, porém apenas com um compressor ele tem uma baixa eficiência.

Palavras chave: Tubo de vórtice, Armazenamento de grãos, *Zea mays*.

ABSTRACT

The aeration system is used to preserve the qualities of the stored grains, with the objective of cooling the mass of the grains to preserve the quality of the grains. Despite being the most widespread system for preserving stored grains, aeration has limitations such as dependence on local climatic conditions. For this reason, the cooling system can be an alternative technology to replace conventional aeration. This work aimed to design, build and evaluate an artificially cooled aeration system. Two prototype silos were built with dimensions (0.9 m in diameter and 3 m in height with a perforated bottom and adapted for an aeration system. For the artificially cooled aeration system, the vortex tube was used, which was attached to the side of the plenum, to blow cold air in. In order to record temperature and humidity data of the grain mass and the environment, SHT 75 sensors were used, which were placed in the center of the prototype silo. The conventional and artificially cooled aeration systems were activated at the the same time every day at 7 pm and shut down at 8 am For statistical analysis, the Student's "t" test with a 5% significance level was used to compare the temperature averages of conventional and artificially cooled processes. evaluation period of the systems the air temperature did not suffer great variations, oscillating from 20.97 to 26.56 °C, in contrast the relative humidity of the air suffered great oscillations of 81.13 to 34.78%. The evaluation time was 26 days and the average temperature recorded at the end of the experiment was 24.41 °C in the silo with conventional aeration system and in the silo with artificially cooled aeration 24.02 °C. The results of the analysis using the Student's "t" test indicated that there was no significant variation at 5% probability of error. The artificially cooled aeration system worked correctly, decreasing the temperature of the aeration air, but only with a compressor it has a low efficiency.

Keywords: Vortex Tube, Grain storage, *Zea Mays*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conjunto de Silos Metálicos.....	15
Figura 2 - Conjunto de silos elevados de concreto.....	16
Figura 3 - Componentes de um tubo de vórtice.....	20
Figura 4 - Desenho demonstrativo de um tubo de vórtice contracorrente.....	20
Figura 5 - Silo protótipo utilizado para avaliar o sistema de aeração convencional A	23
Figura 6 - Vista superior do silo protótipo	23
Figura 7 - Ventiladores centrífugos com pás radiais utilizados para insuflar ar nos silos	24
Figura 8 - Inversor de frequência utilizado para regular a rotação do rotor do ventilador.....	24
Figura 9 - Silo protótipo utilizado para avaliar o sistema de aeração artificialmente resfriado B	25
Figura 10 - Tubo de vórtice acoplado ao plênum onde o ar frio foi insuflado.....	26
Figura 11 - Compressor utilizado para fornecer o ar comprimido ao tubo de vórtice	26
Figura 12 - Dispositivo para o aquecimento da massa de grãos.....	27
Figura 13 - Sistema de aquecimento acoplado ao ventilador e plênum	28
Figura 14 - Processo para determinação da vazão de ar de um ventilador utilizando o tubo de pitot	29
Figura 15 - Sensores SHT 75 utilizados para monitorar a temperatura e umidade relativa dos silos	30
Figura 16 - Esquema do silo protótipo com os sensores dispostos no centro	31
Figura 17 - Sensor SHT 75 conectado ao cabo de rede com o dispositivo de proteção.....	31
Figura 18 - Arduino Uno utilizado na aquisição de dados	32
Figura 19 - Módulo de comunicação Xbee utilizado no Arduino	33
Figura 20 - Curvas características do ventilador centrífugo de pás radiais utilizado no sistema de aeração convencional	34
Figura 21 - Curvas características do ventilador centrífugo de pás radiais utilizado no sistema de aeração artificialmente resfriado	35
Figura 22 - Média diária da temperatura e umidade relativa do ar durante o período de avaliação dos sistemas de aeração convencional e artificialmente resfriada.....	36
Figura 23 - Variação da temperatura e umidade do ar intersticial da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5 e Plenum) do silo A	37
Figura 24 - Variação da temperatura e umidade do ar intersticial da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5 e Plenum) do silo B	37

Figura 25 - Variação do teor de água em % b.u da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5) no silo A.....	40
Figura 26 - Variação do teor de água em % b.u da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5) no silo.....	40
Figura 27 - Efeito dos sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado na temperatura média dos silos A e B e ambiente.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fluxos de ar para aeração de grãos em diferentes regiões e tipos de unidades armazenadoras.	18
Tabela 2 - Análise da média de temperatura dos silos A e B	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1. Produção e Armazenamento de grãos	13
2.2. Formas de armazenamento.....	13
2.2.1 Silos.....	14
2.2.1.1 Silos Metálicos.....	14
2.2.1.2 Silos Elevados de Concreto	15
2.3 Influência da temperatura no armazenamento.....	16
2.4 Processos para resfriamento de grãos.....	17
2.4.1 Aeração.....	17
2.4.2 Resfriamento artificial.....	18
2.5 Tubo de Vórtices: Alternativa para o resfriamento	19
2.6 Aquisição de dados e controle de sistemas.....	21
2.6.1 Arduino.....	21
2.6.2 Sensores Eletrônicos.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Localização e Descrição da Área de Estudo	22
3.2 Caracterização dos Grãos	22
3.3 Caracterização dos equipamentos que compõem o sistema de aeração convencional	22
3.3.1 Silo Protótipo.....	22
3.3.2 Ventilador.....	24
3.3.3 Inversor de Frequência	24
3.4 Caracterização dos equipamentos que compõem o sistema de aeração artificialmente resfriado.....	25
3.4.1 Silo Protótipo.....	25
3.4.2 Ventilador.....	25
3.4.3 Tubo de vórtice.....	25
3.4.4 Compressor.....	26
3.5 Procedimento preliminar para aeração convencional e aeração artificialmente resfriada	27
3.6 Sistema de Aquecimento	27
3.7 Determinação da vazão de ar dos ventiladores	28

3.8 Caracterização do controle do sistema de aeração	30
3.8.1 Sensores.....	30
3.8.2 Microcontrolador Arduino	32
3.8.3 Módulos Xbee	32
3.9 Sistema de aquisição de dados	33
3.10 Teor de água dos grãos	33
3.11 Análise Estatística	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Curvas característica dos ventiladores	34
4.2 Condições de temperatura e ar ambiente durante as avaliações.....	35
4.3 Frente de resfriamento	36
4.4 Teor de água dos grãos	39
4.5 Análise Estatística dos sistemas de aeração.....	41
5. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays L.*) também conhecido popularmente como avati, auti e abati, é uma das principais espécies cultivadas no mundo, destacando quanto às suas qualidades nutricionais e potencial energético, sendo, por isso, extensivamente utilizado tanto para alimentação humana e animal, quanto como substrato na indústria química e farmacêutica (ANDRADE et al., 2016).

A produção para os grãos de milho primeira safra está estimada em 25,4 milhões de toneladas, com recuo de 0,8% na área cultivada estima-se uma redução de 3,78% em relação à safra anterior; já o milho segunda safra estima-se uma expansão de 6,9% na área, resultando numa estimativa de produção de 80,076 milhões de toneladas, com crescimento de 6,7% em relação à safra anterior; A área plantada está prevista em 14,356 milhões de hectares, ou seja, crescimento de 4,4% se comparada com a safra 2019/20. Já a produção total de grãos no Brasil está estimada em 268,3 milhões de toneladas para safra 2019/2020, crescimento de 4,4 % em relação à safra anterior (CONAB, 2021).

Como grande parte desta produção de grãos é armazenada durante determinado período, o Brasil tem enfrentado grandes problemas nesta área em decorrência da capacidade estática limitada (MAIA et al., 2013; LIMA JÚNIOR et al., 2012).

Em 2020 capacidade estática de armazenamento do Brasil foi de 171.542,7 milhões de toneladas. O estado com maior capacidade estática é o Mato-Grosso com 38.700,4 milhões de toneladas, em seguida vem o estado do Paraná, Rio Grande do Sul, com 30.945,7 e 29.910,6 milhões de toneladas respectivamente e em quarto lugar o estado de Goiás com uma capacidade de 13.994,3 milhões de toneladas (CONAB, 2020). A capacidade de armazenagem disponível ideal para um país é 20% superior à produção agrícola, nesse contexto percebe-se a deficiência da capacidade estática de armazenamento no Brasil em relação a sua produção de grãos.

Segundo Júnior e Nogueira (2007), dentre as vantagens do armazenamento de grãos, têm-se: a minimização das perdas quantitativas e qualitativas que ocorrem no campo, pelo atraso da colheita ou durante o armazenamento em locais inadequados; a disponibilidade do produto para utilização oportuna; a menor dependência do suprimento de produtos de outros locais; e o aumento do poder de barganha dos produtores quanto à escolha da época de comercialização dos seus produtos.

Nesse contexto, ressalta-se que o armazenamento de grãos se tornou uma técnica indispensável para evitar perdas, manter as qualidades que os grãos possuem logo após a colheita, tais como, biológicas, físicas e químicas, além de suprir as demandas do período entressafra (BURKOT, 2014).

A temperatura e umidade relativa são os principais fatores que podem interferir na qualidade dos grãos durante o período de armazenamento (BORÉM et al., 2019). A redução da temperatura dos grãos diminui a velocidade das reações bioquímicas e metabólicas (PARAGINSKI et al., 2014). Segundo Ziegler et al. (2016) grãos armazenados na temperatura de 15 °C houve um efeito de expurgo controlando a infestação de insetos. Desta forma, a utilização de tecnologias para redução da temperatura no interior da massa de grãos durante o armazenamento aumenta a cada ano, evitando que ocorra uma redução da qualidade dos grãos, e buscando armazenar com segurança.

A aeração é o método de controle preventivo mais difundido e utilizado na preservação dos grãos armazenados. Esse método consiste na passagem forçada do ar ambiente pela massa de grãos, de tal forma a modificar o microclima intergranular, criando condições desfavoráveis ao desenvolvimento de organismos que influenciam na preservação da qualidade dos grãos (LOPES E STEIDLE, 2019). Porém, se a aeração não for bem conduzida, pode causar perda por aquecimento, fermentação e perda excessiva do teor de água, sendo altamente dependente das condições climáticas locais.

Dessa forma, a eficiência de um sistema de aeração está centrada no fato de se ter uniformidade do fluxo de ar em todas as regiões do silo. Outro objetivo da aeração é impedir a migração e a condensação da umidade que ocorre sempre que houver um aquecimento em algum ponto da massa de grãos (LUIZ, 2012).

Outra técnica utilizada para manter a qualidade dos grãos armazenamentos é o resfriamento artificial, consiste em reduzir a temperatura no interior dos armazéns e/ou silos verticais. O resfriamento permite trocas de ar entre o ambiente e o interior da massa de grãos, sendo insuflado o ar frio para o interior do silo, permanecendo este em funcionamento até a temperatura desejada da massa de grãos.

O sistema de resfriamento é uma medida de controle física por isso essa tecnologia pode ser aplicada em ambientes e produtos onde o uso de inseticidas é restrito (SILVA, 2017). Outro ponto positivo é que os grãos depois de resfriados permanecem vários meses à mesma temperatura, pois são isolantes térmicos. Trabalhos com uso de resfriamento artificial já foram realizados em grãos (RIGUEIRA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2011; PARK et al., 2012), porém, poucos trabalhos foram realizados com grãos de milho.

Demito e Afonso (2009) destacam em seu estudo que, a redução da temperatura a níveis de refrigeração pode ser uma tecnologia promissora na manutenção da qualidade dos grãos, retardando o desenvolvimento de insetos, pragas e da microflora presente, independente das condições climáticas da região. Rigueira et al. (2009) salientaram que armazenar a produção

em sistemas onde é reduzida a temperatura é uma técnica eficaz e econômica por longos períodos.

Segundo Patwari et al. (2015), o tubo de vórtice é um dispositivo mecânico, projetado em 1930 por Georges J. Ranque, capaz de gerar dois fluxos com temperaturas diferentes, baseando-se exclusivamente na sua geometria, com apenas uma entrada de fluido de gás comprimido. Desde então este dispositivo tem sido estudado cada vez mais a fim de verificar sua eficiência e possíveis aplicações.

A utilização de tubos de vórtice para a resfriamento é de grande interesse devido aos seus pontos vantajosos em relação aos sistemas convencionais de refrigeração. Dentre eles, estão a simplicidade do sistema e o uso de ar atmosférico como fluido refrigerante. Essas duas propriedades garantem uma manutenção mais simples do dispositivo (SECCHIAROLI et al., 2009). Nesse contexto, objetivou-se neste trabalho projetar, construir e avaliar um sistema de aeração artificialmente resfriado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Produção e Armazenamento de grãos

A produção de alimentos no Brasil nos últimos anos, especialmente em grãos como milho, trigo, soja e a cevada tiveram elevadas taxas de crescimento advindas da modernização e das tecnologias agrícolas (BARONI et al., 2017).

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), a safra 2020/21 está estimada em 268,3 milhões de toneladas de grãos, apresentando um acréscimo de 4,4 % em relação à safra 2019/20 já na área planta está previsto um aumento de 2,7 % estimando cerca de 67,7 milhões de hectares.

