

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

VINICIUS REIS COVALESKY

**DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE
AERAÇÃO EM UM PROTÓTIPO DE SILO - AERADOR
ARMAZENADOR**

Alegrete

2023

VINICIUS REIS COVALESKY

**DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE
AERAÇÃO EM UM PROTÓTIPO DE SILO - AERADOR
ARMAZENADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Prof. ^a Dr.^a Chaiane Guerra da Conceição

Alegrete

2023

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

C873d Covalesky, Vinicius Reis

Dimensionamento e construção de um sistema de aeração em um
protótipo de silo - aerador armazenador / Vinicius Reis
Covalesky.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2023.

"Orientação: Chaiane Guerra Conceição".

1. Protótipo. 2. Aeração de grãos. 3. Ventilação forçada.
I. Título.

VINICIUS REIS COVALESKY

**DIMENSIONAMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE
AERAÇÃO EM UM PROTÓTIPO DE SILO - AERADOR
ARMAZENADOR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em:
01 de Fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr.^a Chaiane Guerra da Conceição
Orientadora
(Unipampa)

Prof^a. Dr.^a Eracilda Fontanela
(Unipampa)

Prof^a. Dr.^a Lanes Beatriz Acosta Jaques
(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **CHAIANE GUERRA DA CONCEICAO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 14:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ERACILDA FONTANELA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LANES BEATRIZ ACOSTA JAQUES, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 06/02/2023, às 07:50, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1046626** e o código CRC **4B5A3E5D**.

RESUMO

O trabalho objetivou o dimensionamento e a construção de um protótipo de um sistema de aeração 100% funcional em um silo armazenador de grãos, de escala reduzida (1:50) com 40 cm de diâmetro e 60 cm de altura, o qual representa em escala real um silo com 20 metros de diâmetro e 30 metros de altura. A construção foi realizada utilizando concreto em sua base, com os dutos de aeração embutidos na mesma, e chapa galvanizada para realizar o corpo do silo armazenador e a cobertura. O mesmo foi dimensionado seguindo normas e metodologias aplicadas atualmente para a construção de silos em escala real. Foi realizado primeiramente o dimensionamento do sistema armazenador, onde para esse dimensionamento foram adotados os dados da cultura do trigo pelo fato de essa ser a cultura que possui o valor de massa específica mais alto entre outras culturas. Com isso é possível garantir que o protótipo suportará armazenar e aerar qualquer outra cultura desejada com segurança e eficiência. Para realizar a insuflação de ar no sistema de aeração, foi dimensionado e construído um ventilador centrífugo, utilizando chapa de PVC 2 mm para o corpo da voluta, sendo essa em escala proporcional ao protótipo, que atenda com eficiência a vazão necessária pelo sistema.

O protótipo construído ficará à disposição no Laboratório de Pós Colheita (LAPÓS), da Unipampa, Campus Alegrete, o qual servirá para demonstração em aulas práticas e realização de trabalhos futuros pelos alunos.

Palavras-Chave: Protótipo; Aeração de grãos; Ventilação forçada.

ABSTRACT

The work aims at the design and construction of a prototype of a 100% functional aeration system in a grain storage silo, on a reduced scale (1:50) with 40 cm in diameter and 60 cm in height, which would represent in scale a real silo 20 meters in diameter and 30 meters high. The construction was carried out using concrete at its base, with the aeration ducts embedded in it, and galvanized sheet metal to make the body of the storage silo and the cover. It was dimensioned following norms and methodologies currently applied for the construction of full-scale silos. Firstly, the design of the storage system was carried out, where data from the wheat crop were adopted for this design, since this is the crop that has the highest specific mass value among other cultures, with this it is possible to guarantee that the prototype will withstand store and aerate any other desired crop safely and efficiently. To carry out the air insufflation in the aeration system, a centrifugal fan was designed and built, using 2 mm PVC sheet for the body of the volute, this being in a scale proportional to the prototype, which efficiently meets the flow rate required by the system.

The prototype built will be available at the Post Harvest Laboratory (LAPÓS), at Unipampa, Campus Alegrete, which will be used for demonstration in practical classes and future work by the students.

Keywords: Prototype; Grain aeration; Forced ventilation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Construção do silo armazenador e fixação com rebites.	16
Figura 2. Vista superior da cobertura do silo, identificando medidas e cortes.	17
Figura 3. Vista lateral da cobertura do silo, identificando medidas.	17
Figura 4. Construção da cobertura do silo	17
Figura 5. Resistência ao fluxo de ar exercido pelos grãos.	21
Figura 6. Dimensões do duto principal.	24
Figura 7. Vista superior da base do silo, identificando dutos.	27
Figura 8. Vista lateral da base do silo, identificando duto de entrada de ar.	27
Figura 9. Molde utilizado para dar forma aos dutos de aeração.	27
Figura 10. Construção da base do silo: A Forma para concretagem. B Forma com desmoldante e malha”.	28
Figura 11. Base do silo aerador em concreto, desenformada.	28
Figura 12. Base do silo aerador com sistema de descarregamento e chapas posicionadas.	29
Figura 13. Dimensões externas totais do protótipo.	30
Figura 14. Rotor utilizado para o sistema de aeração.	31
Figura 15. Representação do rotor e suas dimensões.	33
Figura 16. Dimensionamento da voluta do ventilador centrífugo.	34
Figura 17. Traçado da voluta do sistema.	35
Figura 18. Voluta com o rotor acoplado.	35
Figura 19. Voluta do ventilador centrífugo.	36
Figura 20. Base para fixação do motor.	36
Figura 21. Fonte para energizar do sistema.	36
Figura 22. Chave para acionamento do sistema elétrico.	37
Figura 23. Dimmer controlador da velocidade do motor.	37
Figura 24. Ventilador centrífugo montado.	37
Figura 25. Silo sobre a base e com motor acoplado.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dimensões do protótipo.....	18
Tabela 2. Densidade de fluxo de ar adaptada de (SIVA, 2008).....	20
Tabela 3. Velocidade do ar admissível.....	24
Tabela 4. Valores referentes aos materiais utilizados.	43

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO GERAL.....	12
2.1 Objetivos específicos	12
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1 Conceitos da aeração	13
3.2 Tipos de aeração.....	13
3.2.1 Aeração provisória	14
3.2.2 Aeração de manutenção ou resfriamento.....	14
3.2.3 Aeração corretiva	14
4. METODOLOGIA.....	16
4.1 Características dimensionais do protótipo	16
4.3 Dimensionamento do ventilador centrífugo.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
6. CONCLUSÃO.....	41
REFERÊNCIAS	42
APÊNDICE A	43

1. INTRODUÇÃO

Conforme a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab 2023), a produção de grãos no país deverá atingir 310,9 milhões de toneladas na safra 2022/23, superando a produção da safra anterior em aproximadamente 14,5% ou 39,3 milhões de toneladas.

Devido a grande produção de grãos no Brasil, se fazem necessários sistemas de armazenamento eficientes. Grande parte do produto colhido é submetido a operações de pós-colheita, o qual estão inclusos os sistemas de aeração e armazenamento, onde deve ser seguro e muito bem dimensionado para que esse produto não seja avariado durante o tempo de armazenagem.

Silos armazenadores que possuem sistema de aeração, auxiliam na manutenção da qualidade dos grãos armazenados, prevenindo a formação de bolsões de ar quente no interior da massa de grãos, mantendo-os constantemente refrigerados e aerados. Entretanto, o sistema de aeração está diretamente interligado com as condições climáticas do local, pelo fato de o sistema insuflar ar em temperatura e umidade ambientes para o interior do silo.

Nesse sentido, em dias úmidos ou chuvosos não é indicado à insuflação de ar no sistema, pois o ar úmido quando entrar em contato com os grãos armazenados ocasionará um aumento significativo no teor de umidade dos mesmos, podendo ocasionar o aumento da atividade de fungos e bactérias, reduzindo assim a qualidade do produto armazenado e conseqüentemente diminuindo o tempo de armazenamento seguro.

Com isso a construção do protótipo visa auxiliar no entendimento dos princípios de funcionamento do sistema de aeração, possibilitando realizar testes e experimentos futuros, com diferentes índices de umidades do ar insuflados para o seu interior, e visualizar os efeitos causados na massa de grãos armazenada.

