

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE SECAGEM A AR PARA DESIDRATAÇÃO DE DEJETOS GERADOS NA AVICULTURA DE POSTURA

Felipe Vicente Venâncio¹

Guilherme Bampi Righeto²

Resumo: Um dos maiores problemas na atividade de avicultura é a destinação dos dejetos gerados pelas aves, podendo ser direcionado para a compostagem ou reaproveitado na forma de adubo no solo. Para esta última solução, é necessário que o dejetos passe por um processo de secagem para que se obtenha um subproduto em condições de ser usado. O objetivo do trabalho é estudar conceitos de secagem e com base nisso optar por um mais adequado, melhorando a eficiência de um processo de secagem já existente, visando reduzir os custos de produção e tornando mais sustentável. Foi utilizado um método de dimensionamento comumente aplicado em sistemas de secagem de grãos e adaptado a realidade e necessidade da aplicação do trabalho que é a secagem de dejetos. Com base nos resultados foram propostas melhorias no projeto do secador e nas condições de operação para maximizar o desempenho do sistema. Os resultados obtidos indicam que as melhorias propostas foram capazes de aumentar significativamente a eficiência do processo de secagem, reduzindo o tempo de secagem em 830% e o consumo de combustível em 18,6 %. Espera-se que este estudo contribua para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para o tratamento de resíduos na avicultura de postura comercial, além de beneficiar outros setores da indústria que utilizam processos de secagem similares.

Palavras-chave: Secagem de Dejetos. Forno. Eficiência Térmica. Sustentabilidade.

¹ Graduando em curso, Engenharia Mecânica, 2023. E-mail: feliph45@yahoo.com

² Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: guilherme.righeto@satc.edu.br

1 INTRODUÇÃO

A avicultura é uma atividade de grande relevância econômica no Brasil. Atualmente o país é o maior exportador de carne de frango do mundo, o terceiro maior produtor de carne de frango do mundo, além da cadeia produtiva a atividade ter grande impacto social, pois é um grande gerador de emprego e renda para o país, empregando diretamente e indiretamente 3,5 milhões de trabalhadores. (ABPA, 2022).

O presente estudo foi focado na atividade de postura comercial. Um dos maiores desafios na avicultura de postura comercial é a destinação de todo dejetos gerado pelas aves nesse processo. São dezenas de toneladas geradas diariamente pelas aves, cada ave gera aproximadamente 0,09 kg de dejetos por dia. (AUGUSTO, 2007).

A destinação dos dejetos é um grande problema no ponto de vista ambiental, já que não se pode descartar esses dejetos no meio ambiente devido suas características serem extremamente agressivo ao ambiente.

O mais comum é o método de compostagem, que consiste em misturar os dejetos com maravalha em unidades específicas e deixar agir um certo período de tempo (120 ~ 150 dias). Porém com o constante aumento do tamanho dos aviários e consequente aumento da produção de dejetos esse método vem se tornando pouco eficiente. Com base nisso estudou-se alguns conceitos de secagem forçada, que consiste em fazer a desidratação e retirada de umidade em um intervalo curto de tempo, de forma que se consiga suprir toda produção do aviário de forma constante e consiga chegar a níveis de umidade no qual o dejetos possa ser utilizado como adubo e ainda mantenha todas suas propriedades. Nesse quesito o desafio está no desenvolvimento de um equipamento que tenha a capacidade de secar todo dejetos gerado diariamente de forma eficiente e continua, fazendo que o investimento do produtor tenha o retorno a partir da venda desse adubo.

O objetivo desse trabalho é otimizar um sistema de secagem de dejetos já existente, porém que não é eficiente e não atende as expectativas produtivas de um aviário de postura de porte médio a grande. A otimização consiste em torná-lo mais



eficiente diminuindo o tempo de secagem, conseqüentemente possibilitando a secagem de um maior volume de dejetos diariamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta as pesquisas realizadas na literatura, a qual servirá de embasamento teórico para as análises e discussões dos resultados obtidos neste estudo de caso.

2.1 AVICULTURA DE POSTURA E O CRESCIMENTO NO CONSUMO DE OVOS

A avicultura é a criação de aves visando a produção de alimentos, principalmente carne e ovos.

A postura comercial é a atividade da avicultura que visa a produção de ovos tanto para o consumo como para reprodução. O consumo de ovos no Brasil vem aumentando significativamente nos últimos anos, batendo marcas históricas em 2021 (ABPA, 2022).

2.1.1 DESTINAÇÃO DOS DEJETOS GERADOS PELAS AVES POEDEIRAS NA CRIAÇÃO

De acordo com Augusto (2011), o manejo de dejetos merece destaque atualmente como uma preocupação a mais aos produtores do setor, envolvendo qualidade e comércio, assim como interferindo nos custos de investimento e retorno, que são fatores importantes na produção lucrativa de aves.

Há dois modelos de aviários utilizados na postura (Fig. 1), piramidais, que possuem alojamento central para destinação dos dejetos que caem nele por gravidade e são tratados com o tempo como uma compostagem, e verticais, nesse sistema não é possível o alojamento central para os dejetos, a coleta é feita através de esteiras transportadores que passam por cada andar coletando o esterco diariamente, esse dejetos é úmido e precisa ser tratado e ter sua umidade reduzida.

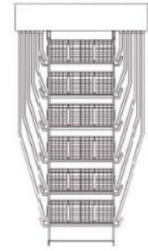
Figura 1 – (a) Aviário piramidal. (b) Aviário vertical.



(a) Fonte: Do autor (2023).



(b) Fonte: Do autor (2023).



2.1.2 TRATAMENTO DO DEJETO UTILIZANDO O MÉTODO TRADICIONAL (COMPOSTAGEM)

O processo de compostagem pode ser definido como sendo a decomposição biológica realizada por microrganismos autóctones num ambiente úmido, aquecido e aeróbio, com produção de dióxido de carbono, água e minerais, tendo como resultado o composto orgânico (PAULA *et al.*, 2010). A compostagem consiste, basicamente, na mistura dos dejetos brutos, com maravalha, serragem ou palha, em unidades de compostagem. O composto estará pronto para o uso cerca de 120–150 dias após o início da operação. (OLIVEIRA *et al.*, 2008).

2.1.3 TRATAMENTO DO DEJETO POR DESIDRATAÇÃO FORÇADA

A desidratação forçada é uma técnica utilizada no manejo de dejetos de aves poedeiras que tem como objetivo reduzir o volume de resíduos e melhorar sua qualidade, tornando-os mais fáceis de serem armazenados e manuseados. Nesse processo o dejetos é submetido a um sistema de desidratação, que pode utilizar diferentes métodos com objetivo de remover a maior quantidade possível de umidade do material, reduzindo assim o volume e aumentando a concentração de nutrientes.