Os grãos produzidos, depois de passarem pelos processos de limpeza e secagem, são estocados para que sejam utilizados posteriormente. O armazenamento é um processo que se baseia em reunir e guardar um determinado volume de produto durante um período maior, a fim de preservar a qualidade e as características primárias dos grãos, evitando fungos, pragas e umidades excessivas (MOHAPATRA et al., 2017; NEME e MOHAMMED, 2017; MUTUNGI et al., 2019)

Em 2020, a capacidade estática de armazenamento do Brasil foi de 171.542,7 milhões de toneladas, tendo um aumento de 1 % em relação a 2019. O estado com maior capacidade estática é o Mato-Grosso com 38.700,4 milhões de toneladas, em seguida os estados do Rio Grande do Sul, Paraná com 30.945,7 e 29.910,6 milhões de toneladas, respectivamente; e em quarto lugar o estado de Goiás com uma capacidade de 13.994,3 milhões de toneladas (CONAB, 2020).

Segundo a FAO. (2019) a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura recomenda que se busque uma relação de 1:1,2 entre a produção e a capacidade estática de armazenamento. Nesse contexto percebe-se a deficiência da capacidade estática de armazenamento no Brasil em relação a sua produção de grãos, prejudicando os produtores que são obrigados a comercializar seus produtos em períodos de safra, onde o preço normalmente é menor do que o da entressafra.

2.2. Formas de armazenamento

No Brasil o início da estrutura de armazenagem deu-se no começo do século passado, com a necessidade do armazenamento do café. Posteriormente, por volta de 1950, em razão da necessidade de atender às importações de trigo, inicia-se o processo de armazenamento a granel (COSTA, 2012).

Atualmente, a infraestrutura brasileira de armazenamento de grãos é constituída em grande parte por unidades específicas para armazenagem a granel (silos), que possuem maior

representatividade no setor com capacidade correspondente a 152 milhões de toneladas, com 89 % da capacidade estática. Os outros 11% são constituídos por armazéns convencionais, que utilizam sacas e fardos para o armazenamento do produto, apresentando desvantagens na conservação e operações de carga e descarga dos grãos em relação ao sistema silos (CONAB, 2020).

2.2.1 Silos

Conforme pesquisas antigas de Jenike & Johanson (1868), adaptadas por Gomes (2000), os primeiros grandes silos foram construídos em 1860 para o armazenamento de grãos. Desde então, milhares de grandes e pequenos silos têm sido construídos para o armazenamento de uma extensa variedade de pós, grãos, torrões, fibras, entre outros produtos.

As unidades armazenadoras são caracterizadas por compartimentos estanques ou herméticos, ou ainda semi-herméticos. Em virtude da compartimentação disponível, permitem o controle das características físico-biológicas dos grãos, já que, embora estes perdem a identidade de origem, as espécies e padrões agrícolas são armazenados separadamente (PATURCA, 2014).

Os silos podem ser classificados quanto ao material estruturado empregado como: concreto, metálicos, alvenaria armada, argamassa armada, de madeira e de fibra de vidro. Quanto à dimensão: elevados, quando a altura se faz maior que o diâmetro, ou horizontais. Basicamente, com enfoque ao armazenamento de grãos, são classificados em silos metálicos e elevados de concreto.

2.2.1.1 Silos Metálicos

Os silos mais usados hoje, principalmente no Brasil, são os fabricados em metal. Esse sistema de armazenamento é de média e pequena capacidade, em geral, de chapas lisas ou corrugadas, de ferro galvanizado ou alumínio, fabricados em série e montados sobre um piso de concreto, conforme ilustra Figura 1 (PATURCA, 2014).

Figura 1 - Conjunto de Silos Metálicos.



Fonte: KEPLER WEBER (2018)

As principais vantagens deste sistema de armazenamento são as fundações mais simples e de menor custo, custo por tonelada inferior ao silo de concreto e célula de capacidade média no qual possibilita maior flexibilidade operacional (BARONI et al.; 2017).

Para essas estruturas, deve-se atentar aos problemas que podem ser causados por fenômenos como as intempéries, efeitos de migração de umidade, condensação de vapor d'água na massa de grãos, radiação solar sobre o produto armazenado e proximidade às regiões marítimas. Sistemas de aeração, termometria, portas e alçapões à prova de umidade e o uso de tinta branca são técnicas bastante empregadas nesses silos com a finalidade de proteger o produto armazenado a estes efeitos (PATURCA, 2014).

2.2.1.2 Silos Elevados de Concreto

Os silos de concreto, conforme ilustra a Figura 2, são normalmente caracterizados por grandes alturas (entre 30 e 40 metros) e corriqueiramente construídos em áreas urbanas tendendo a ser edificadas em áreas menores, já que o valor do terreno geralmente é alto.

Figura 2 - Conjunto de silos elevados de concreto. Fonte: APROSOJA



Fonte: APROSOJA

Os silos de concreto possuem média ou grande capacidade de armazenamento, e são constituídos por uma torre e um conjunto de células e entre células. Apresentam por vantagem o estabelecimento de um ambiente de armazenagem estável no que se refere à variação de temperatura, visto que as paredes em concreto se apresentam como isolante térmico (PATURCA, 2014).

2.3 Influência da temperatura no armazenamento

A temperatura e umidade são as principais variáveis que influenciam na realização de armazenamento bem sucedido de cereais a longo prazo (ANGELOVIČ et al., 2018). Os grãos armazenados com temperatura e umidade alta são suscetíveis a deteriorar mais rapidamente devido ao aumento da atividade metabólica, taxa de respiração, auto aquecimento, desenvolvimento de fungos, infestação por mico toxinas, aumentando assim o nível de perdas qualitativas e quantitativas. (SINGH et al., 2017).

Entre os fatores externos que mais afetam o ecossistema da massa de grãos são temperatura e umidade relativa do ar intergranular que prevalece no local de armazenamento (SMANIOTTO et al., 2014).

A umidade relativa do ar intergranular aliada a temperatura do ambiente tem forte influência sobre a qualidade dos grãos armazenados (RANI et al., 2013). A variação da temperatura ambiente pode ser extrema, entre 0 e 40 °C, valores suficientes e favoráveis para infestações de insetos, contaminação por fungos e deterioração da massa de grãos armazenada.

A maioria dos insetos-praga de grãos armazenados é de origem tropical e subtropical, necessitando de temperaturas altas, na faixa de 27 °C a 34 °C para desenvolvimento completo. No entanto, esse desenvolvimento pode ser retardado ou paralisado se a temperatura ficar abaixo de 16 °C (QUIRINO et al., 2013).

A redução da temperatura dos grãos, reduz a velocidade das reações bioquímicas e metabólicas, reservas armazenadas no tecido de sustentação são desdobradas, transportadas e ressintetizadas no eixo embrionário (AGUIAR et al., 2012), permitindo a manutenção das características iniciais de armazenamento dos grãos por períodos mais longos. Segundo Paraginski et al. (2015) milho armazenado em temperatura abaixo de 15 °C durante 12 meses não sofreram alterações significativas no peso de mil grãos, germinação, condutividade elétrica e perfil de ácidos graxos indicando um armazenamento seguro dos grãos armazenados.

2.4 Processos para resfriamento de grãos

2.4.1 Aeração

A aeração é uma prática da ventilação forçada com ar ambiente não aquecido, com fluxo de ar cientificamente dimensionado, que promove a redução e uniformidade da temperatura na massa de grãos armazenadas, visando preservar a qualidade ou solucionar problemas de conservação (ZIEGLER et al., 2021). A aeração também mantém o teor de água dos grãos em nível seguro, fazendo com que insetos sejam reduzidos ou eliminados (STEIDLE e LOPES, 2015).

A aeração periódica é essencial para evitar que essas mudanças na temperatura do ar no silo alterem as características e a qualidade da massa de grãos. Normalmente, a aeração faz uso do ar ambiente para refrigerar a massa de grãos por isso seu processo é baseado em uma análise técnica para realização (SZESZ JUNIOR et al., 2016).

Esta operação requer tempo e a decisão de aerar deve ser baseada nas condições psicrométricas do ar ambiente e da massa de grãos necessitando assim um monitoramento dessas variáveis (ZIEGLER et al., 2021).

Como é necessário a combinação das condições psicrométricas e da massa de grãos para a decisão da aeração, um manejo ineficaz desse processo pode resultar na deterioração do produto, secagem dos grãos ou umedecimento, conseqüentemente perdas nutricionais e redução do valor comercial (REED et al., 2000; MAGAN e ALDRED, 2007; KHATCHATOURIAN et al., 2016; SZESZ JUNIOR et al., 2016).

Outro ponto a ser ressaltado é em relação aos ventiladores utilizados na aeração, eles devem ser dimensionados corretamente para cada tipo de silo, permitindo que o ar atinja todas as partes do silo, com fluxo de ar e pressão estática adequados.

Segundo Silva et al. (2008), há diversos critérios para classificar os ventiladores, os mais utilizados são: Axial de baixa pressão, até 2, 0 kP a (200 mm.c.a) muito usado em aeração de pequenos e médios silos; centrífugo de média pressão, entre 2, 0 e 8, 0 kP a (200 a 800 mm.c.a) usado para aeração de silos de grandes alturas e também em secadores a alta temperatura; centrífugo de alta pressão: entre 8, 0 e 25 kP a (800 a 2.500 mm.c.a), usado para transporte pneumático

A vazão específica mínima de ar requerida depende da espécie de grão armazenado, da espessura da massa de grãos, do tipo de instalação e do número de estruturas de armazenagem existentes no sistema.

Geralmente, em climas frios, conforme Tabela 1, aliados a estruturas horizontais, as vazões específicas características para sistemas de aeração variam entre 0,05 e 0,1 m³ min⁻¹ t⁻¹. Nas estruturas verticais estas vazões variam entre 0,03 a 0,05 m³ min⁻¹ t⁻¹. Nas regiões quentes as vazões específicas variam entre 0,1 a 0,2 m³ min⁻¹ t⁻¹ para estruturas horizontais que armazenam grãos secos e entre 0,03 e 0,1 m³ min⁻¹ t⁻¹ para estruturas verticais (SILVA et. al., 2000).

Tabela 1 - Fluxos de ar para aeração de grãos em diferentes regiões e tipos de unidades armazenadoras.

Tipo de unidade/finalidade	Fluxo de ar (m ³ min ⁻¹ t ⁻¹ de grãos)	
	Região fria	Região quente
Horizontal / grão seco	0,05 a 0,10	0,10 a 0,20
Vertical / grão seco	0,02 a 0,05	0,03 a 0,10
Pulmão / grãos úmidos	0,30 a 0,6	0,30 a 0,60
Seca-aeração	0,50 a 1,00	0,50 a 1,00

Fonte: Silva (2008).

2.4.2 Resfriamento artificial

O resfriamento de grãos é uma tecnologia não tradicional, não química para armazenamento de *commodities* para prevenir o crescimento fúngico e os insetos de produtos armazenados. Essa tecnologia consiste em reduzir a temperatura da massa de grãos, de 25 °C para cerca de 15 °C, reduzindo assim as alterações nos grãos pelo seu processo respiratório, e também reduzindo sua suscetibilidade ao ataque de insetos, pois em temperaturas abaixo de 17 °C, a taxa de desenvolvimento de insetos cai perto de zero (PARAGINSKI et al., 2014; ZIEGLER et al., 2016; DEMITO et al., 2019; FERREIRA et al., 2018).

O grão é resfriado independentemente da temperatura ambiente e das condições de umidade relativa, usando um sistema móvel de refrigeração o qual controla conjuntamente a temperatura e a umidade relativa do ar da aeração. Assim, o ar frio e seco é soprado na massa

de grãos, principalmente em silos e armazéns verticais. Esse processo é lento, pois como ocorre na aeração, há uma frente de resfriamento, portanto, toda a massa precisa ser refrigerada, o que pode variar dependendo da capacidade e principalmente da altura dos silos (ZIEGLER et al., 2021).

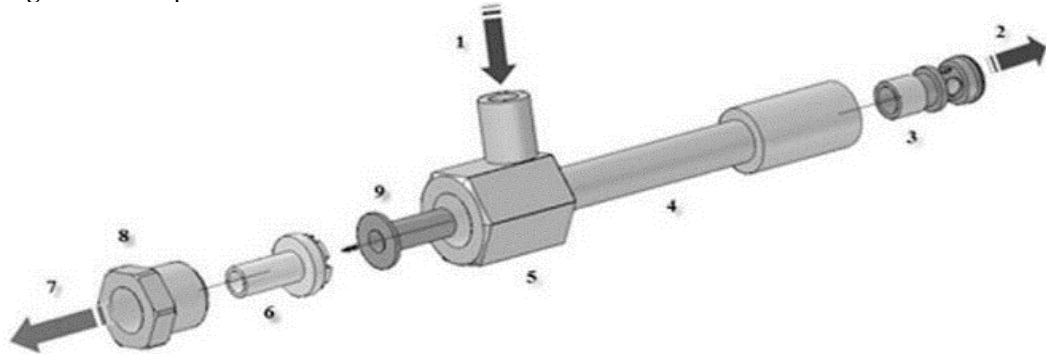
O consumo de energia é um fator importante a ser considerado neste sistema, sendo diretamente influenciado pelo tempo requerido para o resfriamento e pelo fluxo de ar utilizado durante o processo. Estudos realizados por Mayer e Navarro (2002), utilizando um equipamento resfriador de ar com potência de 55 kW e avaliando, comparativamente, o custo operacional anual do resfriamento e da aplicação de inseticidas para o controle de insetos praga do milho permitiram concluir que o custo da aeração mais a fumigação foi aproximadamente 120% superior ao custo do resfriamento. Com o mesmo equipamento, resfriaram trigo colhido no período de verão, no meio oeste americano. O custo operacional anual foi de US\$ 1,47/ t⁻¹ para o resfriamento e de US\$ 2,93/ t⁻¹ para a fumigação mais aeração com ar ambiente natural. A diminuição da temperatura da massa de grãos utilizando o resfriamento pode ser uma técnica comum em todas as unidades de armazenamento, com o propósito de evitar a deterioração. Contudo, necessita-se de conhecimentos científicos sobre a influência e o comportamento da temperatura nos grãos armazenados para a manutenção da qualidade (DEMITO e AFONSO, 2009).