2. OBJETIVO GERAL

Dimensionar e construir um protótipo de silo aerador armazenador em escala reduzida, inteiramente funcional.

2.1 Objetivos específicos

- I. Auxiliar e facilitar o entendimento do princípio de funcionamento de um sistema de aeração;
- II. Demonstrar as partes constituintes do dimensionamento de um sistema de aeração;
- III. Auxiliar no desenvolvimento de aulas práticas no Laboratório de Pós-Colheita (LAPÓS), da Unipampa, Campus Alegrete;
- IV. Disponibilizar o protótipo para o desenvolvimento de trabalhos de conclusão de curso ou de iniciação científica.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Conceitos da aeração

A aeração em um silo armazenador de grãos é definida basicamente pela prática de usar uma ventilação forçada com o auxílio de ventiladores motorizados, com o objetivo de resfriar e uniformizar a temperatura interna do armazenamento, forçando esse ar a passar através de uma massa de grãos, eliminando possíveis bolsas de calor e proporcionando uma secagem limitada desse produto. Além disso, o sistema possibilita a aplicação de fumigantes nos grãos armazenados, processo esse que é de extrema importância, pois conforme (PIMENTEL & FONSECA 2011) atualmente é o controle físico mais efetivo e o mais utilizado para preservar a massa de grãos armazenada, permitindo armazenar produtos a granel por longos períodos sem que haja o desenvolvimento de organismos causadores de danos, como insetos, ácaros, fungos e bactérias, danos esses que acarretariam em perdas significativas na qualidade do produto armazenado.

Segundo Lourensi (2014) a aeração é a técnica mais utilizada para reduzir a temperatura na massa de grãos, e com isso auxilia na redução da migração da umidade no interior da mesma (JAYAS et. al.1995apud ELIAS, 2009).

O processo é um método preventivo, e por esse motivo não elimina os microrganismos presentes na massa de grãos e sim, impede a proliferação dos mesmos.

3.2 Tipos de aeração

A aeração de grãos apresenta-se subdividida em diferentes tipos e funções onde são classificadas como aeração provisória, aeração de manutenção ou resfriamento e aeração corretiva, onde serão descritas nessa seção.

3.2.1 Aeração provisória

A aeração provisória é utilizada para aerar e resfriar grãos recém-colhidos que chegam à unidade armazenadora com um teor de umidade muito alto, possibilitando que sejam retirados alguns pontos percentuais de teor de água da massa de grãos, enquanto aguardam a secagem, buscando evitar danos ao produto armazenado. Danos esses que podem ser imediatos ou latentes, onde se manifestam após estar armazenados (ELIAS et al., 2017).

3.2.2 Aeração de manutenção ou resfriamento

A aeração de manutenção ou resfriamento é utilizada para manter grãos já secos e limpos em temperaturas baixas, visando um armazenamento seguro por mais tempo, uniformizando a temperatura interna da massa de grãos, e evitando formação de bolsões de ar quente.

Esse método substitui a transilagem, que consiste em transferir todo o produto armazenado de um silo para outro, e também tem por finalidade baixar a temperatura da massa de grãos, porém a transilagem é um método muito mais prejudicial para o produto armazenado, por conta do dano mecânico causado aos grãos e também pelo fato de esse processo revolver possíveis focos de concentração de insetos e microrganismos, disseminando-os para toda massa de grãos (ELIAS et al., 2017).

3.2.3 Aeração corretiva

É realizada quando se faz necessário uma correção na umidade ideal do grão e ou odores estranhos na massa de grãos geralmente causados por metabolismo nos grãos armazenados.

Quando falamos em corrigir a umidade não é somente a retirada de umidade do grão, podemos também incorporar umidade ao mesmo de forma que é incorporado ar úmido na aeração para suprir esse teor de umidade. (Elias et al., 2017).

3.2.4 Protótipos

Protótipos em laboratórios são de extrema importância para auxiliar no aprendizado dos alunos, e também para agregar conhecimentos práticos em sua formação. O protótipo proporciona a interação direta com o sistema e auxilia no entendimento, possibilitando que sejam realizadas simulações fiéis em uma menor escala.

Segundo Wiltgen (2019) protótipos no meio acadêmico científico são uma ferramenta que auxiliam e aceleram a realização de pesquisas, pois o tempo de desenvolvimento até a coleta de dados é relativamente pequena.

4. METODOLOGIA

4.1 Características dimensionais do protótipo

O protótipo foi dimensionado com o auxílio do software AutoCAD 2020 e construído em escala reduzida, sendo essa 1:50, a qual a cada 1 metro na escala reduzida equivale a 50 metros na escala real.

A base do protótipo possui 40 cm de diâmetro, medida essa proporcional a uma base de 20 metros em escala real. Foi construída utilizando concreto, com traço C: A: B igual a 1: 2: 3, sendo “C” referente ao cimento, “A” referente à areia e “B” referente à brita, na proporção em quilos: 1 kg de cimento; 2,3 kg de areia; 3,3 kg de brita zero; e 0,6 kg de água, medidas essa adotadas para obter uma resistência de F_{ck} de 25 MPA. Juntamente a essa base foram embutidos os dutos de aeração, onde foram encaixadas sobre os dutos chapas perfuradas de malha 2 mm para permitir o fluxo de ar no interior do armazenamento.

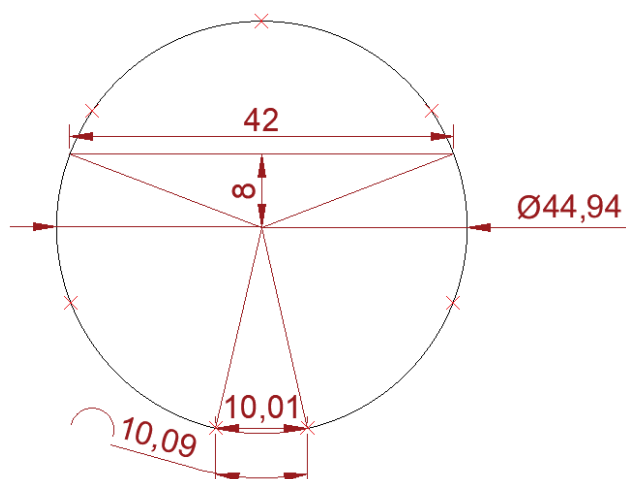
O corpo do silo foi construído com 60 cm de altura, visando uma espessura da camada de grãos de 55 cm. Para isso foi utilizada chapa lisa galvanizada com medidas de 60 cm x 130 cm, a qual foi trespessada 4 cm e fixada com rebites conforme (Figura 1). Da mesma forma a cobertura do silo foi dimensionada com o auxílio do software AutoCAD 2020 a fim de possuir 8 centímetros de altura, (Figuras 2, 3 e 4).

Figura 1. Construção do silo armazenador e fixação com rebites.



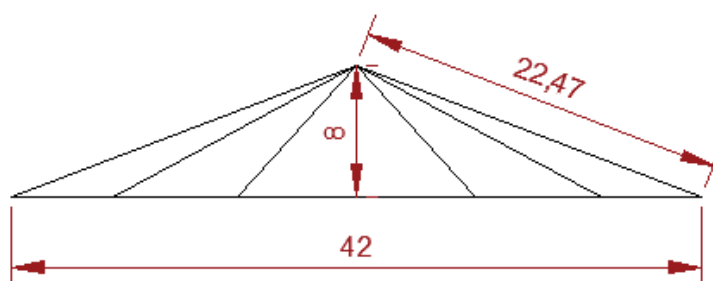
Fonte: O Autor (2023).

Figura 2. Vista superior da cobertura do silo, identificando medidas e cortes.