Na secagem/desidratação o volume bruto diminui em até 1/3, isso se dá devido ao fato do dejetos ser composto por em média 70% à 80% de água. Na secagem, reduzindo drasticamente sua umidade grande parte dessa água é retirada, alcançando uma umidade após o tratamento menor que no sistema de compostagem, no processo de desidratação/secagem o dejetos sai mais seco e com menos volume.

2.2 SECADOR DE DEJETOS

O secador de dejetos (Fig. 2) é a máquina a qual será responsável por fazer efetivamente a desidratação dos dejetos, a qual o dejetos úmido será direcionado e onde haverá troca de calor para que ocorra a redução de umidade. O secador pode ser alimentado por algum sistema que pode ser uma caldeira gerando vapor ou apenas uma fornalha, gerando ar quente e com auxílio de ventilação é direcionado para o interior do secador.

Figura 2 – Secador de dejetos



Fonte: Do autor (2023)

2.3 DEFINIÇÃO CALOR ESPECIFICO DO DEJETO

É necessário uma estipulação do calor específico da matéria, a regressão linear apresentada por Nayeri (2009) via Eq. 1:

$$c_p = 0,68298 + 0,025662 T + 0,01306 MC \quad (1)$$

Onde:

c_p = Calor específico do dejetos (kcal/h);

T = Temperatura de entrada do material (°C);

MC = Umidade do dejetos (%);

2.4 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO



Dimensionamento realizado a partir de uma metodologia bastante adotada no desenvolvimento de sistemas de secagem de grãos, aplicada a realidade desse projeto. De acordo com MILMAN (2002), é possível calcular a quantidade de calor necessária utilizando a Eq. 2 abaixo:

$$Q = W \left[\left(\frac{100 - hi}{100} \right) Cm + \left(\frac{hi}{100} \right) CH_2O \right] (te - ta) + \left[\frac{W(hi - hf)}{100 - hf} \right] r \quad (2)$$

Onde:

Q = Quantidade de calor necessário à secagem (kcal);

W = Massa de entrada do produto a ser secado (Kg);

hi = Teor de umidade inicial (%);

hf = Teor de umidade final (%);

Cm = Calor específico do produto a ser secado (kcal/kg°C);

CH_2O = Calor específico da água (kcal/kg°C);

r = Calor latente de vaporização (kcal/kg°C);

te = Temperatura de secagem (kcal/kg°C);

ta = Temperatura inicial do produto (°C);

MILMAN (2002) ainda considera uma perda de 30% de calor nesse processo, fator que precisa ser considerado no cálculo.

2.4.1 VAZÃO DE AR NECESSÁRIA PARA SECAGEM

Como se trata de um sistema de fluxo cruzado, onde há mistura com ar atmosférico, é calculado a vazão de ar necessária para secagem, conforme Eq. 3:

$$V = \frac{Q}{0,286 \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Onde:

V = Vazão de ar necessária (m³/h);

Q = Calor (kcal/h);

ΔT = Diferença de temperatura (°C);

2.4.2 PODER CALORIFICO DO COMBUSTÍVEL

A quantidade de energia liberada por unidade de massa, ou de volume, é definida pelo poder calorífico superior ou inferior e vai depender da composição de cada combustível. A técnica usada, quando se aplica a primeira lei da termodinâmica às reações químicas, consiste em admitir que a entalpia de todos os elementos seja nula no estado de referência 25 °C e 760 mmHg conforme Eq. 4 (BAZZO, 1995).

$$P_{cs} = 33900 c + 141800 \left(h - \frac{0}{8} \right) + 9200 s \quad (4)$$

Onde:

P_{cs} = Poder calorífico superior (kJ/Kg)

c = Teor de carbono (kg de carbono/kg comb);

h = Teor de hidrogênio (kg hidrogênio/kg/comb);

s = Teor de enxofre (kg enxofre/kg comb);

o = Teor de oxigênio (kg oxigênio/kg comb);

Foi adotado eucalipto como combustível, devido custo e facilidade de compra, além de questões ambientais como reflorestamento, abaixo a composição elementar do eucalipto utilizado (Tab. 1):

Tabela 1: Composição elementar do eucalipto.

Carbono	48,7%
Hidrogênio	5,7%
Oxigênio	45,3%
Enxofre	0,5%

Fonte: VASSILEV (2009).

2.5 DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

A fornalha é o componente de unidade geradora de vapor destinado a converter energia química do combustível em energia térmica. (BAZZO, 1995). Como qualquer equipamento a fornalha possui um rendimento, ou seja um fator de correção, a maioria das fornalhas apresentam um rendimento de 85%, dada pela Eq. 5:



$$Qf = \frac{Q}{\eta/100} \quad (5)$$

Onde:

Qf = Calor na fornalha (kcal/h);

Q = Calor (kcal/h);

η = Rendimento (%);

Calcular a quantidade de combustível é muito importante no dimensionamento do projeto, já que a quantidade de combustível a ser utilizada futuramente vai impactar na viabilidade do projeto, pode-se determinar com a Eq. 6 abaixo:

$$\dot{m}comb = \frac{Qf}{PCS} \quad (6)$$

Onde:

$\dot{m}comb$ = Quantidade de combustível (kg/h)

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg);

Qf = Calor fornalha (kcal/h);

Também é obrigatório que seja determinado a área necessária de grelha para queimar o combustível que será usado no processo, conforme WEBER (2005) por meio da Eq. 7:

$$Agr = \frac{\dot{m}comb}{K} \quad (7)$$

Onde:

Agr = Área de grelha (m²);

$\dot{m}comb$ = Quantidade de combustível (kg/h);

K = Fator (kg/m².h);

O fator K é tabelado e determinado através do tipo de combustível e a forma de carregamento.

2.5.1 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DA CAMÊRA DE COMBUSTÃO

De acordo com WEBER (2005), a câmara de combustão pode ser calculada usando a Eq. 8 abaixo:

$$V_{comb} = \frac{Q_f \cdot PCS}{Carga K} \quad (8)$$

Onde:

V_{comb} = Volume de combustão (kg/h)

Q_f = Calor fornalha (kcal/h);

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg);

$Carga K$ = Fator que varia de acordo com o tipo de combustível (kcal/m³h);

2.6 QUANTIDADE DE AR PARA COMBUSTÃO

A massa dos gases de combustão que deixa a fornalha foi determinada em função do balanço de massa dos reagentes, aplicando o princípio da conservação de massas. Para efeito comparativo, realizou-se a qualificação da massa dos gases pelo método da estequiometria, a partir do conhecimento da composição elementar do combustível escolhido na Eq. 9 (MAGALHÃES, 2007).

$$m_{ar} = \frac{100}{23,2} (2,7C + S + 8H - O) \quad (9)$$

Após a obtenção da massa de ar multiplica-se pela taxa mássica de combustível para o resultado de massa total de ar (Eq. 10).

$$\dot{m}_{artotal} = m_{ar} \cdot \dot{m}_{comb} \quad (10)$$

2.6.1 CÁLCULO DO EXCESSO DE AR

O excesso de ar garante um melhor contato com o combustível, proporcionando sempre uma quantidade suficiente de ar para o processo de combustão. O excesso de ar varia de acordo com vários fatores, tais como: tipo de combustível, granulometria, sistema de injeção de ar, tempo de contato do com o combustível. (VLASSOV, 2001). O excesso de ar pode ser definido como a relação entre massa de ar real e a massa de ar teórico (Eq. 11).

$$\dot{m}_{ar\ real} = m_{ar\ total} \cdot \alpha \quad (11)$$

O α é um valor percentual de excesso de ar estipulado para cada tipo de combustível, a lenha em geral segundo (MAGALHÃES, 2007) é de 40 %.

