

## **AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROJETO DE UMA FORNALHA METÁLICA PARA SECAGEM DE GRÃOS**

**Gilberto Júnior Bagio Mariot<sup>1</sup>**

**Guilherme Bampi Righeto<sup>2</sup>**

**Resumo:** Os conceitos de queima em grelha são amplamente utilizados na secagem de grãos atualmente, pois possuem grande diversidade de combustíveis que podem ser empregados para combustão, facilidade de adaptação de projetos e práticas e rendimento satisfatório para aplicação de secagem de grãos. Dessa forma o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do projeto atual da fornalha de grelha fixa da empresa FACH – Soluções Pós Colheita, e desenvolver um projeto otimizado de grelhas móveis com base em equacionamentos matemáticos, modelando um protótipo utilizando o software CAD 3D sem alterar as dimensões de câmara de combustão. Como principais modelamentos matemáticos desenvolvidos referente ao processo, destaca-se a energia gerada pela combustão e a vazão de ar disponível na secagem, que se ilustram de bem qual a qualidade da combustão, e a área do grelhado fixo onde o valor calculado se mostra 20,28% maior que o real utilizado atualmente no projeto de área de queima. Os demais resultados das equações desenvolvidas referente ao processo de combustão da fornalha foram feitas levando em consideração o desperdício de combustível em comparação com o conceito de grelhas móveis sugerido. O modelamento utilizando software CAD 3D, mostra que a escolha de acionamento elétrico com sistema biela-manivela do conjunto possibilita a otimização da combustão da biomassa, melhor eficiência do processo através da retirada das cinzas e do aproveitamento de carbono do combustível e aceitação de elevados teores de umidade do cavaco, pois a frequência de trabalho do conjunto de grelhas móveis pode ser alterada devido ao seu acionamento elétrico.

**Palavras Chave:** Secagem de grãos. Biomassa. Dimensionamento de fornalhas. Combustão em grelhas.

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2023-1. E-mail: gilberto.mariot@hotmail.com

<sup>2</sup> Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: Guilherme.righeto@satc.edu.br

## 1. INTRODUÇÃO

O cenário agrícola do Brasil teve uma evolução notável nos últimos anos estimulada pela vasta demanda mundial, avanços na tecnologia voltadas para a melhoria do trabalho no campo, na qualidade final dos produtos e na alta oferta no mercado. Dentre os principais produtos, o Brasil se destaca na produção de café, soja, milho, açúcar e etanol (MENEGETTI *et al.*, 2023)

Os queimadores de biomassa surgiram como solução para secagem deste material, principalmente em regiões onde possuem combustíveis abundantes. Para o caso da produção de grãos a principal matéria prima utilizada na combustão e produção de ar quente é a biomassa, formada especialmente de pinus triturados em mistura com cascas, lascas, folhas e pequenos galhos (COSTA, 2005).

Do ponto de vista técnico, estes queimadores são conhecidos como fornalhas. As fornalhas desenvolvidas até o momento podem ser classificadas como de fogo direto, em que os gases resultantes da combustão são misturados com o ar ambiente e insuflados por um ventilador, diretamente na massa de grãos; e de fogo indireto, em que os gases provenientes da combustão passam por um trocador de calor que aquece o ar de secagem. Além disso a maioria dos projetos alternam entre conceitos de combustão em leito fluidizado, em suspensão e grelhas (MELO, 2010).

A empresa FACH – Soluções Pós Colheita ingressou no mercado com o projeto, fabricação e implementação de queimadores (automatizadores) de cavaco de biomassa e fornalhas dedicadas a entrega de ar quente para secagem de grãos. O conceito do projeto do queimador é o abastecimento de biomassa à área de queima da fornalha de maneira mecânica, através de correias emborrachadas e moto redutores dimensionados para cada situação, e a queima do combustível ocorre em grelha fixa.

Avaliando o processo atual, nota-se que os rejeitos da combustão, impurezas do combustível e as cinzas que atingiram seu ponto de fusão depositam-se sobre o grelhado e abaixo do conjunto de grelhas e formam um espécie de “casca”, reduzindo a eficiência do processo de queima e gerando a necessidade da limpeza manual da área de queima.

O projeto abordado por este trabalho já possui dimensões de câmara de combustão definidas onde será feita uma sugestão de implantação do sistema de

grelhas móveis sem alterar as proporções originais utilizadas no processo de combustão em grelhas estacionárias, desta maneira a geometria e dimensões do projeto inicial se mantém constante para os dois modelos de queima e conseguimos manter a padronização nos equipamentos fabricados pela empresa.