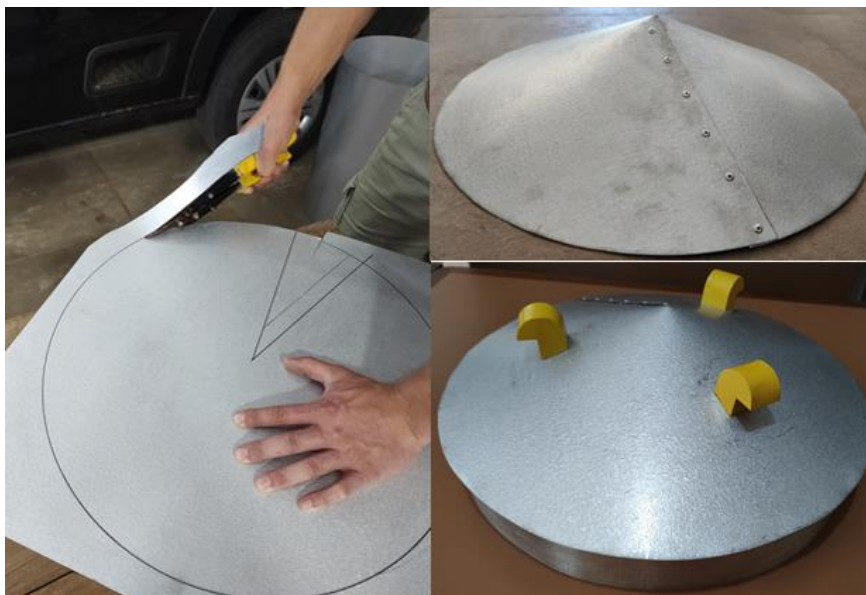
Fonte: O Autor (2023).

Figura 3. Vista lateral da cobertura do silo, identificando medidas.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 4. Construção da cobertura do silo



Fonte: O Autor (2023).

O ventilador centrífugo utilizado no protótipo foi dimensionado com o auxílio do software AutoCAD 2020 e construído utilizando placas de PVC de 2 mm de espessura. O mesmo foi dimensionado com base nas proporções de medidas do silo armazenador, visando projetar uma aeração com a máxima eficiência.

Tabela 1. Dimensões do protótipo.

Dimensões do protótipo (cm)	
Diâmetro da base	40
Altura do silo	60
Espessura da camada de grãos	55

Fonte: O Autor (2023).

4.2 Dimensionamentos do sistema armazenador

Os cálculos de dimensionamento do sistema armazenador utilizado no protótipo foram realizados seguindo a metodologia de Silva. (2008), com o auxílio do software AutoCAD 2020 para melhor visualização.

- **Capacidade do silo (Ca):**

Para iniciar os cálculos da capacidade do silo foi preciso pré-determinar os seguintes valores:

A – Área da base do silo, (m^2); sendo utilizada uma base de 0,4 m de diâmetro, a área da base do silo pré-determinada é de $0,1257 m^2$.

H – Espessura da camada de grãos que se deseja armazenar, (m); A espessura da camada de grãos está diretamente ligada com a altura do silo, portanto será utilizada uma espessura de 0,55 m para um silo de 0,6 m de altura.

Me – Massa específica do produto, (Kg/m^3). Para este fim foi adotada a massa específica do trigo de $750 kg/m^3$, pois essa é a cultura que possui o maior valor de

massa específica entre os demais, e com isso será possível afirmar que o protótipo será eficiente em relação a sua aeração para qualquer um dos demais grãos e cereais, que possam ser armazenados.

Com os valores pré-determinados citados anteriormente aplicou-se na Equação 1. para determinar a capacidade de armazenamento do silo (Ca).

$$Ca = A * H * Me \quad \text{Eq. 1}$$

$$Ca = 0,1257 * 0,55 * 750$$

$$\mathbf{Ca = 51,9 \text{ kg} = 0,0519 \text{ t}}$$

Cálculo do fluxo de ar (Q):

O fluxo de ar (Q) foi determinado por meio da equação 2;

$$Q = F * Ca \quad \text{Eq. 2}$$

$$Q = 1 * 0,0519$$

$$\mathbf{Q = 0,0519 \text{ m}^3\text{ar/min}}$$

Onde F é a densidade de fluxo de ar tabelado (SILVA, 2008), apresentado na Tabela 2, o qual foi utilizado o valor referente ao estado mais crítico, sendo esse 1.

Tabela 2. Densidade de fluxo de ar adaptada de (SIVA, 2008)

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

- **Cálculo da pressão estática (Pe)**

Para calcular a pressão estática fez-se necessário, primeiramente, calcular a vazão por área de piso utilizando a Equação 3:

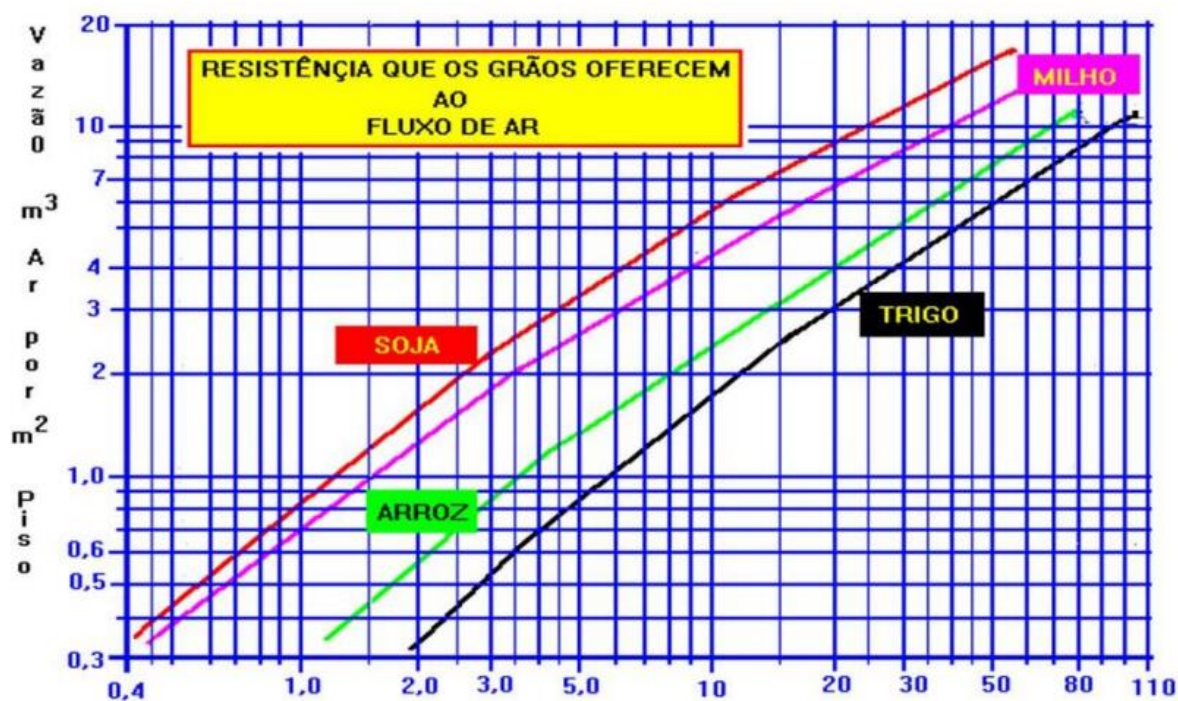
$$Q = \frac{\text{Vazão total}}{\text{Área da base}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$Q = \frac{0,0519}{0,1257}$$

$$\mathbf{Q = 0,41 \text{ m}^3\text{ar/min por m}^2 \text{ piso}}$$

Com a obtenção do valor de Q foi possível analisar o gráfico, (Figura 5) para obter o valor de pressão estática em metro de coluna d'água (m.ca) por metro de coluna de grão.

Figura 5. Resistência ao fluxo de ar exercido pelos grãos.



Fonte: (Silva et al. 2008).

Após obter o valor da pressão estática indicada na Figura 5 o mesmo foi substituído na Equação 4. para obter a pressão estática (P_e).

$$P_e = P_e * H \quad \text{Eq. 4}$$

$$P_e = 0,24 * 0,55$$

$$P_e = 0,132 \text{ cm.ca}$$

Onde:

P_e = pressão estática (m.ca por metro de coluna de grão); sendo essa 2,4 m.ca, ou 0,24 cm.ca; e

H = espessura da camada de grãos (m).

- **Perdas de carga**

As perdas de carga ocorrem em (tubulações, válvulas, registro, curvas).

- **Pressão estática total (Pet)**

$$Pet = Pe + (Pe * 0,2) + (Pe * 0,6) \quad \text{Eq. 5}$$

$$Pet = 0,132 + (0,132 * 0,2) + (0,132 * 0,6)$$

$$\mathbf{Pet = 0,2376 \text{ cm.ca}}$$

Onde: O valor de 0,2 utilizado na fórmula é referente a 20% da resistência oferecida pelos grãos e o valor de 0,6 é referente a um fator de compactação de 60% da resistência oferecida pelos grãos.