2.6.2 CÁLCULO DA VAZÃO MÁSSICA DOS GASES E CONCENTRAÇÃO DE CINZAS

De acordo com MAGALHAES (2005), a vazão mássica dos gases gerados na combustão é dada pela expressão na Eq. 12:

$$\dot{m}_{gases} = \dot{m}_{comb} \cdot \frac{\% \text{ cinza}}{100} \quad (12)$$

A quantidade de cinza é determinada através da porcentagem de cinzas presentes na madeira seca, encontrada na literatura, acha-se em torno de 0,8% para o eucalipto (JENKINS, 1990). A Eq. 13 calcula a quantidade de cinzas presente:

$$\dot{m}_{cinza} = 3,677 C + 0,77 \dot{m}_{ar\ real} + (\alpha - 1)\dot{m}_{ar\ real} \quad (13)$$

Por fim pode-se determinar a massa total de ar e gases gerados na queima do combustível pela Eq. 14 abaixo:

$$\dot{m}_{gu} = \dot{m}_{ar\ real} + \dot{m}_{gases} - \dot{m}_{cinza} \quad (14)$$

2.7 BALANÇO DE ENERGIA

O primeiro princípio da termodinâmica é a lei da conservação de energia, nela observa-se a equivalência entre trabalho e calor (MAGALHAES, 2007). No método adotado de dimensionamento o balanço de energia tem como objetivo calcular a temperatura de saída teórica da fornalha. Pela primeira lei da termodinâmica (Eq. 15 e 16):

$$q_q = m_f \cdot c_p \cdot (t_{qe} - t_{qs}) \quad (15)$$

$$q_f = m_{tc} \cdot c_p \cdot (t_{fs} - t_{fe}) \quad (16)$$

Onde:

m_f = Vazão mássica de ar na fornalha (\dot{m}_{gu})

t_{qe} = Temperatura de entrada do fluído quente (°C);

t_{qs} = Temperatura de saída do fluído quente (kcal/h);

t_{fs} = Temperatura de saída do fluído frio (°C);

t_{fe} = Temperatura de entrada do fluído frio (°C);

c_p = Calor específico (kcal/h).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesse tópico será apresentada a sequência metodológica utilizada para a realização desse trabalho, desde a análise inicial do conceito ao dimensionamento térmico e modelamento.

3.1 ANÁLISE DO TROCADOR DE CALOR ATUAL

Inicialmente foi feita uma análise do sistema de secagem já instalado em campo, a qual o cliente relata ser ineficiente porque não consegue suprir sua demanda diária de produção de dejetos. Quando adquirido o equipamento, a intenção era secar toda sua produção de dejetos em 10 horas de funcionamento, dessa forma trabalhando apenas um turno e economizando no número de funcionários envolvidos na operação.

3.1.1 ANALISE CONCEITO ATUAL

Após a visita em campo e análise do equipamento foi possível identificar que o conceito atual utilizava uma caldeira como gerador de calor para o trocador de calor, dessa forma gerando vapor e a partir daí sendo jogado para o secador através de uma tubulação (Fig. 3).

Figura 3 – (a) Secador de dejetos. (b) Caldeira.



Fonte: Do Autor (2023).

3.1.2 ANALISE DESEMPENHO E DADOS ATUAL EQUIPAMENTO

Foi analisado o desempenho do atual secador e coletado em campo os seguintes resultados, apresentados na Tab. 2 abaixo, e também uma ilustração do dejetos seco (Fig. 4):

Tabela 2 - Dados sistema atual.

Dado	Resultado	Unidade
Quantidade dejetos	650	kg
Umidade inicial do dejetos	75	%
Tempo de secagem	1	h
Umidade final do dejetos	20	%

Fonte: Do Autor (2023)

Figura 4 – Dejeito após secagem.



Fonte: Do autor (2023)

3.2 DEFINIÇÃO DO CONCEITO

O próximo passo foi estudar um novo conceito que fosse mais eficiente e adequado e que pudesse trazer os resultados que o cliente e sua aplicação necessitam, já que tanto teoricamente quanto na prática o atual conceito é ineficiente, tornando-o inviável em termos financeiros e sustentáveis.

Após pesquisas na literatura foi adotado um sistema de trocador de calor de fluxo cruzado para aquecimento do ar de secagem, utilizando uma fornalha como gerador de calor, esse sistema é amplamente utilizado na secagem de grãos, nas mais variadas necessidades de massa e retirada de umidade, dessa forma a metodologia de dimensionamento e cálculo foi a mesma, trazendo a realidade da aplicação, que é secagem de dejeito ao invés de grãos.

3.3 COLETA DE INFORMAÇÕES E DADOS PARA DIMENSIONAMENTO

Nessa etapa foi coletado todas as informações possíveis e necessárias para o dimensionamento do equipamento, mostradas na Tab. 3 abaixo:

Tabela 3: Informações para dimensionamento.

Dados	Valor	Unidade
Quantidade dejeito gerado no dia	54000	kg
Umidade inicial do dejeito	75	%
Umidade final do dejeito	20	%
Temperatura de secagem	100 à 150	°C
Temperatura de entrada do dejeito	20	°C
Tempo de secagem	10	h

Fonte: Do Autor (2023).

3.4 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

A partir dos dados coletados o próximo passo foi dar início ao dimensionamento térmico, adotando-se a metodologia apresentada na revisão bibliográfica.

3.4.1 DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECÍFICO DO DEJETO

Primeiro passo do dimensionamento foi estipular um calor específico para o dejeito. Nesta etapa foi utilizada uma regressão linear para sua determinação, com base na Eq. 1, inserindo-se apenas os valores da temperatura de 20 °C e de umidade inicial do dejeito de 75 %, a partir disto, estima-se o calor específico do material.

Essa é uma etapa bastante importante, pois o dimensionamento vai depender totalmente dessa determinação, já que não pode-se considerar apenas o calor específico d'água como se ela estivesse livre no processo.