Com a sugestão de implantação do conjunto de grelha móvel o processo será aperfeiçoado, tanto no ponto de vista operacional, dispensando a necessidade de um operador dedicado a limpeza e controle do equipamento já que a variação de temperatura e os resíduos são facilmente administrados, melhorando a utilização da queima do combustível e, em contrapartida, resulta em maior eficiência do equipamento, quanto no aproveitamento geral do combustível utilizado na combustão. Além de agregar outro equipamento ao portfólio da empresa.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do projeto atual da fornalha de grelha fixa, e desenvolver um projeto otimizado com base em modelamento matemático, sem alterar as dimensões de câmara de combustão. Para tal desenvolvimento torna-se necessário reunir os principais aspectos que devem ser levados em consideração para o projeto de um conjunto de grelhas móveis e validar o processo atual que utiliza o conceito de grelhas fixas. A finalidade da implantação do conceito de grelhas móveis é, principalmente, a redução da quantidade de cinzas dispostas sobre o grelhado e a facilidade de remoção destes resíduos gerados.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Com o objetivo de proporcionar um melhor entendimento referente ao assunto abordado a revisão bibliográfica está segregada em seções, as quais abordam os seguintes tópicos: combustíveis, combustão, funcionamento e classificação da fornalha analisada e os aspectos e variáveis que serão considerados para o desenvolvimento do equipamento.

### **2.1 COMBUSTÍVEL**

Segundo Bazzo (1995, p.18), qualquer substância que reage com o oxigênio e libera calor é identificada como um combustível sólido, líquido ou gasoso. Os combustíveis são caracterizados por suas propriedades físico-químicas e ocorrem em formas naturais ou artificiais. Para o processo abordado, o combustível se

caracteriza como sólido onde libera energia por consequência de reações químicas com o carbono, hidrogênio e enxofre.

O combustível é um fator crucial para se obter uma queima de qualidade e alguns aspectos devem ser analisados para a escolha ideal, as principais características a serem observadas são: Poder Calorífico Inferior (PCI) e superior (PCS), teor de umidade e teor de cinzas.

A biomassa é uma das maiores fontes de energia do mundo e ainda é considerada uma fonte de energia alternativa bastante atrativa entre as opções disponíveis, pois oferece benefícios como a redução das emissões de gases de efeito estufa e contribui para o desenvolvimento socioeconômico e ambientalmente sustentável.

### 2.1.1 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada por unidade de massa ou de volume de combustível (BAZZO, 1995). Pode-se apresentar este parâmetro de duas maneiras, o poder calorífico inferior e o poder calorífico superior. O PCS representa a energia calorífica máxima possível de extrair por kg de combustível e é expressa pela Eq. 1:

$$PCS = 33900c + 141800 \left( h - \frac{o}{8} \right) + 9200s \quad (1)$$

Onde:

PCS = Poder calorífico superior, kJ/kg;

c = Teor de carbono, kg 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.

O PCI representa a quantidade de calor liberado quando um material entra em combustão e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água. Neste caso, a água contida na combustão não é condensada e permanece no seu estado gasoso (BAZZO, 1995). Este parâmetro pode ser obtido através da Eq. 2:

$$PCI = PCS - 2440 \cdot (9h + w) \quad (2)$$

Onde:

PCI = Poder calorífico inferior, kJ/kg;

w = Teor de umidade, kg umidade/kg comb.

### 2.1.2 Teor de umidade

Esta propriedade do combustível age diretamente na temperatura de combustão, já que um material que possui o teor de umidade elevado apresenta perda na quantidade de calor dentro da câmara de combustão, diminuindo a temperatura e, em contrapartida, a eficiência da queima.

Um combustível com um elevado conteúdo de água necessita de tempos de residência superiores, para que seja possível uma secagem adequada do material a queimar. Segundo Bazzo (1995), o teor de umidade para fornalha operar em condições ideais não deve ser maior que 30%.

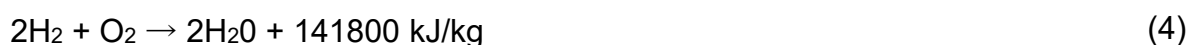
### 2.1.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas pode ser definido pela quantidade de rejeitos que um combustível gera após a queima. A produção de cinza afeta tanto o sistema de remoção desta, como o projeto de todo o sistema de conversão de biomassa, ou seja, a queima, a fornalha, a caldeira, o tratamento de gases além de influenciar a operação da instalação (KHAN, 2009).