- **Potência necessária para acionar o sistema (Pot)**

A potência de acionamento do sistema foi determinada por meio da equação 6.

$$Pot = \frac{Q * Pet}{450 * n} \quad \text{Eq. 6}$$

$$Pot = \frac{0,0519 * 0,2376}{450 * 0,643}$$

$$\mathbf{Pot = 0,00004 \text{ cv} = 0,03 \text{ watt}}$$

Onde: n é referente à eficiência do motor.

- **Superfície perfurada (SP)**

A superfície perfurada foi obtida através da equação 7.

$$SP = \frac{Q}{V} \quad \text{Eq. 7}$$

$$SP = \frac{0,0519}{5}$$

$$SP = 0,0104 \text{ m}^2 = 104 \text{ cm}^2$$

Onde: o valor de V toma-se como referência a velocidade máxima do ar admissível na saída dos dutos para a massa de grãos:

Dutos de entrada = 10 m/s;

Dutos de distribuição = 8 m/s;

Dutos de aeração = 5 m/s.

- **Seção transversal do duto principal (ST)**

A seção do duto principal foi obtida pela equação 8.

$$ST = \frac{Q}{V} \quad \text{Eq. 8}$$

$$ST = \frac{0,0519}{300}$$

$$ST = 0,00017 \text{ m}^2 = 1,7 \text{ cm}^2$$

Onde: V é referente à velocidade do ar admissível dentro do duto, dado conforme o comprimento do duto, apresentado na (Tabela 3).

Tabela 3. Velocidade do ar admissível

Velocidade do ar admissível dentro do duto			
Silo vertical		Silo horizontal	
C até 7,5 m	470 a 600 m/min	C 10 m	600 m/min
C de 7,5 a 1,8 m	300 a 470 m/min	C 10 m	300 m/min
Velocidade de entrada de ar na massa de grãos			
Silo vertical		Silo horizontal	
Máx 15 m/min		Máx 10 m/min	

Fonte: Silva et al. (2008)

- **Largura do duto principal (L)**

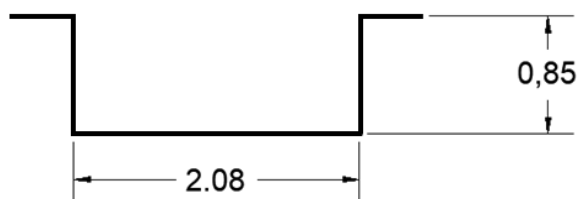
Existem duas formas para calcular a largura do duto principal, dependendo da seção do duto utilizado.

$$\text{Seção quadrada } L = ST^{1/2}$$

$$\text{Seção retangular } L \neq h$$

A altura (h) do duto principal será proporcional a largura do duto onde a multiplicação da largura pela altura do duto precisa se igualar ao valor calculado anteriormente da sessão transversal do duto (ST).

Figura 6. Dimensões do duto principal.



Fonte: O Autor (2023).

- **Comprimento do duto Perfurado (C)**

O comprimento do duto perfurado foi obtido pela equação 9.

$$C = \frac{SP}{L} \quad \text{Eq. 9}$$

$$C = \frac{104}{2,08}$$

$$C = 50 \text{ cm}$$

- **Determinação do espaçamento dos dutos**

O espaçamento entre dutos é definido pela relação entre a maior e a menor distância que o ar irá percorrer através da massa de grãos.

Sendo H a altura da massa de grãos e L o comprimento do diâmetro do silo.

A relação ideal seria $\frac{H}{L} = 1,5$, podendo ocorrer variações entre 1,2 e 1,7.

$$\frac{H}{L} = \frac{0,55}{0,4} = 1,4$$

Com essa relação calculada aplicou-se na Equação 10. para determinar o espaçamento entre os dutos.

$$\frac{H + X}{H} = 1,4 \quad \text{Eq. 10}$$

$$\frac{0,55 + X}{0,55} = 1,4$$

$$X = (0,55 * 1,4) - 0,55$$

$$X = 0,22 \text{ m} = 22\text{cm}$$

- **Largura de dutos perfurados (m)**

A vazão de ar (Q), de cada duto, é estimada através da vazão total pelo número de dutos, conforme Equação 11.

$$Q \text{ de cada duto} = \frac{Q \text{ total}}{n^{\circ} \text{ de dutos}} \quad \text{Eq. 11}$$

$$Q \text{ de cada duto} = \frac{0,0519}{2}$$

$$\mathbf{Q \text{ de cada duto} = 0,026 \text{ m}^3/\text{min} = 26.000 \text{ cm}^3/\text{min}}$$

A seção perfurada (SP) de cada duto é calculada conforme a Equação 12.

$$SP \text{ de cada duto} = \frac{SP}{n^{\circ} \text{ de dutos}} \quad \text{Eq. 12}$$

$$SP \text{ de cada duto} = \frac{104}{2}$$

$$\mathbf{SP \text{ de cada duto} = 52 \text{ cm}^2}$$

O número de dutos foi determinado conforme valor calculado de espaçamento entre dutos.

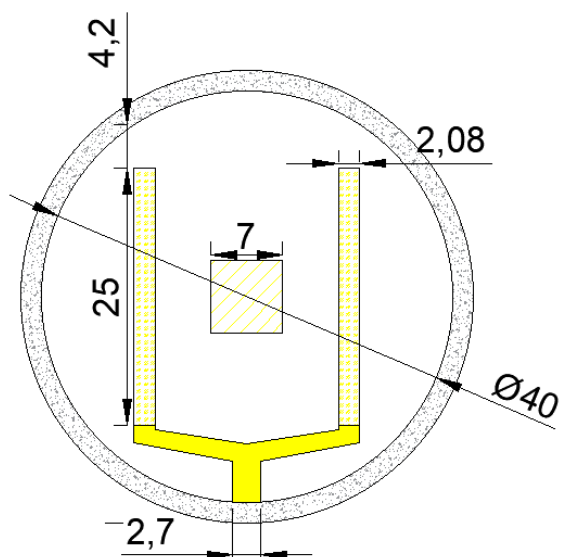
A largura da superfície perfurada dos dutos secundários é dada pela relação entre a seção perfurada de cada duto pelo seu comprimento, conforme Equação 13.

$$\text{Largura da SP de cada duto} = \frac{SP \text{ de cada duto}}{\text{Comprimento de cada duto}} \quad \text{Eq. 13}$$

$$\text{Largura da SP dos dutos} = \frac{52}{25}$$

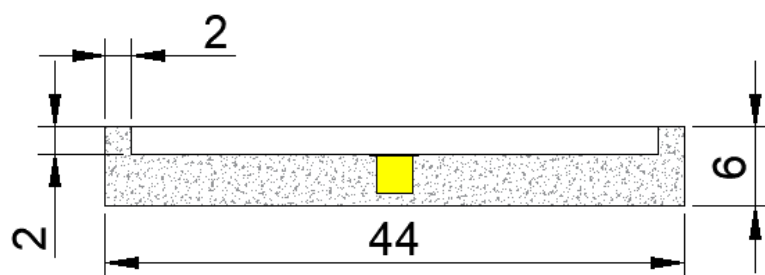
$$\mathbf{\text{Largura da SP dos dutos} = 2,08 \text{ cm}}$$

Figura 7. Vista superior da base do silo, identificando dutos.



Fonte: O Autor (2023).