2.5 Tubo de Vórtices: Alternativa para o resfriamento

O tubo de Ranque-Hilsch, também conhecido por tubo de vórtice foi descoberto por (RANQUE, 1933) e posteriormente detalhado por (HILSCH, 1947). Rudolf Hilsch estudou mais profundamente os parâmetros geométricos e a influência da pressão de entrada no desempenho do equipamento, recomendando em seu estudo que o tubo de vórtice fosse utilizado no resfriamento de ar em minas subterrâneas e na liquefação de gás natural (HILSCH, 1947).

Segundo Secchiaroli et al (2009) o tubo de vórtice é separado em alguns componentes mecânicos que são respectivamente: um bocal de entrada de ar comprimido (1), de uma válvula de controle de saída da corrente quente (2 e 3), tubo principal (4), da câmara de vórtice (5), gerador de vorticidade (6) anel rosqueado na saída da corrente fria (7 e 8), e de uma inserção de bronze (9), conforme ilustra Figura 3.

Figura 3 - Componentes de um tubo de vórtice

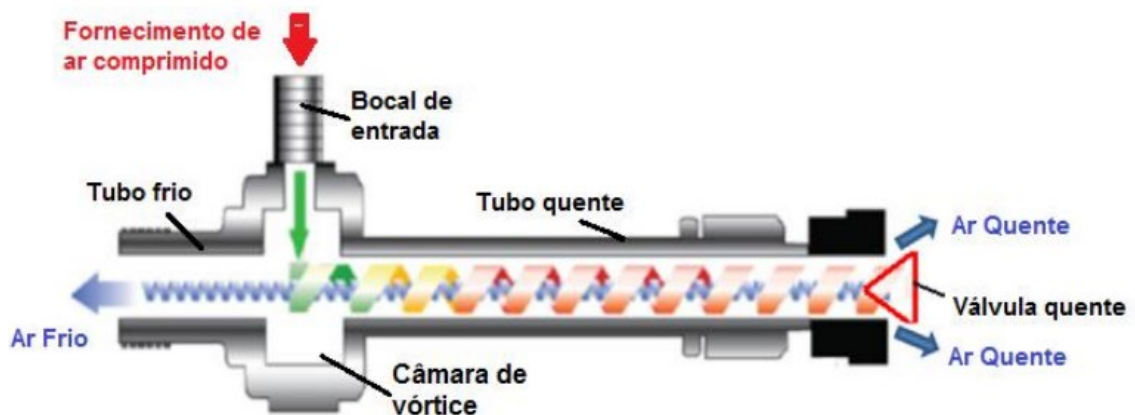


Fonte: SECCHIAROLI et al. (2009)

O tubo de vórtice é um dispositivo térmico simples, não possui parte moveis, que separa um fluxo de gás comprimido em dois fluxos simultâneos um com altas temperatura que podem chegar a 125 °C e outro com baixas que podem chegar a -45 °C. Este processo é conhecido como separação térmica ou separação de energia (GUO et al, 2019).

Segundo (ZHANG e GUO, 2018) em um tubo de vórtice contrafluxo, conforme ilustra a Figura 4, o gás comprimido é injetado tangencialmente através do bocal na câmara do vórtice, que promove a criação de um escoamento circular nas paredes internas do tubo. A velocidade tangencial e a velocidade de rotação podem chegar a 300 m/s e 10^6 rad/min respectivamente, na saída do bocal de entrada. Quando o fluxo de gás se move em direção a extremidade quente, é formado um gradiente de pressão adversa, que ao atingir a válvula de controle de fluxo quente, localizada na extremidade do tubo, parte do fluxo de gás que está aquecido escapa pela válvula, enquanto o restante é devolvido para o sistema, formando um fluxo de contracorrente com um ar frio.

Figura 4 - Desenho demonstrativo de um tubo de vórtice contracorrente



Fonte: AHMED et al. (2017)

Desde a descoberta do tubo por Ranque, o dispositivo tem sido um objeto de interesse, tanto teórico quanto prático. O tubo de vórtice tem muitas vantagens que o torna muito atraente para aplicações industriais, como refrigeração de componentes mecânicos, componentes elétricos e eletrônicos, soldas ultrassônicas, refrigeração em máquinas de CNC e principalmente na refrigeração de usinagens, pois o tubo não utiliza nenhum tipo de composto químico nocivo para a refrigeração (MAURYA e BHAVSAR, 2013).

De acordo com Zahng e Guo (2018) o tubo de Ranque-Hilschar apresenta vantagens em relação a outros sistemas de refrigeração, tais como:

- Construção simples e baixo custo;
- Baixa manutenção;
- Utilização do ar atmosférico como fluido refrigerante;
- Não utiliza composto químico, tornando-se um dispositivo não poluente.

Os estudos científicos sobre o tubo de vórtice estão aumentando com o passar dos anos, e já é uma alternativa para aplicação na área de refrigeração. Seu fácil uso, necessitando apenas de um compressor de ar ligado à rede elétrica e sua baixa manutenção, chama atenção para o uso na área de armazenamento resfriado de grãos. Já que as tecnologias utilizadas para o resfriamento no armazenamento ainda são muito caras sendo assim inviável para muitos produtores.

2.6 Aquisição de dados e controle de sistemas

Os sistemas de aquisição de dados com microcontroladores como Arduino e sensores eletrônicos, é uma alternativa de baixo custo para o monitoramento da temperatura da massa de grãos armazenados e da umidade relativa do ar. Com os dados adquiridos pelo sistema, o responsável pelo armazenamento pode tomar decisões que evita a perda na qualidade dos grãos.

2.6.1 Arduino

O Arduino foi criado em 2005 como uma plataforma open source, com o intuito de criar projetos de forma rápida e fácil e com uma curva de aprendizagem baixa (CAVALCANTE et al., 2011).

A placa do Arduino é composta por uma placa de prototipagem, que pode receber diversos acessórios, além de ser um produto de pequenas dimensões facilitado seu transporte, custo relativamente baixo e uma programação simples em código aberto.

Segundo Torres et al. (2015) o microcontrolador Arduino UNO, foi utilizado na aquisição de dados meteorológicas e obteve um desempenho satisfatório.

Segundo Schiavon et al (2019) o Arduino possibilita o controle da temperatura da massa de grãos armazenada, sendo assim uma forma viável e de baixo custo para o monitoramento variáveis dos armazéns.

2.6.2 Sensores Eletrônicos

Os sensores eletrônicos ganharam espaço nas aplicações de controle de umidade relativa do ar e temperatura, variáveis importantes no armazenamento de grãos. Esses sensores dispõem de algumas características que despertam o interesse no seu uso tais como: repostas lineares dentro da faixa de trabalho, dispensam rotinas de calibração e uma compatibilidade com microcontroladores para aquisição de dados (BICA et al., 2018).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Descrição da Área de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido no Laboratório de Secagem e Armazenamento de Produtos Vegetais, situado no Campus Central de Ciências Exatas e Tecnológicas Henrique Santilo, da Universidade Estadual de Goiás em Anápolis-GO. O laboratório situa-se no Planalto Central Brasileiro, com latitude 16°19' 36" S e longitude: 48° 57' 10" O e altitude de 1.017 m, com clima tropical de savana, megatérmico, do tipo Aw conforme classificação de Köppen, e temperaturas médias variando de 18° a 36°C.

3.2 Caracterização dos Grãos

Os grãos de milho (*Zeamays L.*) utilizados no experimento, com um teor de água inicial de 11,46% (b.u.), foram fornecidos pela Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária (EMATER). Os grãos fornecidos pela EMATER sofreram uma secagem natural no campo, com isso os grãos que podem ter sofrido infestação de insetos.

3.3 Caracterização dos equipamentos que compõem o sistema de aeração convencional

3.3.1 Silo Protótipo

Foi utilizado um silo metálico cilíndrico, constituído de material liso, com as dimensões de 0,9 m de diâmetro e 3 m de altura, com capacidade de armazenar 1500 kg de grãos de milho, com peso específico de 750 kg m⁻³.

Foi construído um plênium de alvenaria, para possibilitar a entrada de ar no silo, com dimensões de 1,2 m de diâmetro e 0,3 m de altura, conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5 - Silo protótipo utilizado para avaliar o sistema de aeração convencional A



Fonte: AUTOR

Na superfície externa do silo, foi inserido o isolamento térmico, constituído de uma camada de lã de vidro, de 0,06 m de espessura (Figura 6), visando minimizar o aquecimento dos grãos provenientes das condições do ambiente externo ao silo. Na parte inferior do silo, foi instalado chapas de aço perfurado com crivos de diâmetro de 0,006 m, para possibilitar a passagem de ar pela massa de grãos, conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Vista superior do silo protótipo

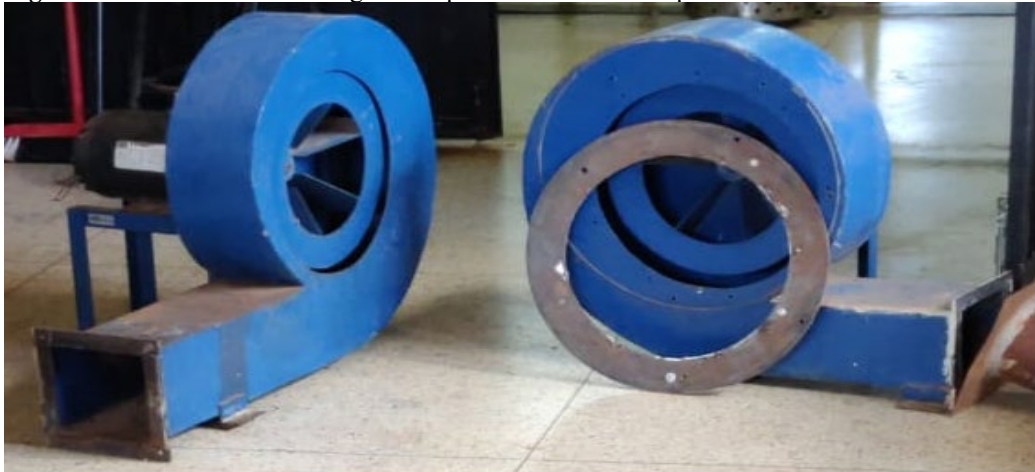


Fonte: ANTUNES (2016)

3.3.2. Ventilador

O ventilador centrífugo de pás radiais, construído em chapa metálica, foi utilizado neste trabalho, Figura 7. A vazão de ar fornecida pelo ventilador foi de $6 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e a pressão estática foi de 35 mmca.m^{-1} . Motor trifásico de 1 cv de alta rotação foi utilizado para impulsionar as pás radiais.

Figura 7 - Ventiladores centrífugos com pás radiais utilizados para insuflar ar nos silos



Fonte: AUTOR

3.3.3 Inversor de Frequência

O inversor de frequência da marca PowerFlex4 Figura 8, foi utilizado para regular a rotação do rotor do ventilador, visando atingir a vazão de ar de aeração de $0,15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, com isso a frequência utilizada no inversor foi de 8 hertz (Hz).

Figura 8 - Inversor de frequência utilizado para regular a rotação do rotor do ventilador



Fonte: AUTOR

3.4 Caracterização dos equipamentos que compõem o sistema de aeração artificialmente resfriado

3.4.1 Silo Protótipo

O silo protótipo e o plênum utilizado no sistema de aeração artificialmente resfriado é constituído dos mesmos materiais e dimensões que o silo com sistema de aeração convencional, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9 - Silo protótipo utilizado para avaliar o sistema de aeração artificialmente resfriado B



Fonte: AUTOR

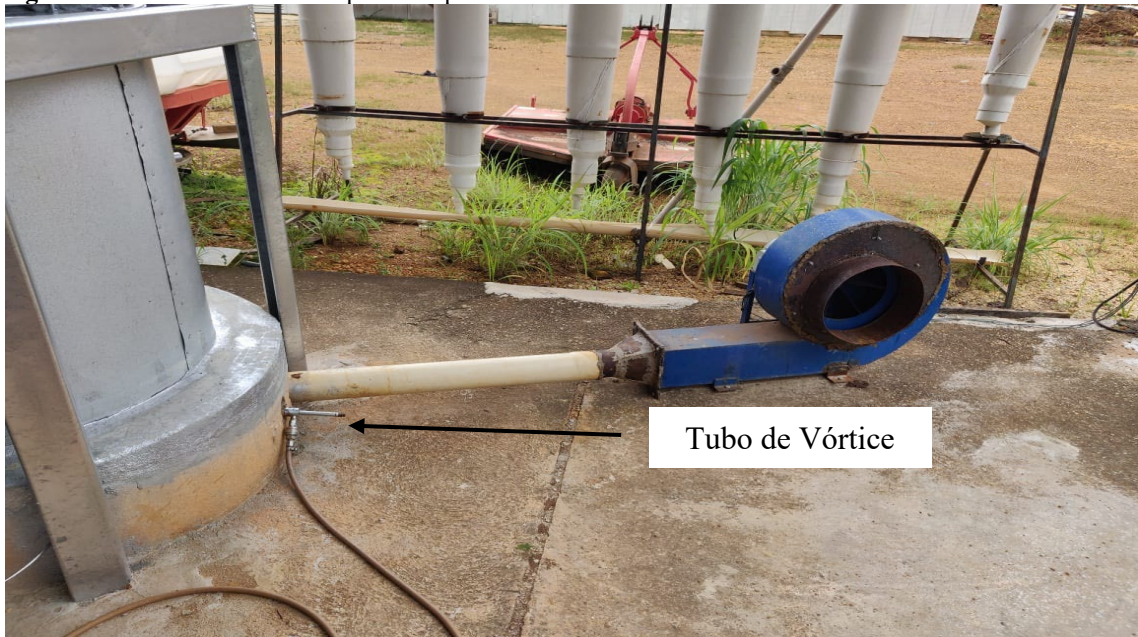
3.4.2 Ventilador

O ventilador utilizado no sistema de aeração artificialmente resfriada tem características iguais ao da aeração convencional, fornecendo uma vazão de $6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e uma pressão estática de $35 \text{ mmca} \cdot \text{m}^1$, com um motor trifásico de 1 cv de alta rotação.