## 2.2 COMBUSTÃO

Combustão é a reação exotérmica entre um oxidante e um combustível realizada principalmente com a finalidade de gerar energia para fins diversos, tanto calor quanto luz (GARCIA, 2013). Para secagem de grãos a combustão é utilizada com a finalidade de gerar vapor e calor de acordo com a necessidade de cada secador ou fornalha (BARREIROS, 2015).

O fenômeno químico por trás da combustão de um combustível sólido pode ser ilustrado através dos comportamentos das reações de oxidação dadas pelas Eq. 3, 4 e 5:

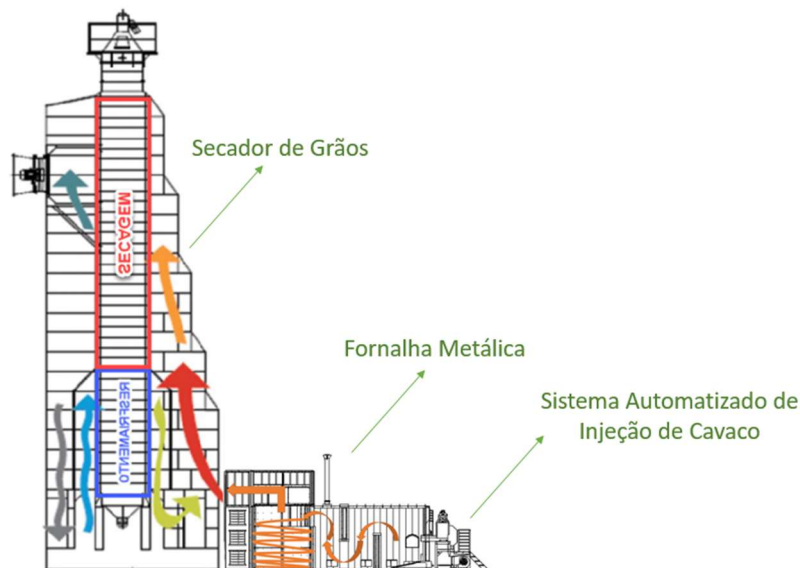




### 2.3 FUNCIONAMENTO BÁSICO DA FORNALHA ESTUDADA

A fornalha é um componente de um conjunto de unidades geradoras de calor que basicamente convertem energia química em energia térmica, podendo ter variações em seu projeto de acordo com o combustível empregado em seu processo (BAZZO, 1995 p.11). A Fig. 1 mostra como a fornalha estudada segue os princípios de Bazzo para secagem de grãos:

Figura 1 - Caminho desempenhado pelo ar quente no decorrer da estrutura de secagem.

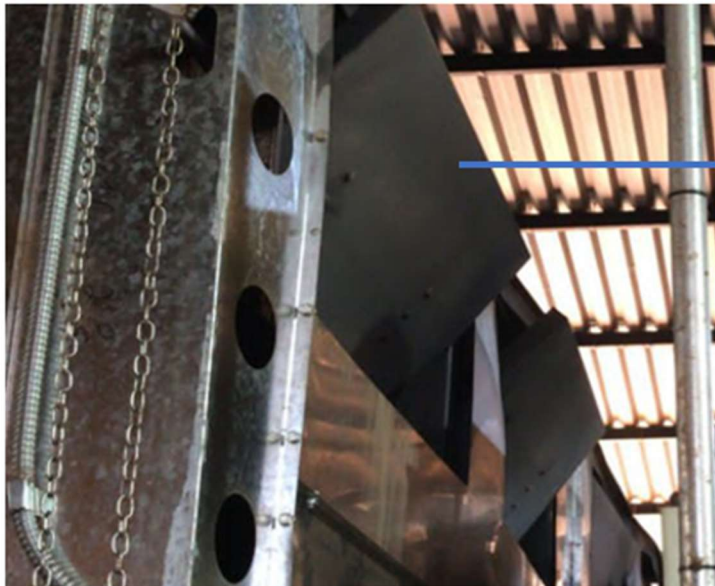


Fonte: Do Autor (2023)

Uma fornalha que utiliza tecnologia de queima em grelhas precisa basicamente de um sistema de alimentação de combustível, que neste caso são automatizadores que adicionam mecanicamente o material para combustão na área de queima, um conjunto de grelhas para que o combustível seja depositado conforme as necessidades do projeto e um processo de *OFA (Overfire Air)*, que resumidamente consiste na injeção de ar afim de favorecer a queima do produto; e um método de descarga para as cinzas geradas pela combustão (KITTO *et al.*, 2005).