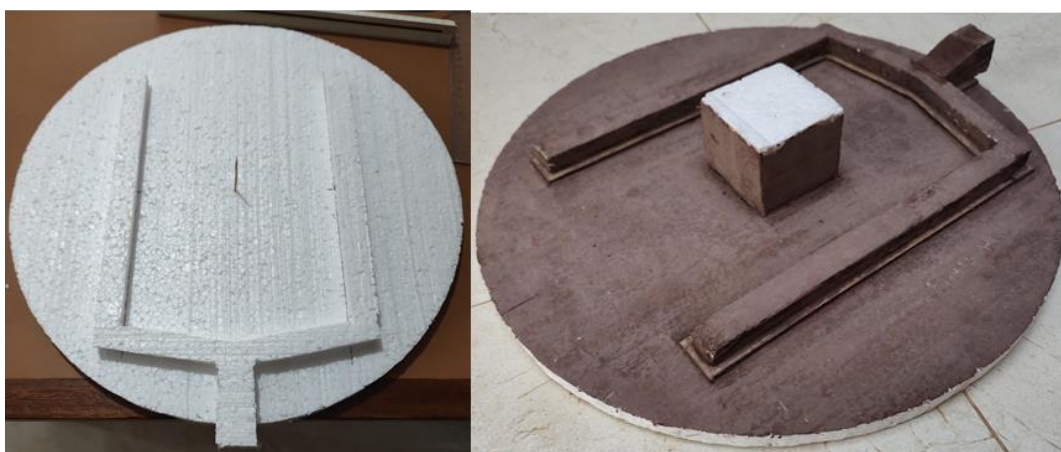
Figura 8. Vista lateral da base do silo, identificando duto de entrada de ar.



Fonte: O Autor (2023).

A construção da base do silo foi realizada por etapas. Primeiramente foi necessário realizar o molde dos dutos embutidos em isopor e emassado com massa de calafetar para melhor acabamento (Figura 9).

Figura 9. Molde utilizado para dar forma aos dutos de aerção.



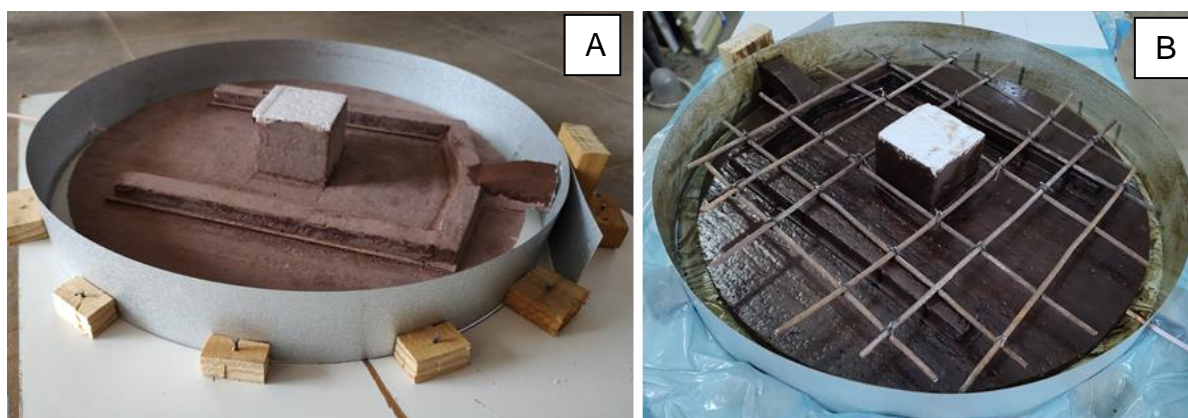
Fonte: O Autor (2023).

Posteriormente foi necessário criar uma forma de 44 cm de diâmetro por 6 cm de altura, a qual permitisse o encaixe do corpo do silo (Figura 10A).

Antes de realizar a concretagem foi aplicado desmoldante em toda a forma e molde, para facilitar no momento de desenformar a base, e posteriormente adicionado uma malha de ferro 4mm para dar resistência à peça, (Figura 10B).

Após a concretagem, foi aguardado o tempo de cura do concreto e desenformado (Figura 11).

Figura 10. Construção da base do silo: A Forma para concretagem. B Forma com desmoldante e malha”.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 11. Base do silo aerador em concreto, desenformada.

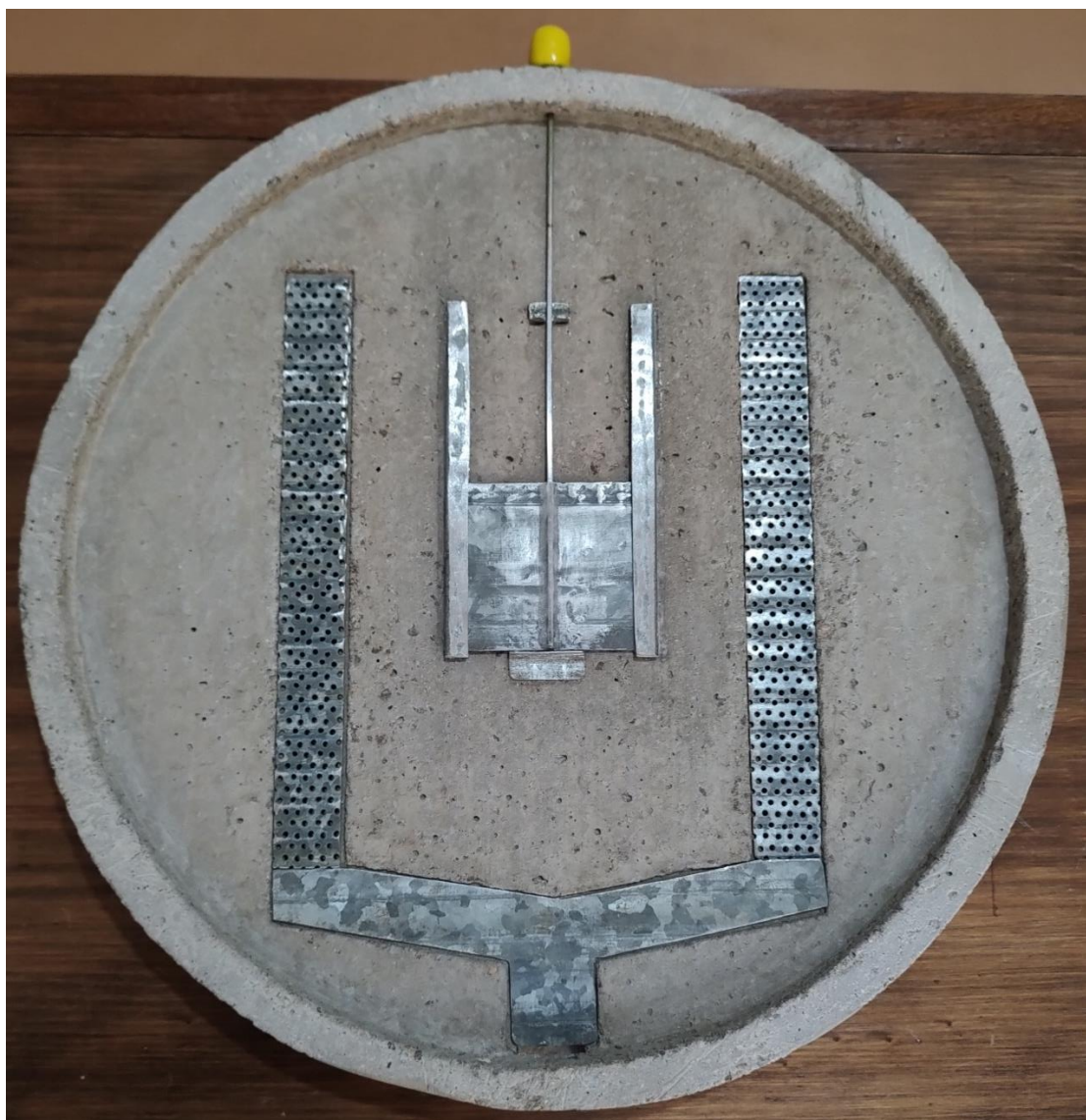


Fonte: O Autor (2023).

Após ter desenformado a base do protótipo foi necessário cortar as chapas perfuradas malha 2mm nas medidas calculadas para sobrepor os dutos de aeração e a chapa lisa de 2mm para sobrepor os dutos de condução do ar.