3.4.2 DETERMINAÇÃO DO CALOR NECESSÁRIO PARA SECAGEM

Sabendo que precisa-se secar 54000 kg de dejeito em 10 horas de trabalho, então o valor de W é considerado como sendo descrita como a Eq. 17:

$$W = \frac{Qtd_{total}}{10h} \quad (17)$$

Próximo passo foi determinar a quantidade de calor necessário para reduzir 5400 kg de dejetos a uma umidade de 75 % para uma umidade de 20 %, abaixo os

dados utilizados na Eq. 2 para determinação. A Tab. 4 resume os dados de entrada usados para o início do processo matemático.

Tabela 4: Dados de entrada de projeto.

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Quantidade de dejetos	5400	kg	<i>W</i>
Umidade inicial do dejetos	75	%	<i>hi</i>
Umidade final do dejetos	20	%	<i>hf</i>
Calor específico do dejetos	calculado	kcal/kg°C	<i>cm</i>
Calor específico da água	1	kcal/kg°C	<i>hi</i>
Calor latente da água	568	kcal/kg°C	<i>CH₂O</i>
Temperatura de secagem	150	°C	<i>te</i>
Temperatura inicial do produto	20	°C	<i>ta</i>

Fonte: Do Autor (2023).

Após a substituição dos dados acima na Eq. 2 foi encontrado o calor necessário para secagem da quantidade de dejetos no intervalo de tempo de 10 horas.

É considerado ainda uma perda de 30% no processo de remoção de umidade na forma da Eq. 18:

$$Q_{perda} = \frac{Q}{1,3} \quad (18)$$

3.4.3 VAZÃO DE AR NECESSÁRIA PARA SECAGEM

Após determinação do calor com grau de correção, o próximo passo foi fazer o cálculo de vazão de ar necessário para secagem, foi utilizada a Eq. 3 da revisão bibliográfica. Os dados de entrada além do calor que é calculado na Eq. 2, foram a diferença de temperatura entre a entrada do dejetos e a temperatura de secagem descritos na Tab. 5:

Tabela 5: Temperaturas para cálculo de vazão

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Temperatura de entrada do dejetos	20	°C	<i>Te</i>
Temperatura de secagem	100 à 150	°C	<i>Ta</i>

Fonte: Do autor (2023)



Nessa etapa do dimensionamento, foi calculado com diferentes temperaturas de secagem entre 100 °C à 150 °C, dessa forma analisou-se a variação de vazão em função do aumento da temperatura de secagem.

3.4.4 PODER CALORIFICO DO COMBUSTÍVEL

Próximo passo foi a escolha do combustível e a determinação do poder calorífico, o combustível escolhido foi o eucalipto devido sua facilidade comercial, para determinação foi usado a Eq. 4 e a composição elementar do eucalipto com 12% de umidade, conforme VASSILEV (2009).

3.5 DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

Como qualquer equipamento que envolve transferência de calor, a fornalha possui um rendimento, foi considerado um rendimento de 85 % e recalculado o calor necessário considerando esse rendimento na Eq. 5.

3.5.1 QUANTIDADE DE COMBUSTIVEL

Após a determinação da quantidade total de calor necessária e sabendo o PCS do combustível escolhido, é possível calcular a quantidade necessária de combustível para essa operação por meio da Eq. 4.

3.5.2 ÁREA DA GRELHA

Próximo passo foi a definição da área grelha necessária para a operação, utilizando a Eq. 6 e inserindo os valores da taxa de combustível e o fator K, pode-se calcular.

Fator K depende do combustível escolhido e da forma de carregamento, abaixo a tabela para lenha, no trabalho foi adotado a média entre 80 à 130, chegando a um valor de 105.

Tabela 6: Fator k.

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Carga manual e ar natural	80 à 130	kg/m ² .h	K
Carga mecânica e ar forçado	150 à 300	kg/m ² .h	K

Fonte: Magalhães (2005).

3.5.3 DETERMINAÇÃO DO VOLUME DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

Ainda dentro do dimensionamento da fornalha o próximo passo foi determinar o volume necessário da câmara de combustão, ou seja, da fornalha, foi utilizando a Eq. 7, multiplicando-se o calor total necessário pelo PCS do combustível e dividindo pela carga K, sendo a carga K um fator que varia de acordo com o combustível e no caso da lenha é adotado o valor de 200000 kcal/m³h apontado pela literatura.

3.6 QUANTIDADE DE AR PARA COMBUSTÃO

Para determinação da quantidade de ar para combustão foi feito um balanço de massas, utilizando as Eq. 8 e 9 e novamente a composição elementar do combustível mostrada na Tab. 1, e assim, foi determinada a quantidade de ar total necessária para combustão.

3.6.1 CÁLCULO DO EXCESSO DE AR

Após a determinação da quantidade de ar total para combustão, devemos calcular o excesso de ar contido no processo, utilizando-se a Eq. 11, deve-se multiplicar a quantidade total de massa de ar por um percentual que varia de acordo com o combustível, a literatura indicada na revisão bibliográfica aponta como sendo de 40% para lenha e madeira em geral.

3.6.2 CÁLCULO DA VAZÃO MÁSSICA DOS GASES E CONCENTRAÇÃO DE CINZAS

O passo seguinte foi calcular a vazão mássica dos gases gerados na combustão, foi utilizado a Eq. 12, onde diz que a vazão mássica dos gases é taxa do



combustível multiplicado pelo percentual de cinzas e dividido por 100, o percentual de cinzas varia de acordo com o combustível, sendo para a lenha de 0,8%.

Após a determinação da vazão mássica dos gases, foi calculada a quantidade de cinzas presente no processo, utilizando-se a Eq. 13.

3.6.3 MASSA TOTAL DE AR E GASES GERADOS NA QUEIMA DO COMBUSTIVEL

Após a determinação a quantidade de ar, de gases e de cinzas presente no processo, calculamos a massa total de ar e gases gerados na queima do combustível, foi calculada utilizando-se a Eq. 14, que relaciona todos esses dados.

3.7 BALANÇO DE ENERGIA

Por fim para determinação teórica da temperatura da saída dos gases da fornalha é feito o balanço de energia, essa é a etapa final do dimensionamento.

3.8 MODELAMENTO 3D, DESENHO ESQUEMÁTICO E LAYOUT SUGERIDO

Após o dimensionamento térmico do sistema, foi realizado um modelamento 3D do sistema afim de estimar as dimensões e conseguir entender melhor como ficaria alocado cada parte do sistema, fornalha, ventiladores, secador e tubulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através do dimensionamento, além do modelamento 3D, layout e comparativo com o sistema atual.

4.1 DETERMINAÇÃO DO CALOR ESPECIFICO DO DEJETO

Conforme apontado no tópico anterior, como o processo se trata de retirada de umidade da água em contato com outra matéria, calcula-se o calor específico do dejetto utilizando uma regressão linear, o resultado foi o encontrado na Tab. 7 abaixo:

Tabela 7: Calor específico do dejetos.

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Calor específico do dejetos	0,520	kcal/kg °C	<i>C_m</i>

Fonte: Do autor (2023)

Nota-se que o calor específico do dejetos é bem diferente da água, isso mostra que daria uma grande diferença quando utilizado apenas água nesse cálculo, sem considerar a matéria em contato, dessa forma conseguimos calcular com muito mais precisão o calor necessário para realizar esse processo.