3.4.3 Tubo de vórtice

O tubo de vórtice de pequeno porte da marca EXAIR, modelo 3230, foi utilizado para fornecer o resfriamento artificial. As temperaturas fornecidas pelo tubo de vórtice foram entre -1°C a 56°C e com vazão máxima de $0,6 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. Essas variações de temperaturas dependem do tamanho do tubo e da potência do compressor utilizado. O tubo de vórtice foi acoplado na lateral do plênum do silo conforme Figura 10, onde o ar frio foi insuflado.

Figura 10 - Tubo de vórtice acoplado ao plênem onde o ar frio foi insuflado



Fonte: AUTOR.

3.4.4 Compressor

Foi utilizado um compressor da marca Pressure, Figura 11, com as seguintes características:

- Pressão de operação: Máxima 175 lbf pol^{-2} (12,07 bar);
- Volume do reservatório: 250 L;
- Vazão de: 20 pcm ($0,6 \text{ m}^3/\text{min}^{-1}$);
- Potência do motor: 5 cv trifásico.

Figura 11 - Compressor utilizado para fornecer o ar comprimido ao tubo de vórtice



Fonte: AUTOR

3.4.5 Inversor de Frequência

O inversor de frequência da marca PowerFlex₄ Figura 8, foi utilizado para regular a rotação do rotor do ventilador, visando atingir a vazão de ar de aeração de $0,15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, com isso a frequência utilizada no inversor foi de 7,2 hertz (Hz).

3.5 Procedimento preliminar para aeração convencional e aeração artificialmente resfriada

No sistema de aeração artificialmente resfriado, o tubo de vórtice era acionado 15 minutos antes de ligar o ventilador, para que a temperatura do ar insuflado pelo ventilador no silo estivesse menor que a temperatura do ar ambiente. Após os 15 minutos resfriando o plênum, os ventiladores dos sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado foram acionados ao mesmo tempo.

Os dois sistemas foram ligados todos os dias às 19 horas e desligados às 8 horas. Foi determinado esse horário de acionamento e desligamento, pois o sistema de aeração convencional necessita do ar ambiente para fazer aeração e nesses horários a temperatura do ar ambiente é mais baixa.

3.6 Sistema de Aquecimento

Um dispositivo de aquecimento do ar foi desenvolvido para aquecer os grãos armazenados até a temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. O aquecimento dos grãos se faz necessário para simular a condição real da temperatura de saída dos grãos de um secador comercial (LAWRENCE e MAIER, 2011).

O dispositivo para o aquecimento da massa de grãos, foi construído com material metálico, com dimensões de $0,5 \times 0,16 \times 0,15 \text{ m}$, Figura 12. Dentro do dispositivo foram colocados dois resistores (tipo U), com dimensões $0,045 \times 0,06 \text{ m}$ e potências de 2 kw e 1 kw.

Figura 12 - Dispositivo para o aquecimento da massa de grãos



Fonte: AUTOR

O sistema de aquecimento foi acoplado aos ventiladores e aos plênuns dos silos Figura 13. Os testes com os sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado só

iniciaram quando toda a massa de grãos havia alcançado 30 °C. Para o monitoramento do processo de aquecimento, foi instalado um sensor de temperatura dentro de cada plenum.

Figura 13 - Sistema de aquecimento acoplado ao ventilador e plenum

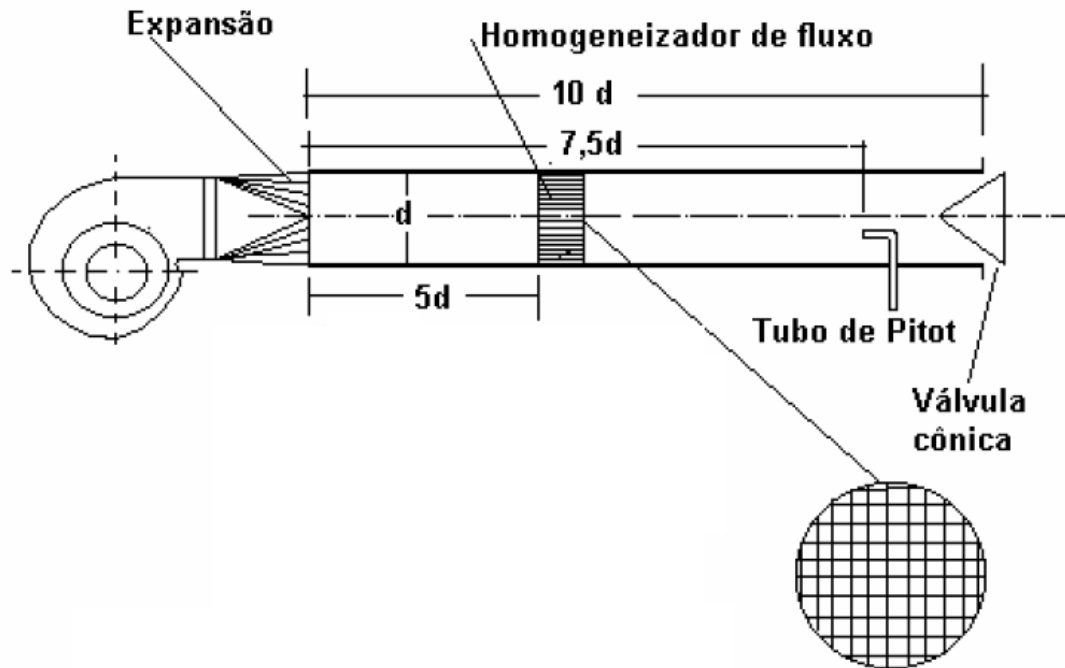


Fonte: AUTOR

3.7 Determinação da vazão de ar dos ventiladores

Para determinar a vazão de ar dos ventiladores, foi aplicada a metodologia de Delmée (1982), que utiliza o tubo de pitot para determinar a vazão de ar em tubulações. Para isso, foi acoplado ao ventilador uma tubulação de PVC, com 0,2 m de diâmetro e 2,0 m de comprimento, Figura 14. O tubo de pitot foi inserido na tubulação por um orifício na tubulação, disposto à 1,7 m do ventilador. Foi colocado um homogeneizador de fluxo de ar na tubulação, construído com alvéolos de seção quadrada, a 0,7 m da saída de ar do ventilador.

Figura 14 - Processo para determinação da vazão de ar de um ventilador utilizando o tubo de pitot



Fonte: SILVA et al. (2000)

A determinação da vazão de ar foi realizada pela diferença entre pressão total (P_t) e estática (P_e), com o auxílio de um manômetro com escala de 500 mm.c.a e precisão de 0,1 mm.c.a, instalado no tubo de Pitot.

A avaliação do ar provindo do ventilador, foi determinada utilizando as equações de Bernoulli (Equação 1 – conservação de energia). Por isso, é necessário estimar a velocidade média, a partir das variações de pressões exercidas pelo fluido em condutos fechados (DELMÉE, 1982; MACINTYRE, 1990).

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \quad (1)$$

em que:

P = medida de pressão total, m.c.a;

v = velocidade média do fluido, m s^{-1} ;

ρ = Peso específico do fluido, N/m^3 ;

g = aceleração da gravidade, m s^{-2} .

e, conseqüentemente a velocidade de escoamento do ar foi calculada a partir da equação

2.

$$v = \sqrt{2.g.h} \quad (2)$$

em que:

g = aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$;

h = altura manométrica, m.c.a.

Por fim, a vazão de ar do ventilador foi determinada utilizando da Equação 3 (MACINTYRE, 1990).

$$Q = A.v \quad (3)$$

em que:

Q = vazão de ar do ventilador, $m^3\ s^{-1}$.

A = área de seção transversal da tubulação, m^2 ;

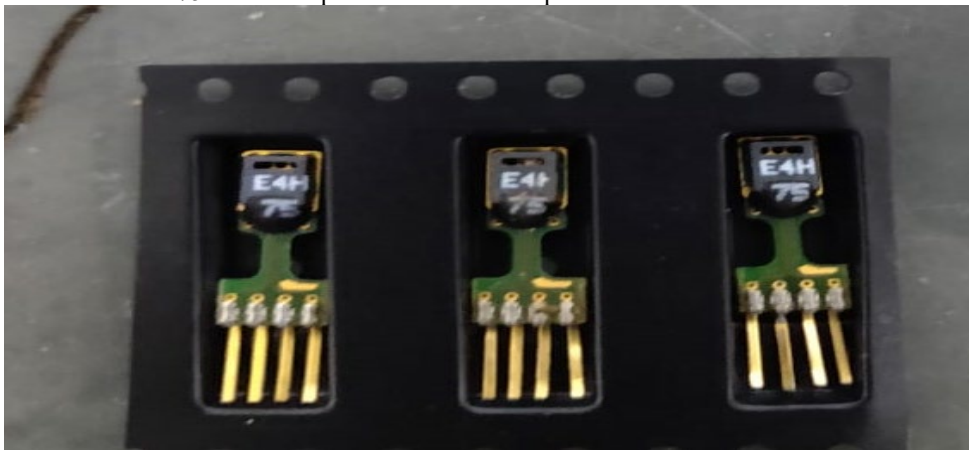
V = velocidade de escoamento do ar de aeração, $m\ s^{-1}$.

3.8 Caracterização do controle do sistema de aeração

3.8.1 Sensores

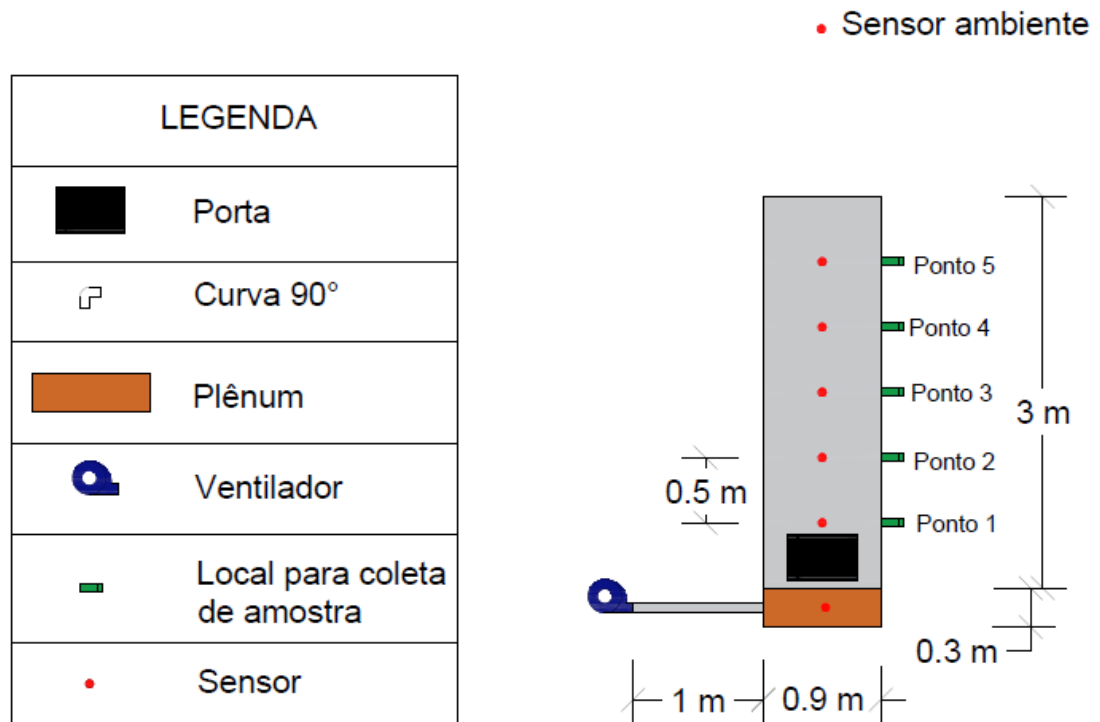
O sensor selecionado para monitorar a temperatura e a umidade do ar intersticial foi o modelo SHT 75 Figura 15, da família Sensirion. A faixa de leitura da temperatura é de - 40 a 123,8 °C com uma acurácia de 0,4 °C. Já a umidade relativa pode variar de 0 a 100% com uma acurácia de 1,8%. Foram utilizados 13 sensores no total. Em cada silo foram distribuídos 5 sensores, espaçados em 0,5 m na massa de grãos, nos plênuns foram utilizados 1 sensor em cada silo e 1 para os parâmetros ambientais, posicionado em local externo à massa de grãos, Figura 16.