A Fig. 2 exemplifica o sistema de OFA utilizado no projeto abordado, que basicamente consiste em janelas que, quando abertas, injetam ar frio pela parte superior câmara de combustão.

Figura 2 - Conjunto para injeção de ar acima das grelhas.



Janelas para injeção de  
ar frio acima do  
grelhado

Fonte: Do Autor (2023).

## 2.4 ASPECTOS E VARIÁVEIS QUE SERÃO CONSIDERADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO

Diversas particularidades são observadas quando elaboramos o projeto e dimensionamento do sistema de queima de uma fornalha.

Os principais critérios para a atuação correta do sistema na fornalha são: o volume da câmara de combustão, a área da grelha onde o combustível será queimado e as aberturas de entrada de ar primário e secundário (SILVA, 2008).

A taxa de carregamento é uma variável importante em um equipamento de queima, este aspecto se refere a quantidade e frequência com que o combustível é alimentado no processo de combustão e depende de uma série de fatores, onde é analisado principalmente o tipo de grelha utilizada em projeto, o combustível empregado e a maneira com que os gases são tirados no momento da combustão (Bazzo, 1995 p.17).



## 2.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO COMBUSTÍVEL UTILIZADO

Segundo Bazzo (1995, p.56), a composição química dos combustíveis sólidos e líquidos mais comumente usados para geração de vapor é definida em termos de carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio, nitrogênio, umidade e cinzas. Em condições ideais, a combustão completa desses elementos deve envolver uma quantidade mínima de oxigênio calculado a partir da reação de combustão química.

Desta maneira, a equação que satisfaz a quantidade de massa estequiométrica de oxigênio que deve ser utilizada para queimas cada kg de combustível é dada pela Eq. 6:

$$\dot{m}O_2 = \dot{m}O_2(C) + \dot{m}O_2(H_2) + \dot{m}O_2(S) \quad (6)$$

Partindo do conceito da utilização do oxigênio para queima do combustível, e da mesma forma fazendo os balanços químicos e substituições para as reações químicas do hidrogênio e enxofre, concluímos que para determinarmos a massa estequiométrica de ar utilizada em todo processo de combustão preciso utilizar a Eq.7:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{\dot{m}O_2}{0,2315} \quad (7)$$

Onde:

$\dot{m}_{ar}$  = Massa estequiométrica do ar, kg/kg comb.

Como o combustível utilizado no processo analisado é o cavaco de madeira, a composição química do mesmo é expressada na Tab. 1:

Tabela 1 – Composição Química da Madeira

Elementos Químicos	Porcentagem Presente (%)
<b>Carbono (C)</b>	50,2
<b>Hidrogênio (H)</b>	6,3
<b>Oxigênio (O)</b>	43,1
<b>Enxofre (S)</b>	0,4
<b>Nitrogênio (N)</b>	0,06
<b>Cinza</b>	0,38

Fonte: SILVA (2008).



## 2.6 VALIDAÇÃO DO PROCESSO ATRAVÉS DO MODELAMENTO MATEMÁTICO

### 2.6.1 Cálculo de energia fornecida na fornalha

De acordo com Bazzo (1995), toda análise energética é fundamental para garantir um bom controle do equipamento e um melhor aproveitamento da energia liberada pelo processo de combustão. A equação que determina o calor que realmente está disponível na fornalha levando em conta o Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível é expressada pela Eq. 8:

$$\dot{q}d = \dot{m}cb \cdot PCI \cdot \rho \quad (8)$$

Onde:

$\dot{q}d$  = Energia disponível na fornalha, kcal/h;

$\rho$  = Densidade do combustível, kg/m<sup>3</sup>;

$\dot{m}cb$  = Taxa de carregamento de combustível, m<sup>3</sup>/h.