4.2 DETERMINAÇÃO DO CALOR NECESSÁRIO PARA SECAGEM

Sabendo o calor específico do dejetos e utilizando os dados de entrada já conseguimos calcular toda energia necessária em forma de calor para realizar todo o processo de secagem dos dejetos (Tab. 8).

Tabela 8: Resultado da quantidade necessária de calor para secagem.

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Quantidade de calor necessária	2726383	kcal/h	<i>Q</i>

Fonte: Do autor (2023)

É necessário considerar uma perda de 30% no processo de secagem, fator de correção estipulada pela literatura, chegou-se no resultado abaixo (Tab. 9):

Tabela 9: Calor necessário com perda no processo de secagem.

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Quantidade de calor necessária	3544298	kcal/h	<i>Q</i>

Fonte: Do autor (2023)

4.2.1 CÁLCULO DA VAZÃO DE AR NECESSÁRIA E DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DE SECAGEM

Nesse tópico foi calculado a vazão de ar necessária para a condução do ar quente da fornalha até o secador, descritos na Tab. 10. Foi constatado e adotada a melhor temperatura para secagem, sabendo que a temperatura de secagem deve

estar entre 100 à 150 °C para que haja evaporação e ao mesmo tempo não aquecer demais e comprometer a integridade dos elementos fertilizantes do dejetos.

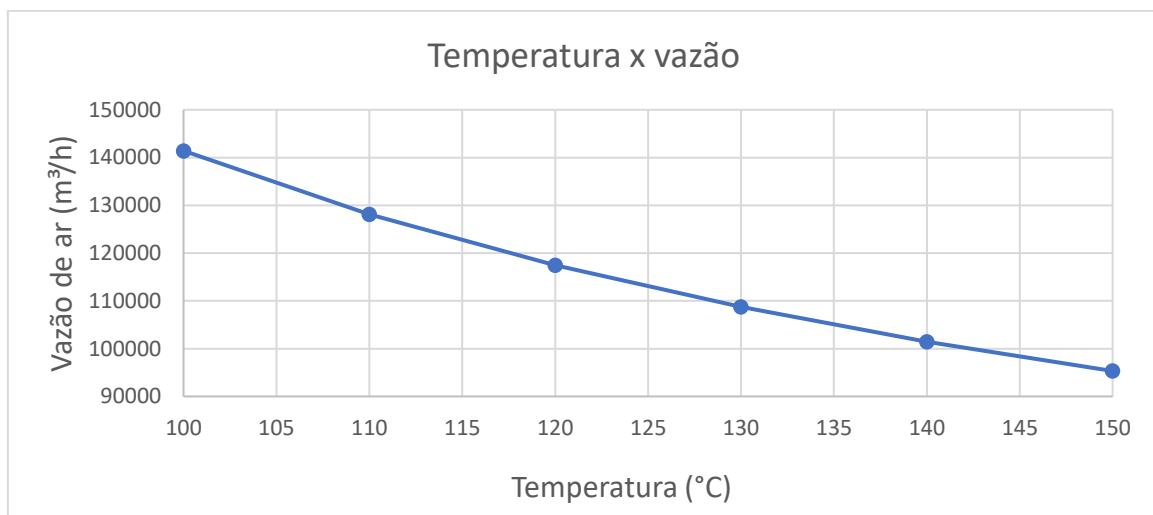
Tabela 10: Resultados de vazão em relação a temperatura

Temperatura	Unidade	Vazão de ar	Unidade
100	°C	141410	m ³ /h
120	°C	117447	m ³ /h
150	°C	95328	m ³ /h

Fonte: Do Autor (2023).

Por meio da Fig. 5 é possível observar a curva decrescente da vazão de ar necessária enquanto a temperatura de secagem aumenta.

Figura 5 – Gráfico de vazão em relação a variação de temperatura.



Fonte: Do autor (2023)

Com base nesses resultados foi adotada a temperatura de secagem como sendo 150 °C, dessa forma mantendo os nutrientes do dejetos e necessitando de uma vazão de ar menor, em relação a temperaturas de secagem mais baixas.

4.2.2 CÁLCULO DO PODER CALORÍFICO DO COMBUSTÍVEL

O combustível adotado como gerador de calor foi o eucalipto e a partir de sua composição elementar e umidade foi determinado o poder calorífico superior, conforme valor da Tab. 11:

Tabela 11: Cálculo PCS

Dados	Valor	Unidade	Nomenclatura
Poder calorífico superior	3966	kcal/kg	<i>Pcs</i>

Fonte: Do autor (2023)

4.3 DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

Levando-se em consideração uma eficiência de 85 % da fornalha, a Tab. 12 lista o calor transferido considerando o fator de correção do sistema de secagem e a eficiência da fornalha, dessa forma pode-se afirmar que esse valor é a quantidade final de calor que necessária para efetuar a secagem.

Tabela 12: Calor necessário com fator de correção da fornalha

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Calor fornalha	4169762	kcal/h	<i>Q_f</i>

Fonte: Do autor (2023)

4.3.1 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE COMBUSTÍVEL

Foi determinado nessa etapa a quantidade de combustível necessária para transferir a quantidade de calor de projeto (Tab. 13).

Tabela 13: Resultado do cálculo da quantidade de combustível

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Quantidade de combustível	1051	kg/h	<i>m_{comb}</i>

Fonte: Do autor (2023)

Nota-se que para gerar 4169762 kcal/h de calor é necessário que se queime 1051 kg de eucalipto por hora, esta é a taxa de entrada de combustível na fornalha, um valor importante já que isso determina o valor que o produtor vai gastar de combustível.

4.3.2 ÁREA DA GRELHA E VOLUME DA CÂMERA DE COMBUSTÃO

Para que se queime a quantidade de combustível calculada é necessário uma área de grelha e volume mínimo da fornalha para operação (Tab. 14):

Tabela 14: Resultado de área de grelha e volume da fornalha

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Área de grelha	10	m ²	<i>Agr</i>
Volume da fornalha	20,85	m ³	<i>Vcomb</i>

Fonte: Do Autor (2023).

Uma fornalha com dimensões inferiores ao necessário não conseguiria atender a demanda de combustível e por consequência não conseguiria gerar o calor necessário.

4.4 CÁLCULO DA QUANTIDADE DE AR PARA COMBUSTÃO

Nessa etapa calculou-se a quantidade de ar para combustão fazendo o balanço de massa dos reagentes utilizando a composição elementar do combustível, após a obtenção da massa de ar multiplicou-se pela taxa mássica do combustível para determinação da massa de ar total (Tab. 15).

Tabela 15: Resultado cálculo da massa de ar.