Figura 15 - Sensores SHT 75 utilizados para monitorar a temperatura e umidade relativa dos silos



Fonte: AUTOR

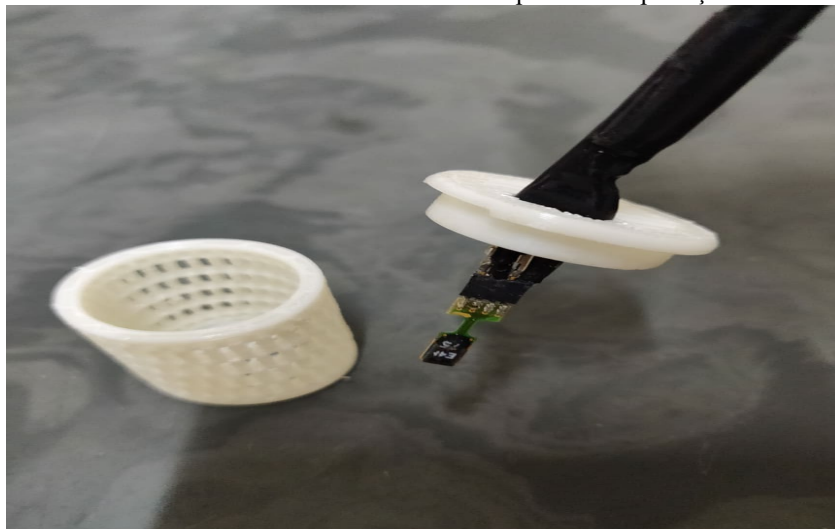
Figura 16 - Esquema do silo protótipo com os sensores dispostos no centro



Fonte: AUTOR

Todos os sensores foram conectados a um cabo de rede cat5, oito vias e blindado para não ocorrer interferências eletromagnéticas. Para que os sensores não ficassem em contato direto com o milho, foi plotado em uma impressora 3D um dispositivo de proteção Figura 17. O dispositivo possuía as seguintes dimensões de 0,035 m de altura e 0,03 m de diâmetro, com crivos retangulares de 0,001 m de altura e 0,0005 m de largura, e com uma tampa de 0,03 m de diâmetro.

Figura 17 - Sensor SHT 75 conectado ao cabo de rede com o dispositivo de proteção



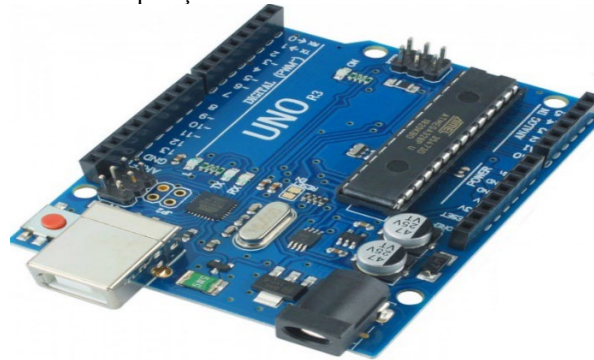
Fonte: AUTOR

3.8.2 Microcontrolador Arduino

O microcontrolador Arduino foi utilizado, pois sua programação é simples, de fácil aquisição e atendeu os requisitos de hardware para a execução do projeto. O microcontrolador é responsável por fazer a intermediação no sistema, onde ele recebe a informação dos parâmetros de temperatura e umidade relativa e envia para microcomputador que apresenta as informações ao usuário

O modelo de Arduino escolhido foi o UNO, Figura 18, que possui um canal de comunicação serial, 13 portas de entrada e saída digitais, 6 portas analógicas e um processador ATMEGA 328P. Foram utilizadas 3 placas de Arduino duas para os silos e uma para os parâmetros ambientais.

Figura 18 - Arduino Uno utilizado na aquisição de dados

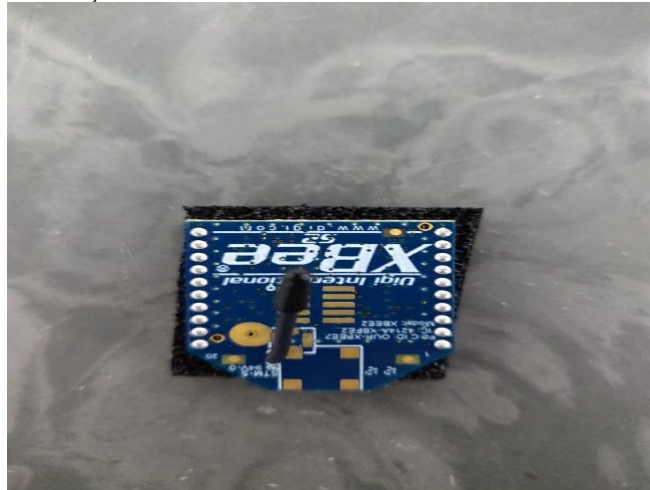


Fonte: AUTOR

3.8.3 Módulos Xbee

Os módulos Xbee foram utilizados para a comunicação wireless com a placa Arduino instalada no silo (a). O modelo de módulo Xbee escolhido foi S2 Figura 19, com uma frequência de comunicação de 2,4GHZ. Foram utilizados dois módulos, um ligado ao Arduino e outro no microcomputador utilizado para armazenar os dados.

Figura 19 - Módulo de comunicação Xbee utilizado no Arduino



Fonte: AUTOR

3.9 Sistema de aquisição de dados

No sistema de aquisição de dados o algoritmo foi elaborado utilizando as bibliotecas padrões, disponibilizadas pelo software Arduino (MCROBERTS, 2011). Para apresentar em tempo real os valores de temperatura, umidade relativa, foi desenvolvido outro sistema com base na linguagem de programação PHP, aonde os dados foram coletados e armazenados a cada dez minutos.

3.10 Teor de água dos grãos

Amostras dos grãos foram retiradas a cada três dias após o início da aeração convencional e artificialmente resfriada, para determinação do perfil de umidade. A umidade foi determinada por meio do método padrão da estufa a 105 °C, com circulação de ar, por 24 horas, em três repetições de acordo com BRASIL (2009).

3.11 Análise Estatística

Foram realizados as análises descritivas e o teste-t de Student com nível de significância à 5% para comparação das médias temperatura dos processos de aeração convencional e aeração artificialmente resfriada, foi utilizado o programa computacional PAST 1.94b para a análise estatística (HAMMER et al., 2001)

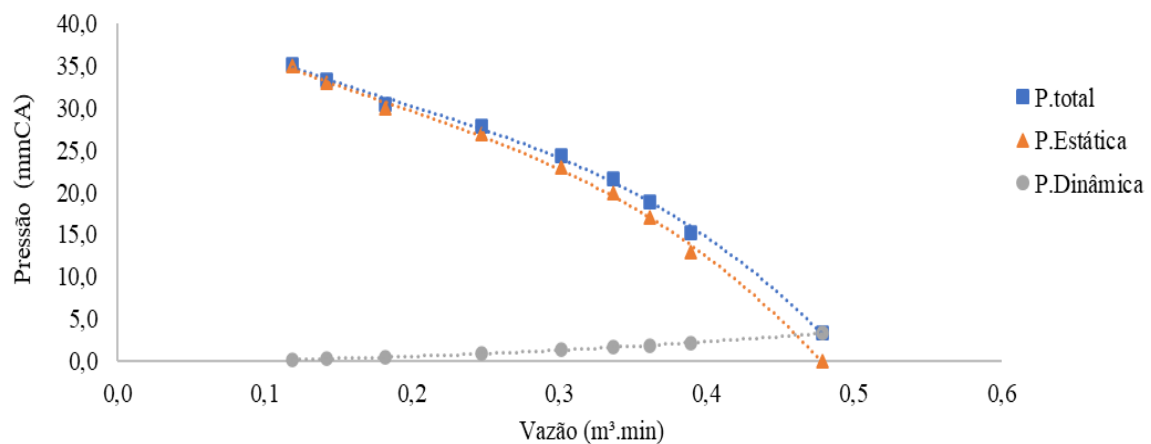
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Curvas característica dos ventiladores

Os ventiladores centrífugos de pás radiais utilizados nos sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado tiveram suas curvas características obtidas como ilustrado nas Figuras 20 e 21. As curvas características obtidas tiveram o mesmo comportamento encontrado de Silva et al. (2008).

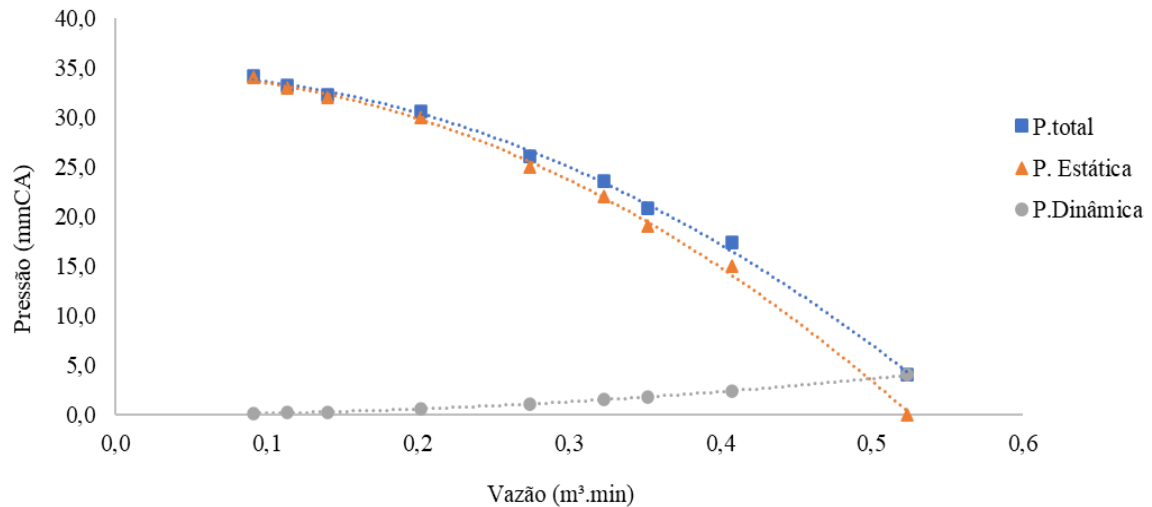
Observa-se que as curvas características dos dois ventiladores foram semelhantes, o que mostra que os equipamentos utilizados não diferem entre si nas características construtivas. Nota-se que quando o valor da vazão dos ventiladores está próximo de $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{min}$, as pressões estática e total tem os seus valores máximos; já, quando é utilizado a menor vazão a energia cinética é menor que a energia de pressão na saída do ventilador. Nota-se ainda, que, quando ocorre o aumento da vazão, podemos perceber o aumento na perda de carga, isso acontece pois ocorre a transformação de energia cinética em energia potencial de pressão.

Figura 20 - Curvas características do ventilador centrífugo de pás radiais utilizado no sistema de aeração convencional



Fonte: AUTOR

Figura 21 - Curvas características do ventilador centrífugo de pás radiais utilizado no sistema de aeração artificialmente resfriado



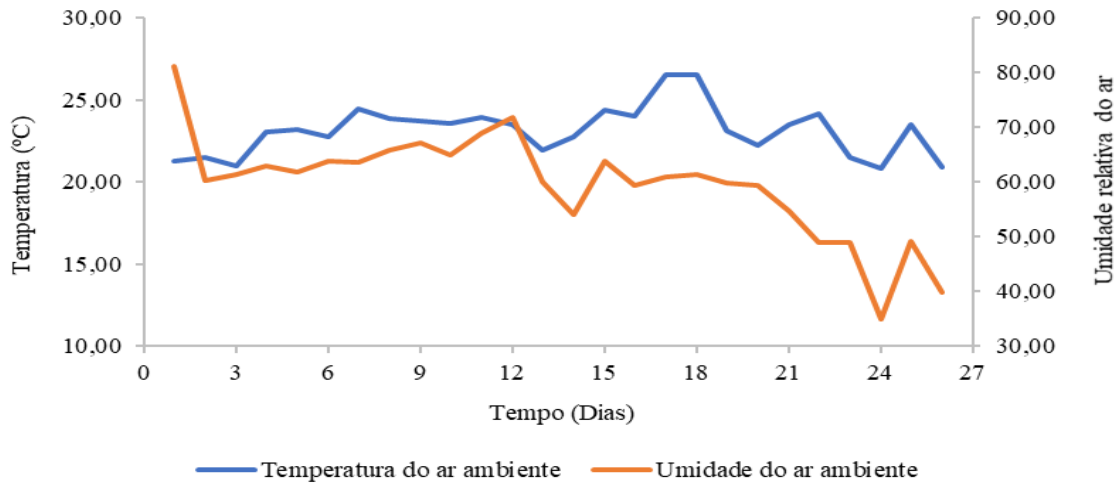
Fonte: AUTOR

4.2 Condições de temperatura e ar ambiente durante as avaliações

As condições de temperatura e umidade relativa do ar durante o período de avaliação (14 de janeiro a 9 de fevereiro de 2021) dos sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriada retratam a transição do período chuvoso para o período de seca, característico da cidade de Anápolis-GO.