### 2.6.2 Cálculo de calor real disponível na fornalha

Todo equipamento apresenta perdas em seu funcionamento, para equipamentos de secagem não é diferente. Vários fatores contribuem para que a energia produzida inicialmente pelas reações químicas obtidas através da combustão da biomassa seja perdida em outros pontos do processo, como por exemplo no aquecimento das paredes da fornalha ou na solidificação das cinzas geradas no processo e que não são retiradas durante a operação.

Desta maneira, o calor que realmente é produzido na área de queima e que será entregue ao secador para secagem dos grãos é expressa pela Eq. 9:

$$\dot{q}f = \frac{\dot{q}d}{\left(\frac{\eta}{100}\right)} \quad (9)$$

Onde:

$\eta$  = Rendimento estimado do equipamento, %.

$\dot{q}f$  = Calor real disponível na fornalha, kcal/h.

Salienta-se que este rendimento é obtido, principalmente, de maneira empírica e pode variar para cada fabricante.

### 2.6.3 Cálculo de vazão de ar para secagem

A vazão de ar necessária para que o produto seja secado de forma correta e eficaz é dada a partir da equação apresentada por MILMAN (2002):

$$V = \frac{qd}{0,286 \cdot \Delta t} \quad (10)$$

Onde:

$V$  = Vazão de ar, m<sup>3</sup>/h;

$\Delta t$  = Variação de temperatura em que o ar deve ser aquecido, °C.

### 2.6.4 Cálculo da quantidade de combustível a ser consumido

De acordo com Bazzo (1995), a quantidade de combustível que será consumida deve atender a quantidade de energia a qual a fornalha foi projetada para produzir, sendo assim, o equacionamento que satisfaz tal conceito pode ser ilustrado por:

$$\dot{m}_{cb} = \frac{q_f}{PCI} \quad (11)$$

Onde:

$\dot{m}_{cb}$  = Taxa de combustível consumido, kg/s.

### 2.6.5 Cálculo da área da grelha

O aproveitamento da biomassa empregada na queima é de extrema importância para o processo. Para que haja um bom aproveitamento do combustível é necessário que ele tenha a possibilidade de ficar devidamente distribuído em toda extensão útil da área de queima, BAZZO (1995).

Desta forma, calcula-se a área ideal da grelha utilizando:

$$A_g = \frac{\dot{m}_{cb}}{K} \quad (12)$$

Onde:

$A_g$  = Área da grelha, m<sup>2</sup>;

K = constante que varia de acordo com o tipo de combustível e o carregamento, kg/m<sup>2</sup>.h.

Conforme Weber (2005) a constante K utilizado para o cálculo de área de grelhas é a variação que ocorre de acordo com o combustível empregado. A Tab. 2 mostra os valores para a constante K:

Tabela 2 – Valores para constante K.

Tipo de Grelha	Combustível	Entrada de ar	Carregamento	K (kg/m <sup>2</sup> h)
<b>Grelhas Planas</b>	Lenha	Natural	Manual	80 a 130
		Forçada	Mecânico	150 a 300
	Carvão	Natural	Manual	70 a 150
		Forçada	Mecânico	200 a 300
<b>Grelhas Inclínadas</b>	Biomassa (Cavaco)	Natural	Manual	60 a 120
		Forçada	Mecânico	150 a 250

Fonte: WEBER (2005).

### 2.6.6 Cálculo da quantidade de ar necessário e gases gerados na combustão

O princípio de conservação de massas deve ser aplicado para obtermos a quantidade de ar que o processo de queima necessita (MAGALHÃES, 2007). Tal conservação deve ser atendida com as Eq. 13 e 14:

$$\dot{m}^{ugu} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{gases} - \dot{m}_{cinza} \quad (13)$$

$$\dot{m}_{gases} = 3,667C + 0,77\dot{m}_{ar\ real} + (\alpha - 1)\dot{m}_{ar\ real} \quad (14)$$

Onde:

$\dot{m}^{ugu}$  = massa de ar gerada na queima de combustível, kg/h;

$\dot{m}_{gases}$  = massa dos gases gerados no processo de queima, kg/h;

$\dot{m}_{cinza}$  = massa de cinzas produzida, kg/h;

$\dot{m}_{ar\ real}$  = Quantidade de ar real na combustão, kg/h.

$\dot{m}_{ar}$  = massa de ar comburente, kg/h.