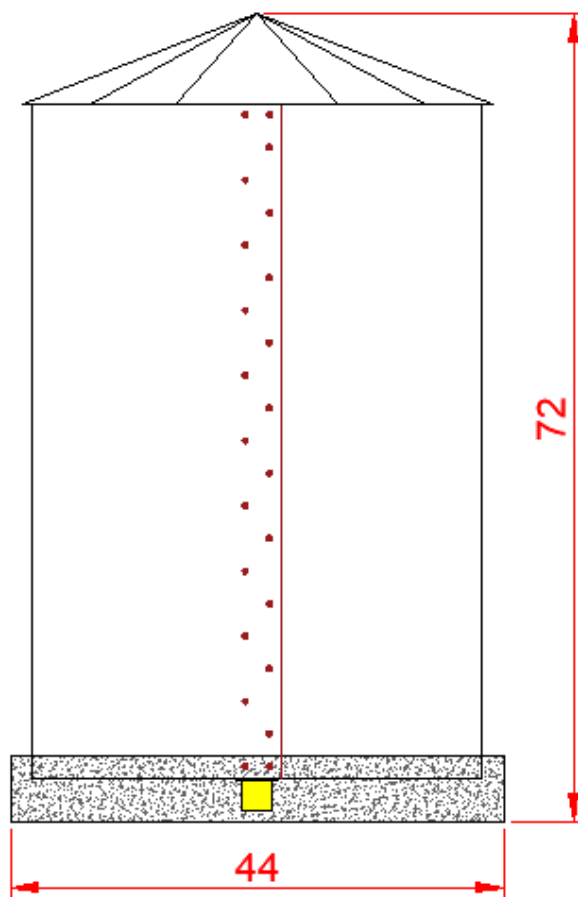
Também foi preciso criar um sistema de abertura para realizar o descarregamento do produto armazenado no seu interior, o qual foi realizado na forma de uma gaveta, onde uma chapa de 2mm desliza entre dois trilhos de metal, com a finalidade de reter e liberar o produto armazenado de forma manual.

Figura 12. Base do silo aerador com sistema de descarregamento e chapas posicionadas.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 13. Dimensões externas totais do protótipo.



Fonte: O Autor (2023).

4.3 Dimensionamento do ventilador centrífugo

Os cálculos de dimensionamento do ventilador centrífugo que será utilizado no protótipo foram realizados seguindo a metodologia de Silva et al.(2013).

Para iniciar os cálculos de dimensionamento é preciso utilizar os seguintes valores pré-determinados:

- Q – vazão total = 0,0519 (m³/s);
- H – pressão total a ser vencida = 23,76 (mm.ca);
- Ângulo das pás na saída do rotor será inclinado;
- Ra – rendimento adiabático = 0,70;
- Rh – rendimento hidráulico = 0,70;
- Rm – rendimento mecânico = 0,85.

Ordem dos cálculos

1º – Velocidade absoluta do ar à saída do rotor (C):

$$C = 4,04 * (H) * 1/2 \quad \text{Eq. 14}$$

$$C = 4,04 * (23,76) * 1/2$$

$$\mathbf{C = 48 \text{ m/s}}$$

2º – Diâmetro interno do rotor (D1):

$$D1 = 2 * \left(\frac{Q}{C}\right) * 1/2 \quad \text{Eq. 15}$$

$$D1 = 2 * \left(\frac{0,0519}{48}\right) * 1/2$$

$$\mathbf{D1 = 0,0011 \text{ m} = D1 = 0,11 \text{ cm}}$$

3º – Diâmetro externo do rotor (D2):

$$D2 = 1,20 * D1 \quad \text{Eq. 16}$$

$$D2 = 1,20 * 0,0011$$

$$\mathbf{D2 = 0,0013 \text{ m} = 0,13 \text{ cm}}$$

Onde, para fins acadêmicos, foi utilizado um rotor ligeiramente maior, tendo medida interna D1 igual a 2 cm, e diâmetro externo D2 igual a 5,5 cm. Rotor esse retirado de um secador de cabelo e adaptado para a função. (Figura 14).

Figura 14. Rotor utilizado para o sistema de aeração.



Fonte: O Autor (2023).

4º – Número de rotações por minuto do rotor (n):

$$n = \frac{(60 * U2)}{(3,14 * D2)} \quad \text{Eq. 17}$$

$$n = \frac{(60 * 41,7)}{(3,14 * 0,055)}$$

$$\mathbf{n = 14.487,55 \text{ rpm}}$$

Onde para determinar o valor de U2 utiliza-se a seguinte fórmula.

$$U2 = \frac{C}{1,15} \quad \text{Eq. 18}$$

$$U2 = \frac{48}{1,15}$$

$$\mathbf{U2 = 41,7 \text{ m/s}}$$

O Qual foi utilizado para o sistema um motor com tensão nominal de 24v e rotação de 18.000 Rpm, com potência de 18,7W e rendimento de 64,3%.

5º – Largura das pás do rotor na saída (L2) e na entrada (L1):

$$L2 = 0,2 * D2 \quad \text{Eq. 19}$$

$$L2 = 0,2 * 5,5$$

$$\mathbf{L2 = 1,1 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{L1 = L2}$$

6º – Velocidade à entrada do rotor (C1):

$$C1 = \frac{Q}{(3,14 * Rh * D1 * L1)} \quad \text{Eq. 20}$$

$$C1 = \frac{0,0519}{(3,14 * 0,7 * 0,02 * 1,1)}$$

$$\mathbf{C1 = 1,07 \text{ m/s}}$$

7º – Velocidade tangencial de entrada no rotor (U1):

$$U1 = \frac{(3,14 * D1 * N)}{60} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Eq. 21}$$

$$U1 = \frac{(3,14 * 0,02 * 14.487,55)}{60}$$

$$U1 = 15,2 \text{ m/s}$$

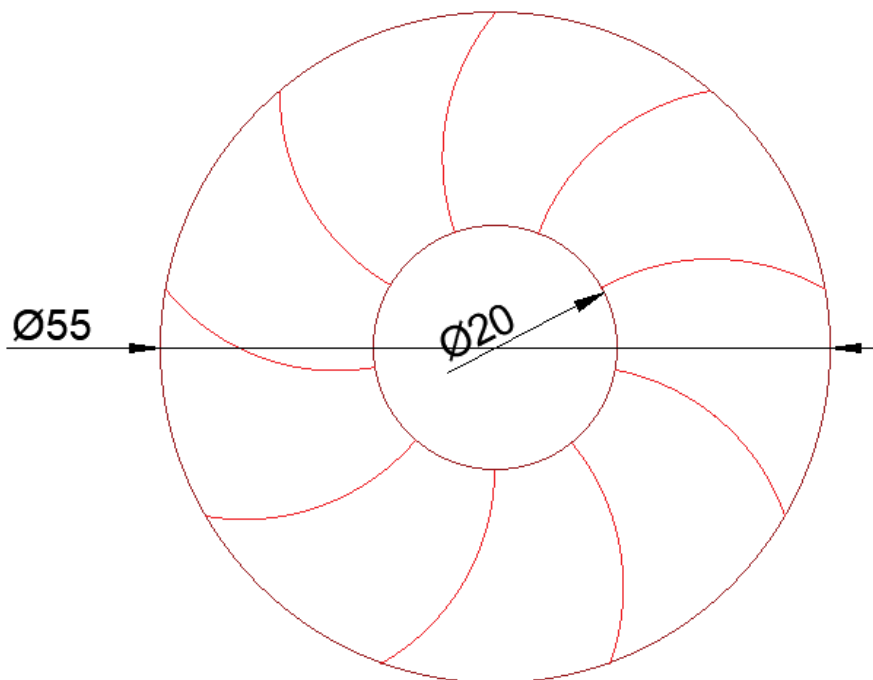
8º – Ângulo de entrada das pás.

No presente caso as pás serão inclinadas voltadas para trás, com ângulo de entrada igual a 80º e ângulo de saída de 60º.

9º – Número de pás do rotor

Serão 9 pás presentes no rotor, conforme representado na figura 15.