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Massa de ar	5,7	kg/h	<i>m_{ar}</i>
Massa de ar total	5995	kg/h	<i>m_{artotal}</i>

Fonte: Do autor (2023)

4.4.1 CÁLCULO DO EXCESSO DE AR

Visto que o excesso de ar garante um melhor contato com o combustível, foi calculado sua quantidade ideal a partir do conhecimento da massa de ar total e multiplicado por um percentual ideal que varia de acordo com o combustível, abaixo o valor da massa de ar considerando o excesso de ar (Tab. 16):

Tabela 16: Massa de ar total com excesso de ar

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Massa total com excesso de ar	8393	kg/h	<i>m_{ar real}</i>

Fonte: Do autor (2023)

4.4.2 CÁLCULO DA VAZÃO MÁSSICA DOS GASES E CONCENTRAÇÃO DE CINZAS

Foi calculada a vazão mássica dos gases gerados na combustão e a concentração de cinzas, conforme Tab. 17 abaixo indicando os resultados:

Tabela 17: Taxa mássica dos gases e cinzas

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Taxa mássica dos gases	9821,5	kg/h	\dot{m}_{gases}
Massa da quantidade de cinzas	10,51	kg/h	\dot{m}_{cinza}

Fonte: Do autor (2023)

Por último através do balanço de massas foi calculado a massa de ar e gases total gerados na queima do combustível, valor representado na Tab. 18:

Tabela 18: Massa total de ar e gases gerados na combustão

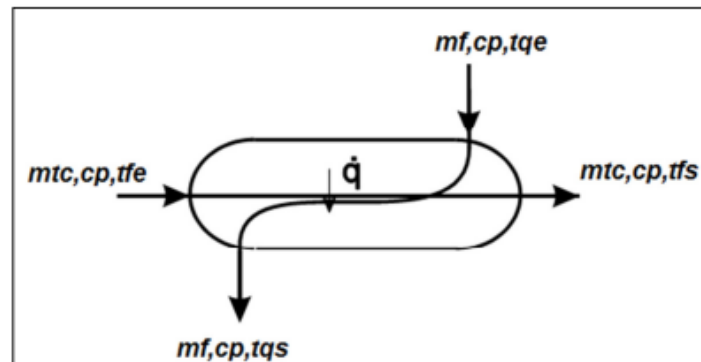
Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Taxa mássica total dos gases	18204	kg/h	\dot{m}_{gu}

Fonte: Do autor (2023)

4.5 BALANÇO DE ENERGIA

Na última etapa do dimensionamento foi feito um balanço de energia para determinação teórica da temperatura da saída dos gases da fornalha, segundo o esquema da Fig. 7.

Figura 7 – Esquema balanço de energia



Fonte: Magalhães (2005)

Para a realização do balanço de energia ainda foi considerado alguns fatores, mostrados na Tab. 19 abaixo:

Tabela 19: Dados para balanço de energia.

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Vazão mássica de ar na fornalha	18204	kg/h	\dot{m}_{gu}
Vazão de ar	95328	m ³ /h	V
Massa específica da água à 60°C	0,98338	kg/m ³	ρ
Vazão multiplicado a massa específica da água à 60°C	93744	kg/h	mtc
Valor médio da temperatura na fornalha	700	°C	t
Temperatura entrada do fluido quente	100	°C	t_{qe}
Temperatura entrada do fluido frio	20	°C	t_{fe}
Calor específico adotado	0,24	kcal/h	c_p

Fonte: Do autor (2023)

Os valores acima foram utilizados no balanço de energia para determinação teórica da temperatura de saída dos gases da fornalha, representada na tabela abaixo:

Tabela 20: Temperatura de saída dos gases

Dado	Valor	Unidade	Nomenclatura
Temperatura de saída dos gases	288	°C	q_q

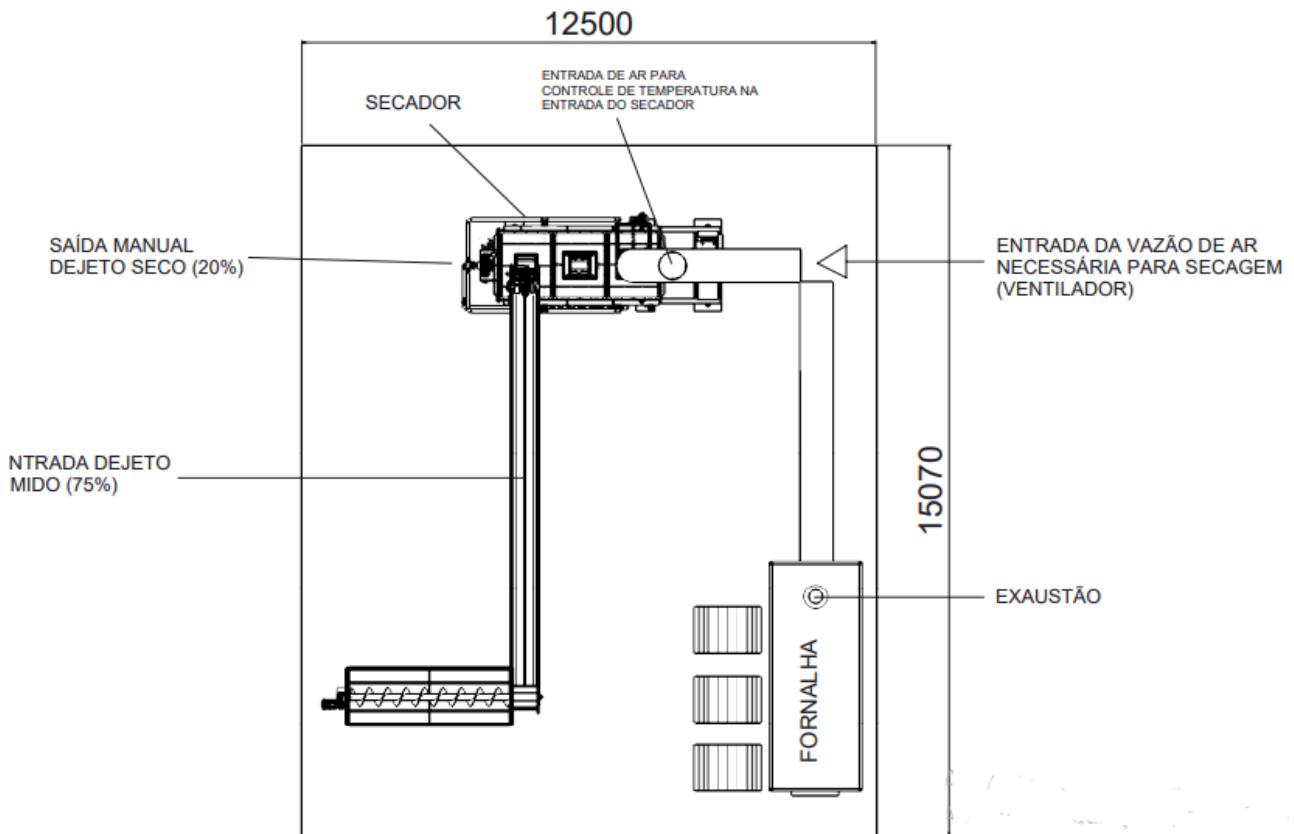
Fonte: Do autor (2023)

Visto que a temperatura de secagem adotado foi de 150 °C, uma temperatura de saída da fornalha de 288 °C mostrou-se totalmente plausível, tendo que ser feito o controle da temperatura próximo a entrada do secador, misturando com ar atmosférico por meio da instalação de uma válvula de controle, reduzindo a 150 °C e dessa forma fazendo com que a secagem seja realizada conforme dimensionamento.