### 2.6.7 Cálculo de excesso de ar

O excesso de ar é considerado um parâmetro de extrema importância para o processo de combustão, pois ele limita as condições de operação da fornalha. Este

valor pode ser manipulado através do balanço mássico teórico e na variação de oxigênio presente no processo de queima do combustível. Portanto, basicamente o teor de oxigênio desejado dita a razão de excesso de ar imposta no sistema, GOMES (2017). A Tab. 3 mostra a porcentagem de ar em excesso de acordo com o combustível empregado na combustão:

Tabela 3 – Valores para Excesso de ar

<b>Combustível</b>	<b>Excesso de ar (%)</b>
<b>Carvão em pó</b>	20 a 25
<b>Lenha</b>	40
<b>Cavaco</b>	40
<b>Serragem</b>	30
<b>Óleo</b>	5
<b>Gás natural</b>	5 a 10

Fonte: MAGALHÃES (2007).

Por fim, tem-se que o excesso de ar pode ser obtido através das Eq. 15 e

16:

$$\dot{m}_{ar\ real} = \dot{m}_{ar\ total} \cdot \alpha \quad (15)$$

$$\dot{m}_{ar\ total} = \dot{m}_{ar} \cdot \dot{m}_{cb} \quad (16)$$

Onde:

$\alpha$  = Excesso de ar, %.

### 2.6.8 Cálculo de quantidade de cinzas produzida

A utilização do cavaco de madeira como combustível promove a formação de cinzas no decorrer do processo. Esta cinza gerada, se não removida periodicamente do interior da câmara de combustão, provoca a fusão da mesma formando uma fina camada de resíduos solidificados, o que reduz a eficiência do processo e dificulta o funcionamento adequado do equipamento, BAZZO (1995, p. 39). Destaca-se que o principal objetivo deste projeto é a redução destes detritos afim de aprimorar o funcionamento do conjunto.

Para obter-se o valor de cinzas geradas no processo, utiliza-se da Eq. 17:

$$\dot{m}_{cinza} = \dot{m}_{cb} \cdot \frac{\%cinza}{100} \tag{17}$$

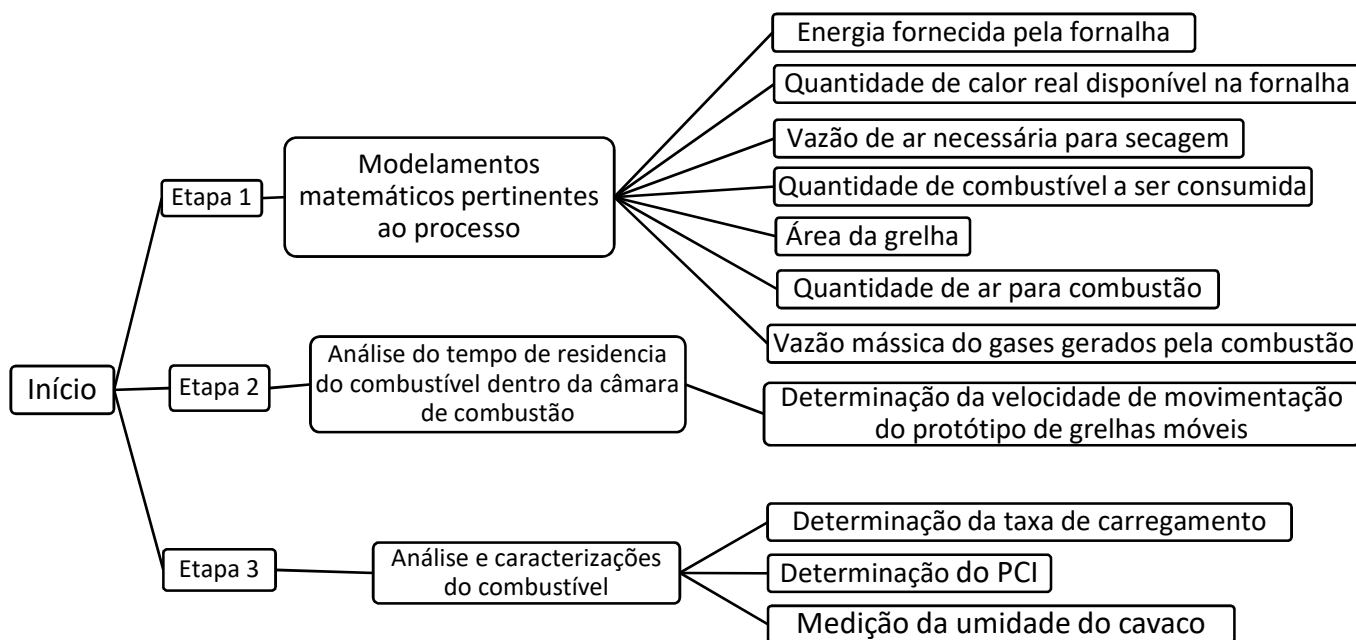
### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresentam-se aqui as atividades e métodos necessários para realização deste estudo. A fim de melhor organizar este trabalho ele foi dividido em três etapas, sendo elas:

- I. Etapa 1: Modelamentos matemáticos pertinentes ao processo;
- II. Etapa 2: Análise do tempo de residência do combustível na câmara de combustão;
- III. Etapa 3: Análise e caracterizações do combustível;

A Fig. 4 mostra o fluxograma geral em que as análises do trabalho serão desenvolvidas.

Figura 4 - Esquema de elaboração do projeto.



Fonte: Do Autor (2023).

A partir dos conceitos de geometria e carregamento ideal de trabalho, um roteiro do processo pode ser traçado, tornando possível a validação do processo e a confirmação de que o equipamento atende todas as solicitações, tanto mecânicas quanto químicas, que a operação exige.

Para que possamos validar o processo existem uma série de procedimentos analíticos que devem ser modelados, dentre eles destacam-se:

1. Energia fornecida na fornalha;
2. Quantidade de calor real disponível na fornalha;
3. Vazão de ar necessário para secagem;
4. Quantidade de combustível a ser consumido;
5. Área da grelha;
6. Quantidade de ar para combustão;
7. Excesso de ar;
8. Quantidade de cinzas;
9. Vazão mássica de gases gerados pela combustão;

Porém antes de qualquer análise matemática, torna-se necessário apontar as principais propriedades do combustível utilizado no processo de queima. Para isso, realizou-se algumas experimentações para caracterizar o combustível.

### 3.1 TEMPO DE PERMANÊNCIA DO COMBUSTÍVEL NA FORNALHA E A TAXA DE CARREGAMENTO

A obtenção do tempo de permanência, para a análise atual do equipamento, foi obtida de maneira empírica através da medição do tempo que o combustível demora para queimar em uma fornalha em operação que utiliza o conceito de grelhas fixas. A partir disso relaciona-se o tempo de residência do cavaco na área de queima com a distância útil que protótipo dispõe para alojamento de cavaco e encontramos a velocidade em que o conjunto deve realizar um ciclo, para isso utiliza-se a velocidade tangencial, pois o sistema é acionado usando relações biela-manivela.

Para obtenção da taxa de carregamento foram realizadas medições do volume de cavaco de madeira que o automatizador injeta para fornalha em função do tempo. A partir destas medições foi traçada a média entre os valores encontrados.

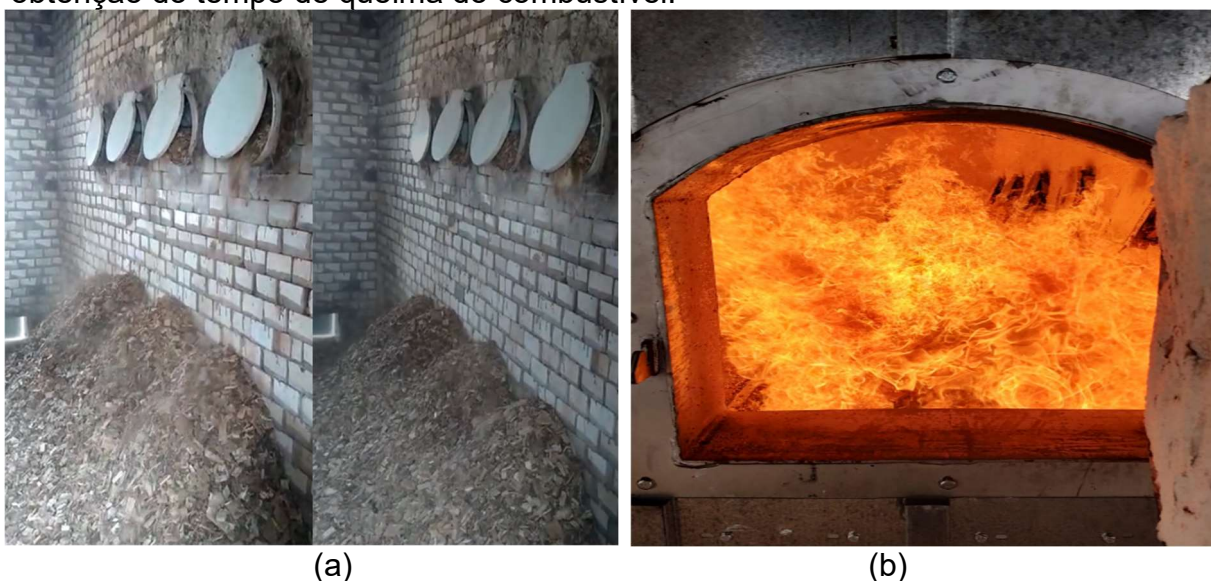
Vale ressaltar que o projeto da empresa, apresenta automatizadores com quantidades diferentes de injetores de cavaco, sendo que esta quantidade varia de acordo com a capacidade de secagem do secador onde a fornalha será adaptada. Neste estudo, foi utilizado um automatizador com quatro injetores, logo o valor obtido