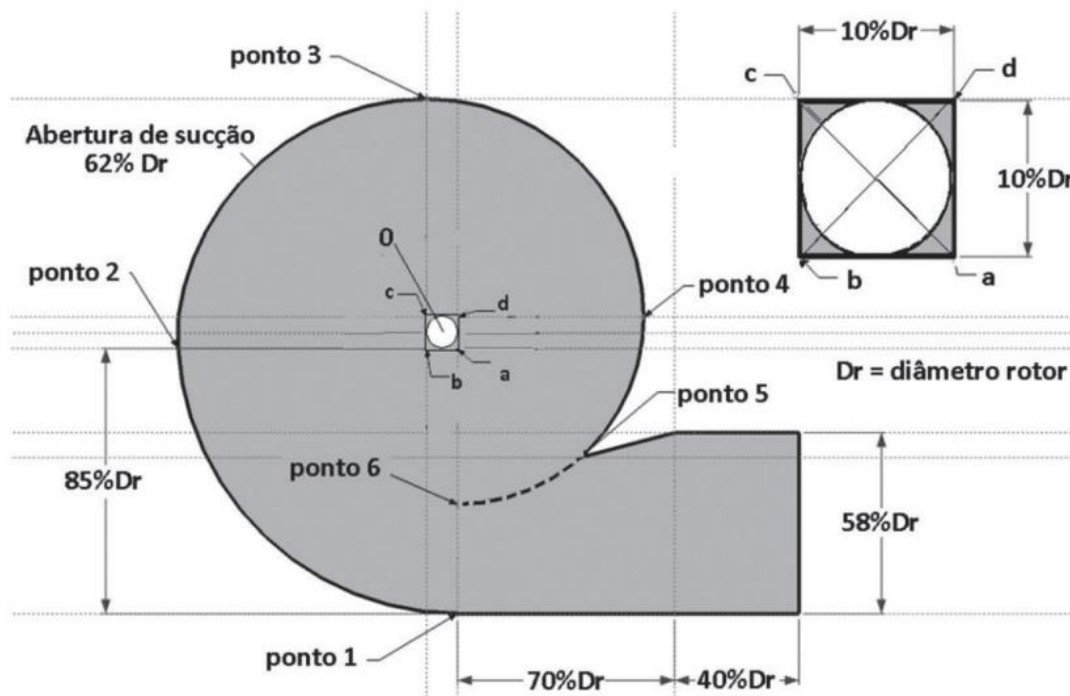
Figura 15. Representação do rotor e suas dimensões.



10º – Realizar o traçado da voluta.

O traçado da voluta é realizado se baseando na espiral de Arquimedes, efetuada com quatro arcos de círculo, conforme indicado na Figura 16.

Figura 16. Dimensionamento da voluta do ventilador centrífugo.



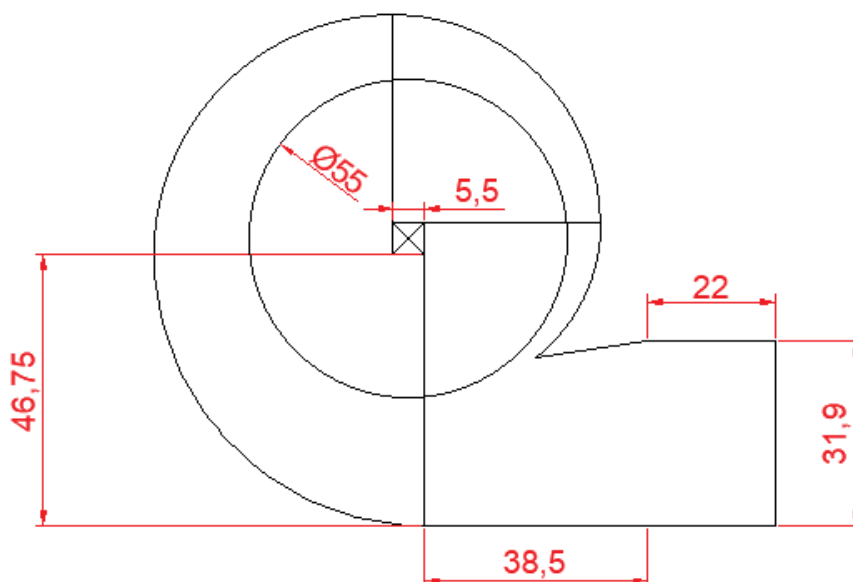
Fonte: (Silva et al. 2013).

Para iniciar o traçado da voluta primeiramente deve-se traçar um quadrado auxiliar com o a medida dos lados equivalente a 10% da medida do diâmetro externo do rotor. Após traçar o quadrado é preciso posicionar o centro do quadrado no centro do eixo do rotor posicionado no ponto 0 (zero), (Figura 16).

Com o quadrado já posicionado no centro do rotor é traçado o vértice (a-1), partindo do ponto “a” ao ponto “1”. Esse vértice terá medida aproximada de 0,85 vez o valor do diâmetro externo do rotor. Com essa medida estabelecida posiciona-se no vértice “a” traça-se o arco 1-2 (ponto 1, ponto 2).

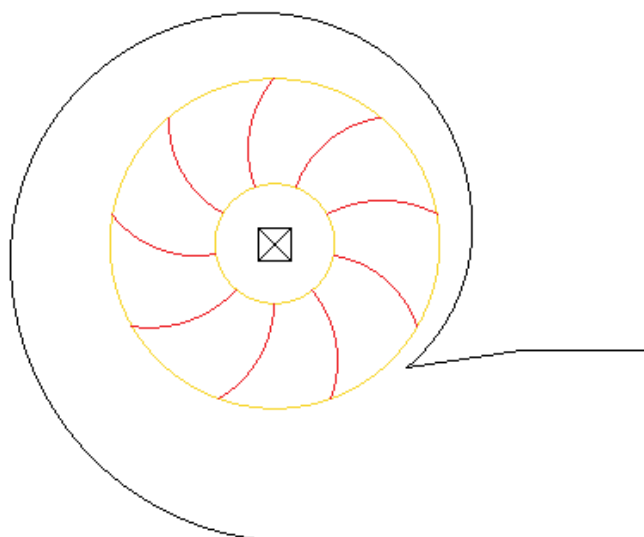
Na sequência com o centro no vértice “b” traça-se o arco 2-3 (ponto 2, ponto 3). Com o centro em “c” traça-se o arco 3-4 (ponto 3, ponto 4), e por último com o centro no vértice “d” traça-se o arco 4-6 (ponto 4, ponto 6). O ponto 5 na figura indica o estrangulamento da voluta, denominado “beco da voluta”, que é igual a 0,06 vezes o diâmetro externo do rotor. (SILVA et al., 2013).

Figura 17. Traçado da voluta do sistema.



Fonte: O Autor (2023).

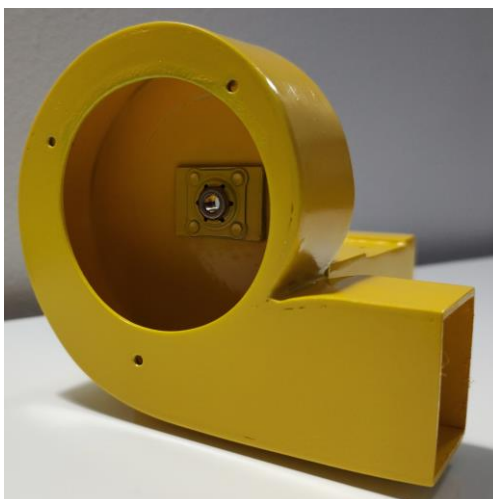
Figura 18. Voluta com o rotor acoplado.



Fonte: O Autor (2023).

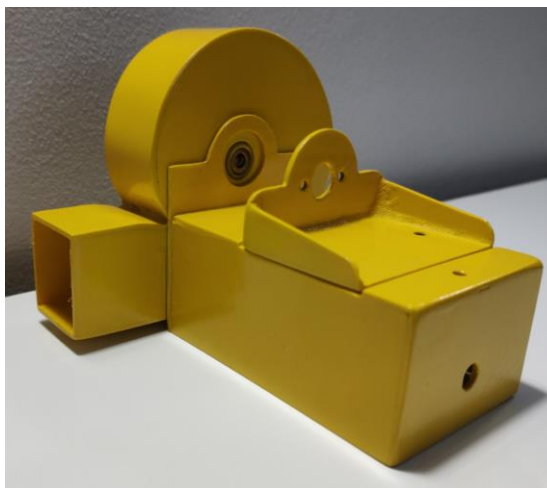
Depois de dimensionado e traçado, a voluta do ventilador centrífugo foi construída em placas de PVC (Figura 19) com a utilização de ferramentas manuais. Foi construída também uma base para acoplar o motor ao rotor (Figura 20), e junto a essa base ficou alocado todo o sistema elétrico necessário para o funcionamento do sistema, energizado por uma fonte de 24 volts, 3 Amperes (Figura 21), e composto por uma chave de acionamento (Figura 22) e um dimmer para controlar a velocidade do motor (Figura 23).