4.6 MODELAMENTO DO SISTEMA COMPLETO

Com base nos resultados realizou-se um desenho esquemático (Fig. 8) para auxiliar na compreensão do sistema de secagem, além da definição do espaço necessário.

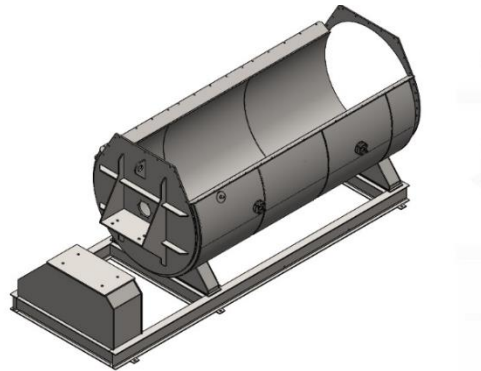
Figura 8 – Desenho esquemático e layout.



Fonte: Do autor (2023)

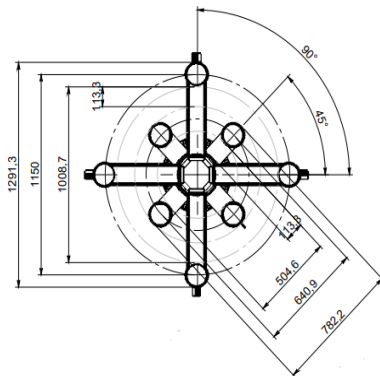
Também realizou-se o modelamento 3D do módulo de secagem (Fig. 9, 10 e 11) e um modelamento 3D do sistema completo (Fig. 12), lembrando que nesse trabalho não foi feito o dimensionamento mecânico, o modelamento é para determinar o corpo do módulo e dar uma noção dimensional do espaço físico necessário e auxiliar na compreensão do funcionamento do sistema.

Figura 9 – Modelo 3D secador de dejetos

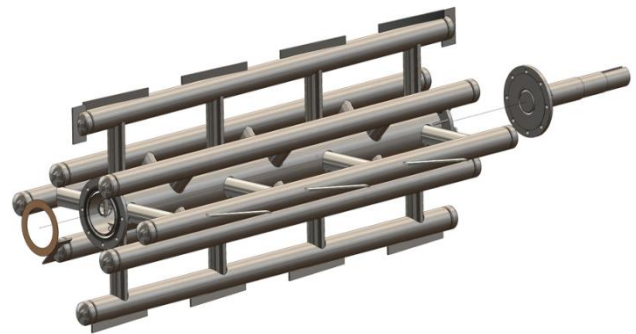


Fonte: Do autor (2023)

Figura 10 – (a) Detalhamento dimensional. (b) 3D conjunto eixo e tubos.



(a)



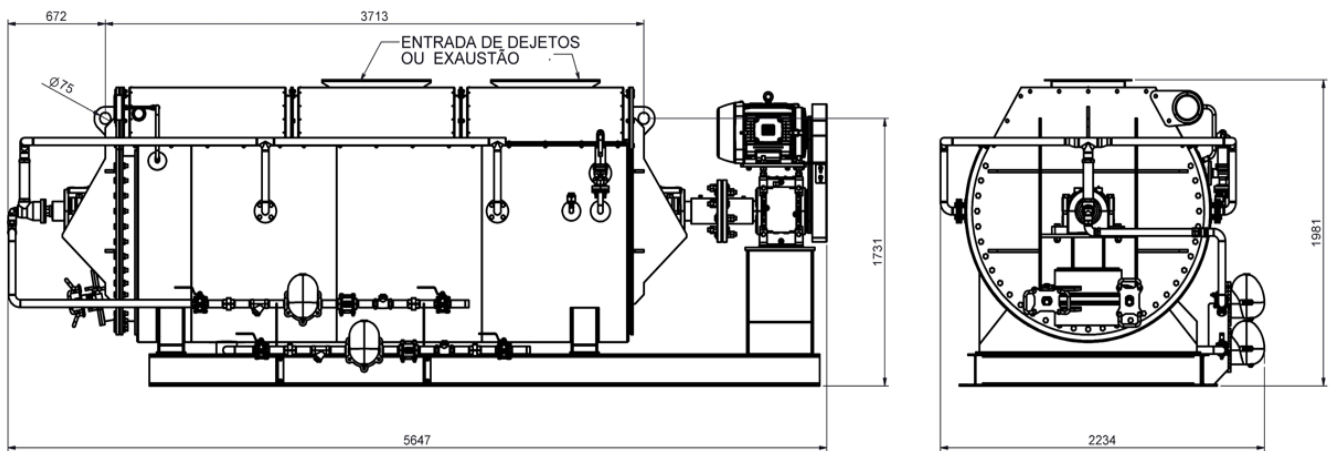
(b)

Fonte: Do autor (2023).

Preliminarmente no projeto do secador foi adotado chapas ASTM A-36 com 3/8" de espessura no corpo, passando pelo processo de galvanização para proteção, calandragem para sua fabricação e posteriormente ainda revestido com um isolamento térmico adequado para minimizar as perdas.