Notou-se que durante o período de avaliação dos sistemas a temperatura do ar não sofreu grandes variações Figura 22, oscilando de 20,97 até 26,56 °C, em contrapartida os dados coletados da umidade relativa do ar durante os 26 dias de avaliação variaram de 81,13 até 34,78 %, acompanhando o período característico da região. Segundo Lopes et al. (2015) essas oscilações na umidade relativa do ar mostram que os grãos armazenados necessitam de um controle eficiente no processo de aeração.

Figura 22 - Média diária da temperatura e umidade relativa do ar durante o período de avaliação dos sistemas de aeração convencional e artificialmente resfriada



Fonte: AUTOR

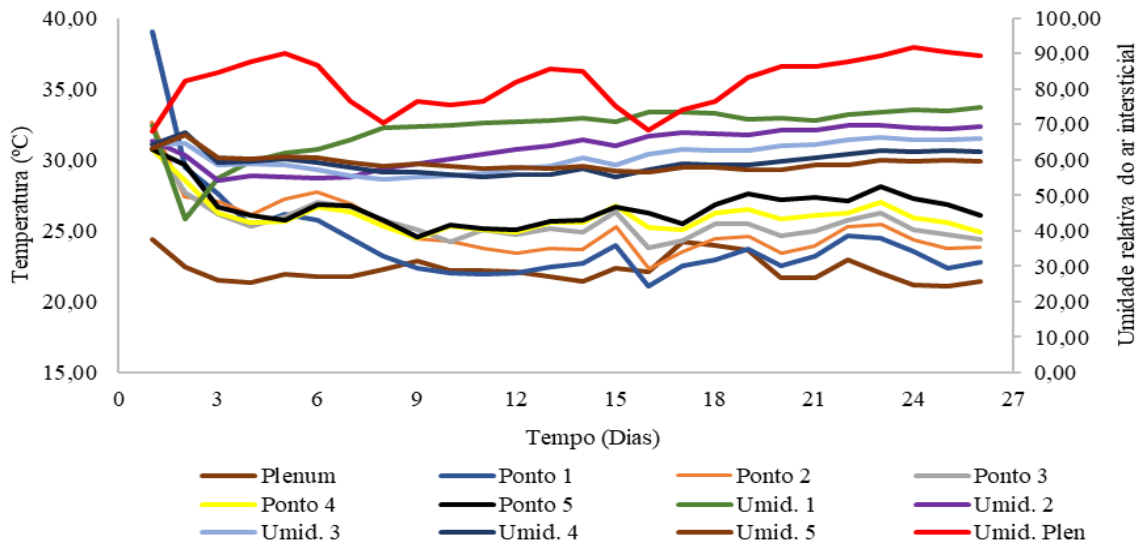
4.3 Frente de resfriamento

A variação da temperatura dos grãos armazenados durante o período de avaliação dos sistemas de aeração convencional e artificialmente resfriado, nos 5 pontos dos silos A e B, esta apresentada nas Figuras 23 e 24.

Notou-se que a temperatura e umidade intersticial do ar na massa de grãos nos silos A e B tiveram um comportamento semelhantes durante os 26 dias de avaliação, a média da temperatura e umidade do ar intersticial no final do armazenamento para o silo A com aeração convencional foi de $25,57 \pm 1,85$ °C e $62,27 \pm 2,82\%$ e, para o silo B com o sistema de aeração artificialmente resfriado foi de $24,89 \pm 1,87$ °C e $61,79 \pm 2,23\%$.

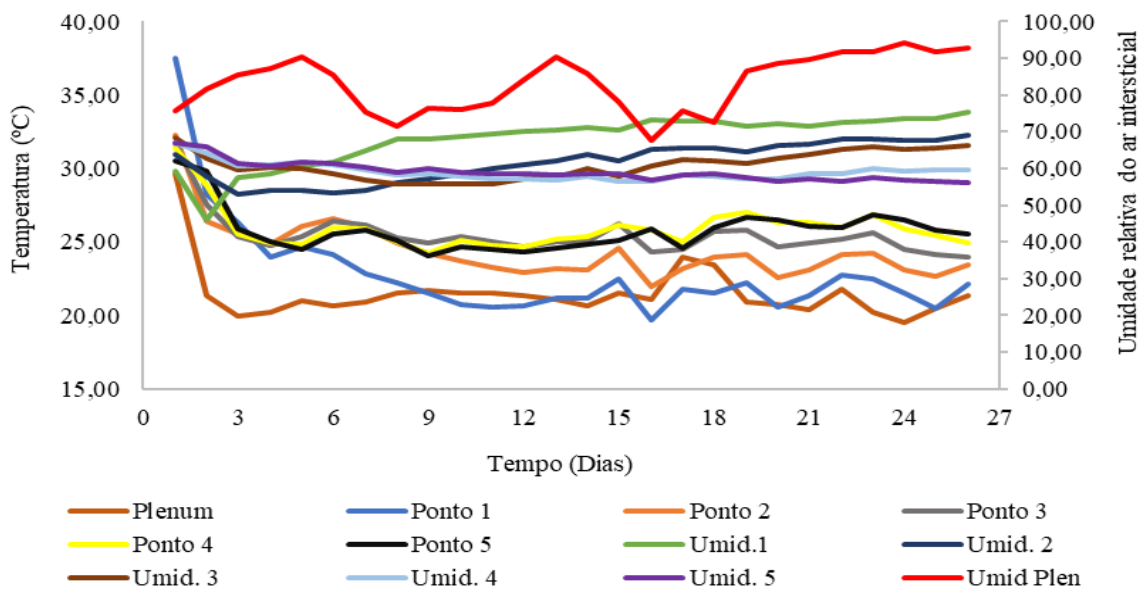
A média de temperatura da massa de grãos dos dois silos ficou acima do esperado e isso foi devido a ação de insetos. Segundo Antunes et al (2011) os insetos proporcionam um aquecimento na massa grãos, por meio do aumento da atividade metabólica e taxa de respiração dos grãos armazenados.

Figura 23 - Variação da temperatura e umidade do ar intersticial da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5 e Plenum) do silo A



Fonte: AUTOR

Figura 24 - Variação da temperatura e umidade do ar intersticial da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5 e Plenum) do silo B



Fonte: AUTOR.

Quando ocorre a redução da temperatura na massa de grãos, pode-se dizer que a aeração foi satisfatória e quando a temperatura de todo o silo é reduzida, pode-se inferir que a frente de resfriamento alcançou o topo silo. De acordo com Figuras 23 e 24, é possível notar a frente de resfriamento nos silos A e B, a redução da temperatura na massa de grãos ocorreu no sentido vertical, de modo ascendente no silo. O resfriamento na massa de grãos foi mais intenso nos

pontos 1 e 2 para os dois silos, a partir do ponto 3 o processo de redução da temperatura foi mais lento.

Notou-se que durante o processo de avaliação do sistema de aeração convencional e artificialmente resfriado, os pontos (1 e 2), mostraram semelhanças na temperatura e umidade relativa intersticial do ar durante o processo de resfriamento. As temperaturas mais baixas registradas nos pontos 1 e 2 do silo A, foram de 21,09 e 22,30 °C respectivamente no decimo sexto dia de avaliação. Já no silo B no mesmo período de avaliação a temperatura registrada nos mesmos pontos foi de 19,66 e 21,92 °C, respectivamente, tendo uma diferença de 1,43 °C no ponto 1 e 0,38 °C no ponto 2.

Verificou-se que nos pontos 3, 4 e 5 do silo A as temperaturas mais baixas foram registradas no último dia de avaliação, a saber: 24,38; 24,95 e 26,10 °C respectivamente. Já no silo B para os mesmos pontos as temperaturas foram 23,98; 24,94 e 25,54 °C respectivamente. Observa-se que em todos os pontos as temperaturas mais baixas foram no sistema de aeração artificialmente resfriado. Segundo Quirino et al. (2013), as camadas superiores dos silos sofrem mais influência do ambiente no armazenamento que as camadas inferiores, levando assim mais tempo para o seu resfriamento.

Em relação a temperatura dos plenuns, observa-se que o plenum do silo B registrou as temperaturas mais baixas em relação ao do silo A e a temperatura do ar ambiente, isso ocorreu por conta do tubo de vórtice que insuflava o ar frio no plenum. É possível notar, também, que ao acionar o tubo de vórtice a diferença de temperatura entre o plenum do silo B e a temperatura do ar ambiente foi de 4 °C, e ao ligar o ventilador, essa diferença reduzia para 2 °C. Esse incremento na temperatura foi gerado por conta da temperatura mais elevada do ar ambiente, que foi insuflado no plenum.

Para que o tubo de vórtice funcione de forma eficiente, a pressão de entrada do ar deve ser de 7 bar constantemente. Whang et al (2009) utilizaram a pressão de entrada de 7 bar e obtiveram o melhor efeito de refrigeração. Nos testes para iniciar as avaliações dos sistemas utilizou-se dois compressores, ligados em paralelo, que mantinham a pressão de entrada em 7 bar. Mas no primeiro dia de experimento um dos compressores estragou e o sistema de aeração artificialmente resfriado só trabalhou com um. Assim o compressor manteve a pressão de entrada de 4 bar, diminuindo a eficiência do sistema.

Na umidade relativa do ar intersticial notou-se que no ponto 1, ocorreu uma redução de 69,78% para 43,50 % no silo A, e no silo B de 59,28% para 45,95% no do primeiro dia para o segundo dia de avaliação. A redução na umidade relativa do ar intersticial foi promovida pelo aquecimento na massa de grãos antes de iniciar a avaliação dos sistemas. Observa-se que as

temperaturas no primeiro dia de avaliação no ponto 1 os silos A e B são maiores em relação aos demais pontos, ocasionando uma secagem do ar.

Observou-se que nos plenuns do silo A e do silo B a umidade do ar intersticial não sofreu interferência da umidade do ar ambiente. Nota-se na Figura 22 que a umidade do ar ambiente reduziu durante o período de avaliação, acompanhando o clima da região.

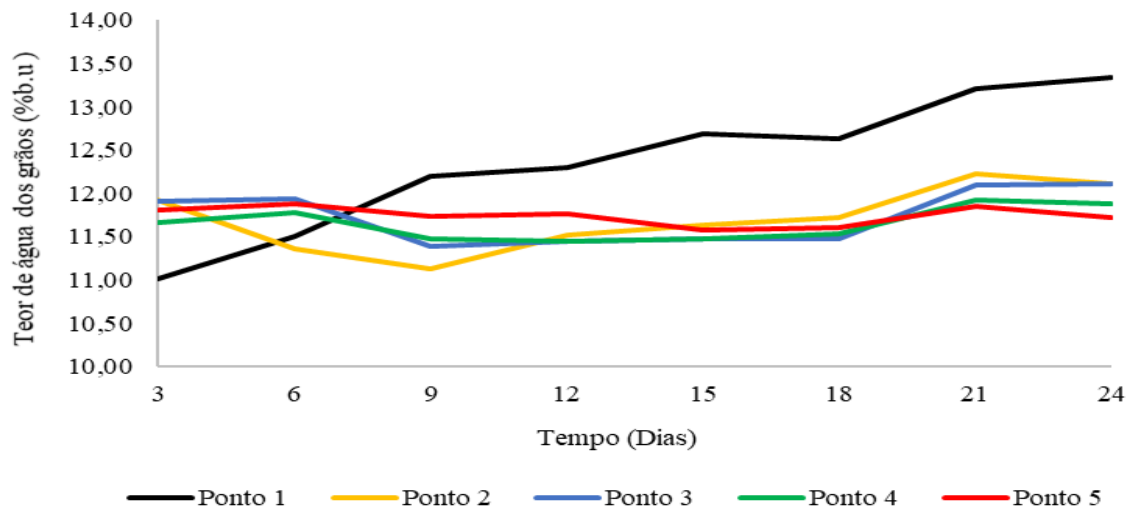
Esse incremento na umidade do ar intersticial no plenum do Silo A foi gerado por conta das precipitações que ocorreram durante o experimento. Já no silo B esse incremento se deu por conta do sistema de resfriamento que ao ser acionado liberava água dentro do plenum, isso fez com que a umidade registrada nesse ponto no final da avaliação de 92,94 %.

4.4 Teor de água dos grãos

A evolução do teor de água em % b.u na massa de grãos dos silos A e B, é apresentado nas Figuras 25 e 26 para os cinco pontos monitorados. As variações do teor de água na massa de grãos ocorreram ao longo do período de avaliação devido à higroscopicidade dos grãos. Essas variações ocorrem até que os grãos atinjam o teor de água de equilíbrio com o ambiente. Observou-se que essas variações ocorreram tanto pela interferência de fatores externos, como a umidade relativa do ar e temperatura do ar de aeração e também pela a umidade do ar intersticial dos plenuns.