Figura 19. Voluta do ventilador centrifugo.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 20. Base para fixação do motor.



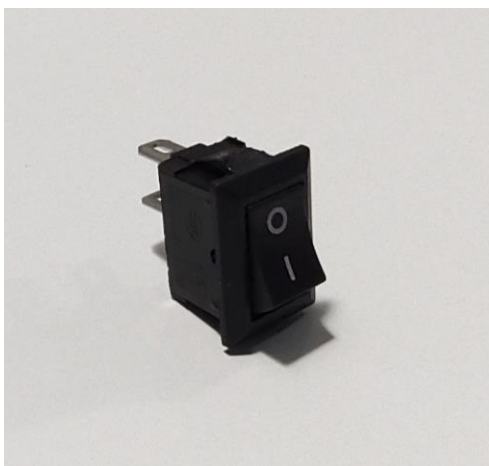
Fonte: O Autor (2023).

Figura 21. Fonte para energizar do sistema.



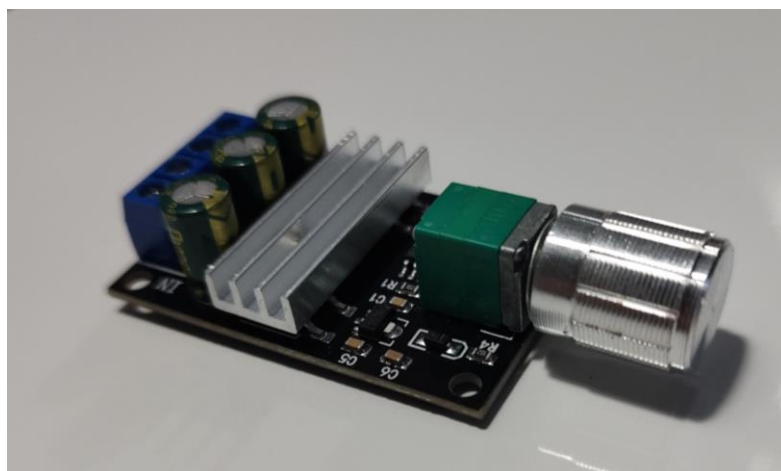
Fonte: O Autor (2023).

Figura 22. Chave para acionamento do sistema elétrico.



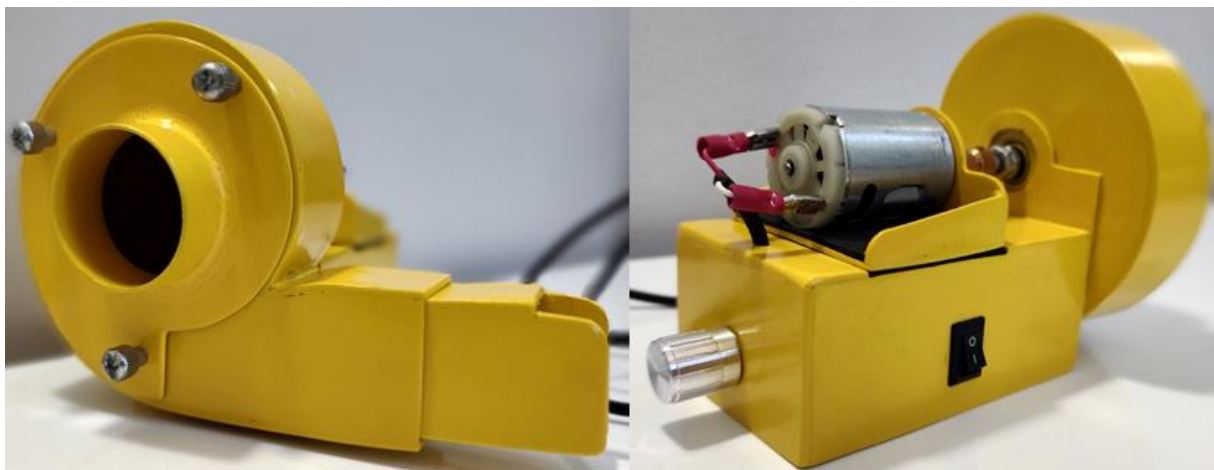
Fonte: O Autor (2023).

Figura 23. Dimmer controlador da velocidade do motor.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 24. Ventilador centrífugo montado.



Fonte: O Autor (2023).

Figura 25. Silo sobre a base e com motor acoplado.



Fonte: O Autor (2023).

4.5 Materiais utilizados

- Chapa lisa de 0.75 mm de espessura para composição do silo, e cobertura.
- Chapa perfurada para sobrepor aos dutos de aeração.
- Rebites de 3,5 mm.
- Chapa de PVC lisa 2 mm de espessura para o feitiço da voluta.
- Concreto para fazer a base do silo, (brita tamanho zero, areia e cimento).
- Motor elétrico 24v, 3A com 18.000 Rpm para o funcionamento do ventilador centrífugo.
- Fonte 24v para acionamento do sistema.
- Conector de cobre, adaptador de eixo do motor 2,3mm para 4mm.
- Dimmer controlador de velocidade do motor.
- Chave para acionar o sistema.
- Rotor.
- Embuchamento do eixo, de bronze, com arruelas de fibra e arruelas de pressão.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo dimensionado e construído (Figura 25) servirá para subsidiar as aulas práticas voltadas para a área de aeração, secagem e afins, do curso de Engenharia Agrícola da Unipampa, Campus Alegrete. O mesmo possui todas as suas partes e componentes móveis, visando auxiliar e facilitar o entendimento de como é o funcionamento desse sistema na prática, possibilitando a interação com o mesmo e podendo ser desmontado por partes, mesmo em funcionamento para poder visualizar todas as partes que compõe esse sistema e a forma como funciona, sendo possível visualizar o interior do silo, a base perfurada os dutos de ar e a turbina.

O referente projeto poderá ser validado em trabalhos futuros para poder ser utilizado como um sistema de aeração, e assim possibilitar que seja realizada a aeração em uma pequena massa de grãos, no interior de um laboratório, tornando dessa uma atividade prática com muitos detalhes, e visando demonstrar como é realizada essa atividade nos silos de unidades de armazenamento. Nesse trabalho, o intuito foi mostrar como é realizado o dimensionamento do sistema e todas as partes constituintes no mesmo.

6. CONCLUSÃO

Com a realização do trabalho foi possível ter o contato direto com todo o sistema de aeração presente em um silo aerador, o que acrescenta na formação acadêmica, pois a partir disso foi possível compreender cada detalhe e sua importância em todas as etapas, desde o dimensionamento até a construção do protótipo.

REFERÊNCIAS

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: quarto levantamento, janeiro 2023 – safra 2022/2023. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. 2023.

ELIAS, M. C. et al. Eficiência na aeração de grãos durante a armazenagem. **Universidade Federal de Pelotas. Pelotas**, 2017.

ELIAS, M. C. **Manejo Tecnológico da Secagem e do Armazenamento de Grãos**. Pelotas: Ed. Santa Cruz, 2009.

JAYAS, D. S. **Mathematical modelling of heat, moisture, and gas transfer in stored-grain ecosystems**. *Stored Grain Ecosystems.*, p. 527-567, 1995.

LOURENSI, J. L. A. **Inovação tecnológica no processo de secagem de arroz em casca com baixas temperaturas**. 2014.

PIMENTEL, M. A. G.; FONSECA, M. J. O. **Secagem e Armazenamento**. Embrapa Milho e Sorgo, 2011.

SILVA, J. de S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2008.

SILVA, J. de S.; VITOR, D. G.; LOPES, R. P. **Construção de ventiladores centrífugos para uso agrícola**. 2013.

WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. In: **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP**. 2019.

APÊNDICE A

Tabela 4. Valores referentes aos materiais utilizados.

Material utilizado	Valor em R\$
Chapa lisa galvanizada 0,75mm	85,00
Motor elétrico 24v	48,00
29 Rebites de 3,5 mm	35,00
Conector de cobre, adaptador de eixo	28,00
Dimmer controlador de velocidade	30,00
Chave para acionar o sistema	7,39
Fonte 24 volts	33,00

Fonte: O Autor (2023).