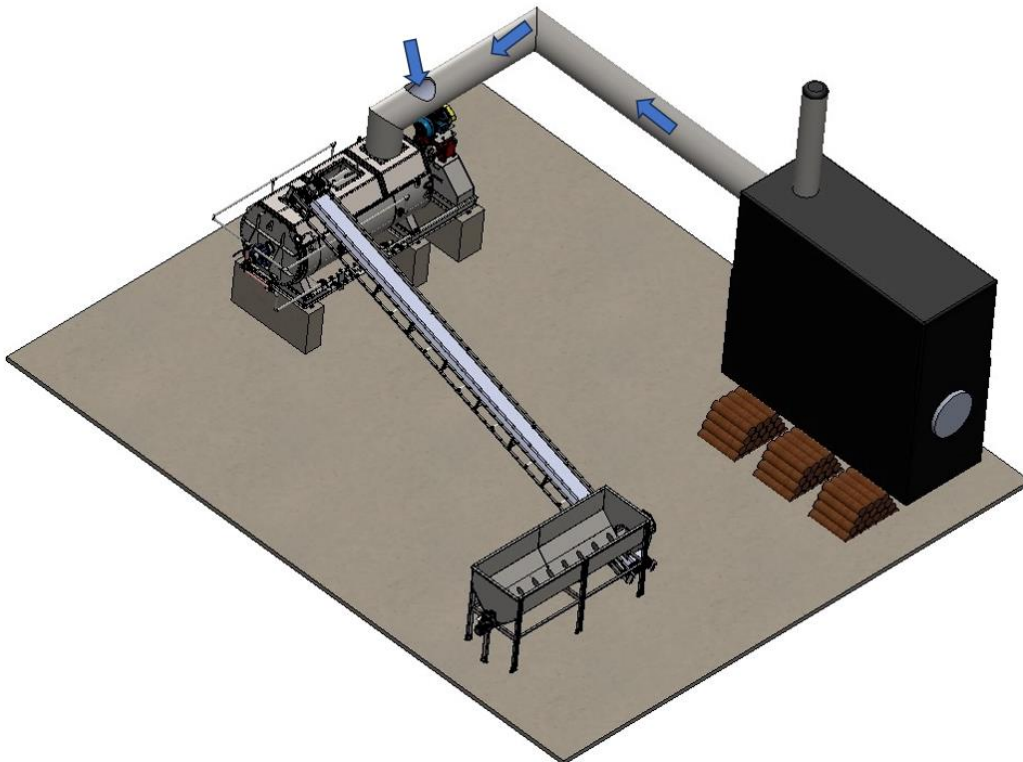
No interior do secador adotou-se no projeto um conjunto de tubos giratórios guiados por um eixo central acionado por um motor com redutor, o objetivo desse mecanismo é fazer com que o dejetos fique em constante movimento e mistura dentro do equipamento, dessa forma quebrando sua granulação e facilitando a secagem.

Figura 11 – Modelamento geométrico do cilindro secador.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 12 – 3D sistema de secagem a ar.



Fonte: Do autor (2023).

4.7 COMPARATIVO SISTEMA ATUAL DE SECAGEM E PROPOSTO

Através dos resultados do dimensionamento foi possível comparar com os resultados práticos do sistema atual, com base nessa comparação ficou evidente que o sistema proposto com conceito totalmente diferente mostrou-se muito mais eficiente em termos de capacidade de secagem e apresentando até um consumo de combustível menor para secar a mesma quantidade de dejetos em um intervalo de tempo muito menor, comparativo abaixo:

Tabela 21: Temperatura de saída dos gases

Parâmetro	Sistema novo	Sistema atual
Quantidade dejetos (kg)	5400	5400
Tempo para secagem do dejetos (h)	1	8,3
Quantidade de combustível usado (kg)	1051	1290
Área de grelha (m ²)	10	2,54
Volume câmara de combustão (m ³)	20,85	8

Fonte: Do Autor (2023).

5 CONCLUSÃO

- Dentro do dimensionamento foi possível visualizar a variação da vazão em relação a temperatura de secagem, visto que em quanto a temperatura aumenta e vazão necessária de ar diminui, com base nos resultados adotou-se a temperatura mais adequada, que foi de 150°C, dessa forma mantendo a integridade dos nutrientes do dejetos e usando a menor vazão de ar possível para efetuar a secagem;
- A temperatura de saída de ar da fornalha foi de 288 °C, mostrou-se coerente, validando o dimensionamento;
- Como a temperatura de ar da saída da fornalha foi de 288 °C e a desejada calculada foi de 150 °C se fez necessário um sistema de controle de temperatura antes da entrada do ar quente no secador, o sistema consiste na entrada de ar atmosférico na tubulação e misturando com o ar quente reduzindo a temperatura até a desejada;
- Quando comparado ao sistema atual de secagem mostrou-se mais rápido no processo, secando 5400 kg em 1 hora, atendendo a necessidade da granja,



enquanto o sistema atual leva 8,3 horas, logo o sistema novo secaria 8.3x mais rápido a mesma quantidade de dejetos;

- O consumo de combustível para secar a mesma quantidade de dejetos também se mostrou menor no novo sistema quando comparado ao atual, a partir do dimensionamento foi visto que para secar 5400 kg de dejetos seria consumido 1050 kg de eucalipto, enquanto no sistema atual consome aproximadamente 1290 kg;
- A área de grelha necessária no sistema novo aumentou, através do dimensionamento chegou-se no resultado de 10 m², enquanto no do atual sistema possui apenas 2,54 m²;
- Através do dimensionamento chegou-se também no volume necessário para câmara de combustão, que foi de 20,85 m³;
- Por fim, os resultados do dimensionamento sugerem que a mudança de abordagem na secagem dos dejetos aumentaria a eficiência do sistema, diminuindo tempo de secagem e reduzindo o consumo de combustível;

REFERÊNCIAS

AUGUSTO, Karolina Von Zuben. **Caracterização quantitativa e qualitativa dos resíduos em sistemas de produção de ovo: Compostagem e biodigestão anaeróbica**. 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Ufsc, 1995. 216 p.

DE OLIVEIRA, Emídio Cantídio Almeida; SARTORI, Raul Henrique; GARCEZ, Tiago B. Compostagem. *In*: DE OLIVEIRA, Emídio Cantídio Almeida; SARTORI, Raul Henrique; GARCEZ, Tiago B. **Compostagem**. 2008. Tese de doutorado (Pós graduação em solos e nutrição de plantas) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2008.

JENKINS, B.M. **Fuel Properties for Biomass Materials**, International Symposium on application and Management of Energy in Agriculture: The role of Biomass Fuels, New Delhi, 1990

MAGALHÃES, Edney Alves. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. 2007. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

MILMAN, Mario José. Equipamentos para Pré-Processamento de Grãos. **Editora gráfica universitária da universidade federal de Pelotas**, Pelotas - RS, 2002.



NAYYERI, Mohammad Amin; KIANMEHR, Mohammad; ARABHOSSEINI, Akbar; - BEYGI, Reza Hassan. Thermal properties of dairy cattle manure. **Int. Agrophysics**, Tehran - Irã, 4 maio 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287903685_Thermal_properties_of_dairy_cattle_manure. Acesso em: 17 maio 2023.

PAULA, L. G. A.; CÉSAR, V. R.; OLIVEIRA, P. E. S. **Avaliação da Compostagem de Resíduos Orgânicos da ÁREA Verde do Campus Marechal Deodoro**. In: Congresso Norte-Nordeste de Pesquisa e Inovação, 5., 2010.

RELATÓRIO ANUAL ABPA 2022. São Paulo: Abpa, v. 1, 03 maio 2022. Anual. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2023/01/abpa-relatorio-anual-2022.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2023.

VASSILEV, Stanislav V. et al. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, [S.L.], v. 89, n. 5, p. 913-933, maio 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmara de combustão**. Editora da UFPR, Curitiba. 2001

WEBER, Érico Aquino. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. 1ª Ed. Panambi, 2005.