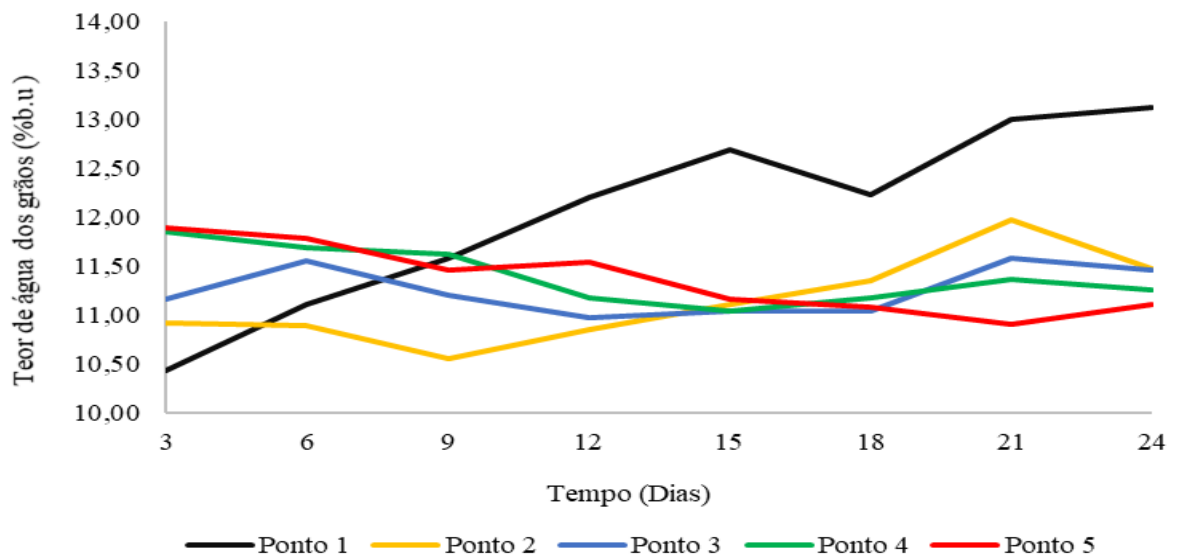
O teor de água médio inicial da massa de grãos no silo A foi de $11,67 \pm 0,38$ % b.u e para o silo B $11,25 \pm 0,63$ % b.u. Verifica-se que em todos os pontos o teor de água dos grãos permaneceu abaixo de 12% b.u, garantindo um bom armazenamento. Segundo Coradi e Lemes (2019), as qualidades físico-químicas e microbiológicas estão diretamente ligadas com o teor de água dos grãos por isso quanto menor, melhor será a qualidade dos grãos armazenados. Ainda, Bessa et al (2015) concluíram que os grãos armazenados durante seis e oito meses devem ser mantidos com um teor de água de 10 a 12 % b.u.

Figura 25 - Variação do teor de água em % b.u da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5) no silo A



Fonte: AUTOR

Figura 26 - Variação do teor de água em % b.u da massa de grãos nos pontos (1, 2, 3, 4, 5) no silo



Fonte: AUTOR

Notou-se que no ponto 1 dos dois silos o teor de água teve uma tendencia semelhante, no silo A o teor de água % b.u no ponto 1 foi de $11,02 \pm 0,14$ % b.u e no silo B foi de $10,43 \pm 0,36$ % b.u, observa-se que os grãos nesse ponto sofreram uma secagem maior em relação aos demais, isso se deu por conta do aquecimento feito antes de iniciar a avaliação dos sistemas de aeração.

Em contrapartida o ponto 1 sofreu um aumento nos níveis no teor de água que ultrapassaram o limite recomendado para um armazenamento seguro, que segundo Chigoverah e Mvumi (2016) o teor de água recomendado para grãos de milho em armazenamento não

hermético é de até 12,5% b.u. O teor de água % b.u dos grãos no ponto 1 determinado no último de dia de avaliação foi de $13,33 \pm 0,12$ % b.u para o silo A e $13,12 \pm 0,02$ % b.u para o silo B.

Verifica-se que essa variação no teor de água dos grãos no ponto 1 ocorreu devido a migração da umidade do ar intersticial dos plenuns para a massa de grãos e pela infestação de insetos que estavam em maior concentração no ponto 1. Autores como Antunes et al. (2011) e Pinto et al. (2002) observaram que a infestação de insetos resulta num aumento no teor de água nos grãos armazenados em 3,6 pontos percentuais em 90 dias de armazenamento, esse aumento se deve ao metabolismo dos insetos e sua respiração.

No ponto 2 dos silos, notou-se que do sexto dia para o nono dia de determinação do teor de água dos grãos diminuiu. Já no decimo segundo dia os grãos nesse ponto entraram em equilíbrio higroscópico. Porém no último de dia de avaliação a umidade dos grãos elevou-se sendo: $12,12 \pm 0,03$ % b.u para o silo A e $11,47 \pm 0,14$ % b.u para o silo B.

Nos pontos 3, 4 no silo A, observou-se que os grãos entraram em equilíbrio higroscópico no nono dia de avaliação e sofreu um aumento no teor de água apenas no vigésimo primeiro dia e chegando no último dia de avaliação com $12,10 \pm 0,18$ % b.u para o ponto 3 e no ponto 4 $11,88 \pm 0,11$ % b.u. Notou-se que o ponto 5 iniciou-se com o teor de água próximo à 12 % b.u, e finalizou o experimento com $11,72 \pm 0,06$ % b.u, sendo que o ponto 5 foi o que mais sofreu interferências externas, acompanhando a umidade do ar ambiente.

Em relação aos pontos 3 e 4 do silo B, o teor de água % b.u entrou em equilíbrio no decimo segundo dia e sofreu um aumento no vigésimo primeiro dia, no ultimo de avaliação o teor de água foi de $11,45 \pm 0,11$ % b.u para o ponto 3 e $11,26 \pm 0,26$ para o ponto 4. No ponto 5 do silo B o comportamento foi semelhante ao do silo A finalizando o experimento com o menor teor de água em relação aos demais pontos.

Notou-se que os pontos 2, 3, 4 e 5 nos dois silos permaneceram com teor de água abaixo dos 12,5 % b.u que é a umidade segura para o armazenamento dos grãos de milho. Outra questão observada foi em relação a infestação insetos que nesses pontos analisados o teor de água não sofreu interferência dos insetos.

4.5 Análise Estatística dos sistemas de aeração

O resultado da análise pelo teste de “t” de Student é mostrado na Tabela 2. Os resultados indicaram, que não houve variação significativa a 5 % de probabilidade de erro, na temperatura média dos silos A e B utilizando os sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado.

Tabela 2 - Análise da média de temperatura dos silos A e B

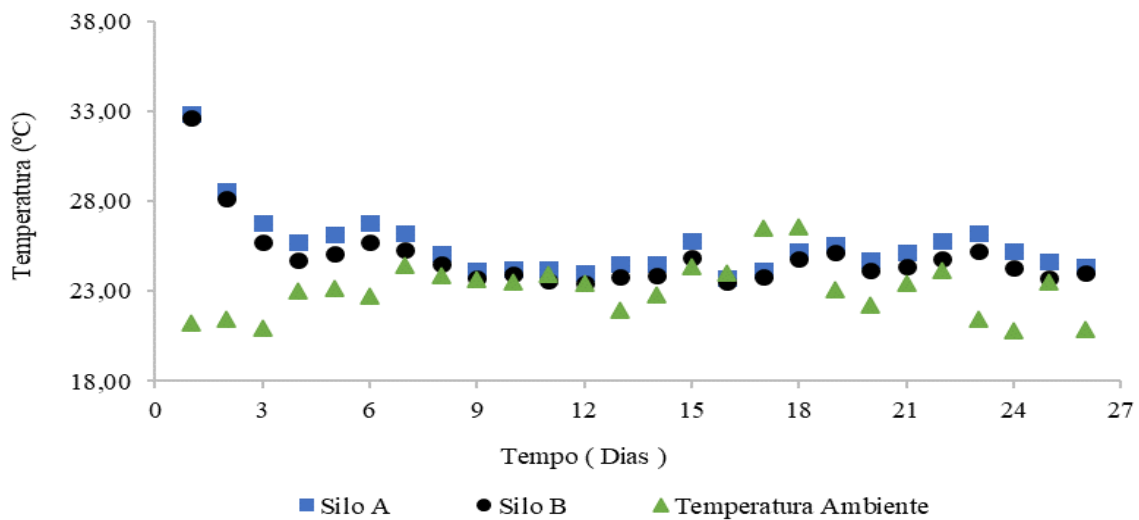
Medidas descritivas	Silo A	Silo B
Média	25,57	24,88
Variância	3,42	3,51
N	26	26
t calculado	1,31 ^{NS}	-
t teórico	2,01	-

*Médias comparadas pelo teste “t” de Student a 5 % probabilidade

*NS- Não Significativo

O efeito dos sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado na temperatura média dos silos A, B e ambiente são apresentados na Figura 27. Observa-se, na Figura 27, que a temperaturas médias dos silos A e B tiveram um comportamento semelhante. Mas no silo B onde o sistema de aeração artificialmente resfriado estava instalado as temperaturas estiveram mais baixas que no silo A. Nota-se que a temperatura mais baixa registrada no silo B foi no decimo segundo dia de avaliação 23,46 °C; já no silo A a temperatura mais baixa foi no decimo sexto dia 23,74 °C.

Figura 27 - Efeito dos sistemas de aeração convencional e aeração artificialmente resfriado na temperatura média dos silos A e B e ambiente



Fonte: AUTOR

No último dia de avaliação das temperaturas registradas para o silo A foi de 24,41 °C e para o silo B de 24,02 °C e no ambiente 20,86 °C, nota-se uma diferença de 4,32 °C no silo A e 3,16 no silo B em relação a temperatura ambiente. Diante desses dados observou-se que a eficiência do tubo de vórtice foi baixa com um compressor, por isso será necessário mais estudo sobre o tubo de vórtice para elucidar os benefícios que esse equipamento pode apresentar para resfriamento de grãos.

5. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos e nas condições em que foi desenvolvido este trabalho pode-se concluir que:

1. Os ventiladores construídos forneceram a vazão $0,15 \text{ m}^3 \cdot \text{min}$ e venceram a perda de carga 30 mmca.m^1 , necessária para aeração dos grãos armazenados nos silos.
2. A temperatura média no final da avaliação dos silos A e B foram de $24,41$ e $24,02 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente.
3. O teor de água médio dos grãos armazenados nos silos, no último dia de avaliação, foi de $12,23 \text{ \%b.u.}$ para o silo A e $11,68 \text{ \%b.u.}$ para o silo B.
4. O sistema de aquisição de dados, utilizando o Arduino, coletou os dados de temperatura e umidade relativa dos silos mostrou-se eficiente.
5. O sistema de aeração artificialmente resfriado funcionou corretamente, diminuindo a temperatura do ar de aeração, porém apenas com um compressor mostrou baixa eficiência.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. W. S.; BRITO, D. R.; OTANI, M. A.; FIDELIS, R. R.; PELUZIO, J. N. Efeito do dióxido do carbono, temperatura e armazenamento sobre sementes de soja e micoflora associada. **Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, p. 554-560, 2012.
- AHMED, H.; AHMED, M. S.; ATTALLA, M.; WAFI, A. E. An experimental study of nozzle number on Ranque Hilsch counterflow vortex tube. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Qena, v. 82, p. 381–389, 2017.
- ANDRADE, C. L. T.; SILVA, P. P. G.; MAGALHÃES, B. G.; PAIXÃO, J. S.; MELO, B. F.; TIGGES, C. H. P. Parametrização do modelo CSM-CERES-Maize para uma cultivar de alta produtividade. In: **XXXI Congresso Nacional de Milho e Sorgo**, Bento Gonçalves, RS, 2016.
- ANGELOVIČ, M.; KRIŠTOF, K.; JOBBÁGY, J.; FINDURA, P.; KRIZAN, M. The effect of conditions and storage time on course of moisture and temperature of maize grains. **Contemporary Research Trends in Agricultural Engineering**, Nitra, v. 10, p 1-6. 2018.
- ANTUNES, L. E. G; VIEBRANTZ, P. C; GOTTARDI, R; DIONELLO, RAFAEL. **Características físico-químicas de grãos de milho atacados por Sitophilus zeamais durante o armazenamento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 6, p 615-620. 2011.
- ANTUNES, A.M. **Desenvolvimento De Um Sistema De Aeração Automatizado Para Armazenamento De Grãos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) -Universidade Estadual de Goiás, 2016.
- BARONI, G. D., BENEDETI, P. H., & SEIDEL, D. J. Cenários prospectivos da produção e armazenagem de grãos no Brasil. **Revista Thema**, 14(4), 55-64. 2017.
- BESSA, J. F.V; DONADON, J. R; RESENDE, O; ALVES, R. M. V; SALES, J. D. E. F; COSTA, L. M. Armazenamento do crambe em diferentes embalagens e ambientes: Parte I - Qualidade fisiológica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n. 3, p.224-230, 2015.
- BICA, M. R. R.; RANIERO, M. R.; CALÇA, M. V. C.; PAI, A. D. Monitoramento de temperatura com sensores eletrônicos ligados em rede. **7ª Jornada Científica e tecnológica da FATEC de Botucatu**, Botucatu, [s. l.], 2018.
- BORÉM, F. M.; RIBEIRO, F.C., FIGUEIREDO, L.P.; GIOMO, G. S.; SIQUEIRA, C.; DIAS, C. A. Sensory analysis and fatty acid profile of specialty coffees stored in different packages. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 9, p. 4101–4109, 2019.
- BURKOT, R. C. A qualidade desejada na secagem e armazenagem de grãos em uma cooperativa no município de Ponta Grossa – PR. **Revista de Gestão e Organizações Cooperativas**, Santa Maria [s.l.], v. 01, p. 39–50, 2014.
- Brasil. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Regras para análise de sementes, Brasília, DF, 399 p. 2009.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, p. 4503, 2011.

CHIGOVERAH, A. A.; MVUMI, B. M. Efficacy of metal silos and hermetic bags Against stored-maize insect pests under simulated smallholder farmer conditions. **Journal of Stored Products Research**, v. 69, p. 179-189, 2016.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Capacidades estáticas de armazéns cadastrados por U.F.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 08 novembro 2020.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Safras.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 10 fevereiro. 2021.

CORADI, P. C; LEMES, A. F. C. Silo-secador-aerador experimental para armazenagem de grãos de soja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 4, p. 279-285, 2018.

D'ARCE, M. A. B. **Pós Colheita e Armazenamento de Grãos.** Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição ESALQ/USP (artigo), 2006. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/lan/pdf/Armazenamentodegraos.pdf>>. Acesso em: 11 de novembro de 2020.

DELMÉE, Gérard Jean. Manual de medição de vazão. São Paulo: Edgard Blücher, 2. ed, 476 p. 1982

DEMITO, A.; AFONSO, A.D.L. Qualidade das sementes de soja resfriadas artificialmente. **Engenharia na Agricultura**, Campina Grande, v.17, n 4, p.7-14, 2009.

DEMITO, A.; ZIEGLER, V.; GOEBEL, J. T. S.; KONOPATZKI, E. A.; COELHO, S. R. M.; ELIAS, M. C. Effects of refrigeration on biochemical, digestibility, and technological parameters of carioca beans during storage. **Journal of Food Biochemistry**, Danvers, v. 43, n. 7, p.12900, 2019.

FAO- Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura **Countries por mercadoria Documento** on-line. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity/ Acesso em setembro de 2020.

FERREIRA, C. D.; ZIEGLER, V.; LINDEMANN I. S.; HOFFMANN, J. F.; VANIER, N. L.; OLIVEIRA, M. Quality of black beans as a function of long-term storage and moldy development: Chemical and functional properties of flour and isolated protein. **Food Chemistry**, Pelotas, v. 246, p. 473-480, 2018.

GOMES, F.C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais.** São Carlos. 205p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2000.

GUO, X.; ZHANG, B.; XU, X. A critical review on the flow structure studies of Ranque–Hilsch vortex tubes. **International Journal of Refrigeration**, Liaoning, v. 104, p. 51-64, 2019.

HAMMER, O.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P.D. Past: Paleontological statistics software Packaged for education and data analysis. Version 1.94b. **Palaentologia Electronica**, v.4, n. 1, p.1 – 9, 2001.

HILSCH, R. The use of expansion of gases in a centrifugal field as a cooling process. **The Review of Scientific Instruments**, 1947.

KEPLER WEBER. **Catálogo geral de produtos: Armazenagem de Grãos**. 84p 2018.

Disponível em:

<http://www.stampacom.com.br/pf/kepler/armgr_pt/files/assets/basichtml/index.html>.

Acesso em: 20 de outubro 2020.

KHATCHATOURIAN, O. A.; BINELO, M. O.; FAORO, V.; TONIAZZO, N. A. Three-dimensional simulation and performance evaluation of air distribution in horizontal storage bins. **Biosystems Engineering**, São Francisco, v 142, p. 42-52, 2016.

JUNIOR, S. N.; NOGUEIRA, E. A. Centrais Regionais de Armazenagem como apoio à Comercialização de Grãos: Panorama do Mercado Agrícola. **Instituto de Economia Agrícola. Informações Econômicas**, SP, v.37, n.7, 2007

LAWRENCE, J.; MAIER, D. E. Aeration strategy simulations for wheat storage in the subtropical region of north India. **Transaction of the ASABE**, v. 54, p. 1395-1405, 2011.

LIMA JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, I. P.; ROSA, S. R. A.; SILVA, A. J. S.; MORAIS, M. M. Controle De Pragas De Grãos Armazenados: Uso E Aplicação De Fosfetos. **Revista Faculdade Montes Belos**, v. 5, n. 4, p.180-184, 2012.

LOPES, D. C.; NETO, A. J. S.; JÚNIOR, R. V. Comparison of equilibrium models for grain aeration. **Journal of Stored Products Research**, v. 60, p. 11-18, 2015.

LOPES, D. C STEIDLE, N, A. J. Effects of climate change on the aeration of stored beans in Minas Gerais State, Brazil. **Biosystems Engineering**, Sete Lagoas, v.188, p.155-164, 2019.

LUIZ, M. R. **Estudo teórico e experimental de secagem de tomate (*Lycopersiconesculentum*)**.160 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB,2012.

MACINTYRE, A. J. Ventilação Industrial e Controle da Poluição. Editora LTC. São José – SC, 2 ed, 1990.

MCROBERTS, M. Arduino Básico. **Novatec**. São Paulo, p. 456, 2011.

MAIA, G. B. S.; PINTO, A. R.; MARQUES, C. Y. T.; LYRA, D. D.; ROITMAN, F. B. Panorama dá armazenagem de produtos agrícolas no Brasil. **Revista do BNDES**, v. 40, p.161-194, 2013.

MAIER, D. E.; NAVARRO, S. Chilling of grain by refrigerated air. In. NAVARRO, S.; NOYES, R. (Ed.) **The mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management**. New York, CRC press, 2002. cap. 9, p. 489-555

MAGAN, N.; ALDRED, D. Post-harvest control strategies: minimizing mycotoxins in the food chain. **International Journal of Food Microbiology**, v. 119, n. 1, p. 131-139, 2007.

MAURYA, R. S.; BHAVSAR, K. Y. Energy and Flow Separation in the Vortex Tube: A Numerical Investigation. **International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering**. Ijtarme, v. 2, n. 3, p. 2319–3182, 2013.

MOHAPATRA, D.; KUMAR, S.; KOTWALIWALE, N.; SINGH, K. K. Critical factors responsible for fungi growth in stored food grains and non-Chemical approaches for their control. **Industrial Crops and Products**. Bhopal, v. 108, p. 162-182, 2017.

MUTUNGI, C.; MUTHONI, F.; BEKUNDA, M.; GASPAS, A.; KABULA, E.; ABASS. A. Physical quality of maize grain harvested and stored by smallholder farmers in the Northern highlands of Tanzania: effects of harvesting and pre-storage handling practices in two marginally contrasting agro-locations. **Journal Stored Products Research**. Tanzania, v. 84, p. 101517, 2019.

NEME, K; MOHAMMED, A. Mycotoxin occurrence in grains and the role of postharvest management as a mitigation strategies. A review. **Food Control**. Shambu, v. 78, p. 412-425, 2017.

OLIVEIRA, V. R.; RIBEIRO, N. D.; MAZIERO, S. M.; FILHO, A. C.; JOST, E. Qualidade para o cozimento e composição nutricional de genótipos de feijão com e sem armazenamento sob refrigeração. **Ciência Rural**, Santa Maria v.41, n.5, p.746-752, 2011.

PARAGINSKI, R.T; VANIER, N.L; BERRIOS, J.J; OLIVEIRA, M; ELIAS, M. C. Physicochemical and pasting properties of maize as affected by storage temperature. **Journal of Stored Products Research**, Albany, v.49, p.209-214, 2014.

PARAGINSKI, R. T.; ROCKENBACH, B. A.; SANTOS, R. F.; ELIAS, M. C.; OLIVEIRA M. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.19, n.4, p.358–363, 2015.

PATURCA, E. Y. Caracterização das estruturas de armazenagem de grãos: um estudo de caso no mato grosso. **Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial– ESALQ-LOG**. Piracicaba, 2014.

PATWARI, A.U; HABIB, M.A; CHOWDHURY, S.I; AKRAM, R.H. Thermal investigation of vortex generated green coolant on surface texture for drilling process. **Procedia Engineering**, Bangladesh v. 105, p. 808-813, 2015.

PARK, C. E; KIM, Y. S; PARK, K.J; KIM, B.K. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, Republic of Korea v.48, p.25-29, 2012.

- PINTO, U. M.; FARONI, L. R. D. A.; ALVES, W. M.; SILVA, A. A. L. Influência da densidade populacional de *Sitophilus zeamais* (Motsch.) sobre a qualidade do trigo destinado à panificação. **Acta Scientiarum**, v.24, p.1407-1412, 2002
- QUIRINO, J. R.; MELO, A. P. CAMPOS.; VELOSO, V. R. S.; ALBERNAZ, K. C.; PEREIRA, J. M. Resfriamento artificial na conservação da qualidade comercial de grãos de milho armazenados. **Bragantia**. Campinas, v. 72, n. 4, p.378-386, 2013.
- RANI, P. R.; CHELLADURAI, V.; JAYAS, D. S.; WHITE, N. D. G.; KAVITHA-ABIRAMI, C. V. Storage studies on pinto beans under different contents and temperature regimes. **Journal of Stored Products Research**. v. 52, n. 3, p.78-85, 2013.
- RANQUE, G. J. Experiments on expansion in a vortex tube simultaneous of hot air and cold air. **J. Phys. Radium** (Paris), 1933.
- REHMAN, Z-U.; HABIB, F.; ZAFAR, S. I. Nutritional changes in maize (*Zea mays*) during storage at three temperatures. **Food Chemistry**, Pakistan, v.77, n.2, p.197-201, 2002.
- REED, C.; ARTHUR, F. H. AERATION. In: Subramanyam, B.; Hagstrum, D.W. Alternative to pesticides in stored-product IPM. Norwell: Kluwer Academic Publishers, p.51-72, 2000.
- REED, C.; DOYUNGAN, S.; IOERGER, B.; GETCHELL, A. Response of storage molds to different initial moisture contents of maize (corn) stored at 25 °C, and effect on respiration rate and nutrient composition. **Journal of Stored Products Research**. Kansas v.43, n.4, p.443-458, 2007.
- RIGUEIRA, R.J.A.; LACERDA FILHO, A.F.; VOLK, M.B.S. Avaliação da qualidade do feijão armazenado em ambiente refrigerado. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v.20, n.4, p.649-655, 2009.
- SECCHIAROLI, A.; RICCI, R.; MONTELPARE, S; D’ALESSANDRO, V. Numerical simulation of turbulent flow in a Ranque–Hilsch vortex tube. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. Ancona, v.52, n.24 p5496–5511, 2009
- SCHIAVON, R. A.; NOGUEIRA, I. S.; BORGES, G. B.; HOLANDA, H. S.; CASTRO, L. K. Arduino uma tecnologia de baixo custo para termometria de grãos armazenados. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 10, p. 18825-18839, 2019.
- SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F.; DEVILLA, I. A. Aeração de grãos armazenados. In: Silva, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, p.261–277. 2000.
- SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F.; DEVILLA, I.A.; LOPES, D.C. Aeração de grãos armazenados. In: SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, p.269–295, 2008.
- SILVA, K. P. **Efeitos de resfriamento artificial e tempo de armazenamento sobre a qualidade tecnológica e fisiológica de grãos de trigo**. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2017.

SINGH, B.C.; FIELKE, J. M. Recent developments in stored grain sensors, monitoring and management technology. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**. Annecy, v. 20, n. 3 p. 32-55, 2017

SMANIOTTO, T. A. S.; RESENDE, O.; MARÇAL, K. A. F.; OLIVEIRA, D. E. C. DE; SIMON, G. A. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 4: 446-453, 2014.

STEIDLE, N, A. J.; LOPES, D. C. Thermistor based system for grain aeration monitoring and control. **Computers and in Agriculture**, Sete Lagoas, v.116, p.45-54, 2015.

SZESZ JUNIOR, A.; JUNIOR, M. M.; ARIANGELO, H. D.; MATHIAS, I. M.; CONTIL, G. Embedded system in Arduino platform with Fuzzy control to support the grain aeration decision. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.11, p.1917-1923, 2016.

TORRES, J. D.; MONTEIRO, I. O.; SANTOS, J. R.; ORTIZ, M. S. Ortiz Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. **Scientia Plena**, v. 11, n.2, p. 1-13, 2015.

ZHANG, B.; GUO, X. Prospective applications of Ranque–Hilsch vortex tubes to sustainable energy utilization and energy efficiency improvement with energy and mass separation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Liaoning, v. 89, p. 135-150, 2018.

ZIEGLER, V.; MARINI, L. J.; FERREIRA, F. D.; BERTINETTI, I. A.; SILVA, W.S.V.; GOEBEL, J.T.S.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C. Effects of temperature and moisture during semi-hermetic storage on the quality evaluation parameters of soybean grain and oil. **Semina: Ciências Agrárias**, v 37, n 1, p. 131-144, 2016.

ZIEGLER, V.; PARAGINSKI, R. T.; FERREIRA, C. D. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality - A review. **Journal of Stored Products Research**. São Leopoldo, v 91, 2021.

WHANG, Z.; TONG, M.; YUAG, R. Experimental Study on Channel Characteristic and Refrigerating Effect in Vortex Tubes. **Journal of Chongqing University**, v. 32, n. 8, p. 971-975, 2009.