pelo método de medição precisa ser multiplicado por quatro. Para a determinação desta variável foi delimitado uma área onde o cavaco injetado era depositado durante um período de 60 minutos, após este tempo o cálculo para obtenção do volume foi realizado de acordo com área que o cavaco ocupava, ou seja, foram multiplicados a largura e profundidade da área ocupada no chão pela altura da pilha de cavaco gerada.

Todos os resultados obtidos com a experimentação foram considerados com os redutores que acionam a injeção de cavaco trabalhando em uma frequência de 60 Hz, se variarmos este parâmetro a taxa de carregamento sofrerá alteração.

A Fig. 5a mostra a medição da taxa de carregamento e o local onde foram retiradas as medições e amostras de cavaco para taxa de carregamento. Também, a Fig. 5b o tempo de queima de aproximadamente 1,6 m<sup>3</sup> de cavaco em uma fornalha em funcionamento, lembrando que ela utiliza o sistema atual de grelhas fixas.

Figura 5: (a) Medição da taxa de carregamento. (b) Queima de cavaco para obtenção do tempo de queima do combustível.



Fonte: Do Autor (2023).

### 3.1.1 Cálculo de velocidade tangencial para movimentação do conjunto

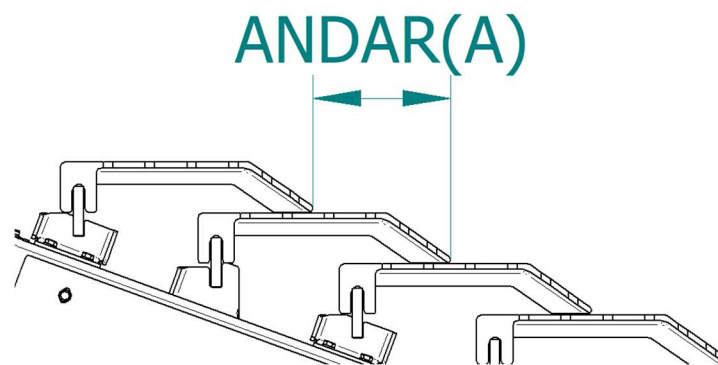
Este modelamento está diretamente interligado ao tempo com que o combustível ficará disponível dentro da câmara de combustão para o processo de queima. Um combustível que permanece por pouco tempo presente no processo de combustão não é totalmente queimado e, em contrapartida, não fornece toda energia



que possui; já uma matéria prima que permanece tempo demais no processo de queima poderá ocasionar perda de eficiência na queima, pois ocorre a solidificação das cinzas como já mencionado anteriormente.

Como o projeto será modelado de maneira que cada ciclo do motor elétrico empurre o cavaco de madeira para a grelha abaixo da anterior, basta definir o tempo em que o cavaco ficará em cada “andar de grelhas” e posteriormente dividir um minuto pelo valor obtido. A Fig. 3 ilustra o que são os andares mencionados.

Figura 3 – Representação do conceito de andares de grelhas utilizado para cálculo.



Fonte: Do Autor (2023).

A Eq. 18 expressa o raciocínio anterior:

$$w = \left[ \frac{60}{\left(\frac{t}{A}\right)} \right] \quad (18)$$

Onde:

w = velocidade de rotação do motor, RPM;

t = tempo de permanência do combustível na câmara de combustão, s;

A = quantidade de andares de grelha disponíveis no conjunto.

### 3.2 DETERMNAÇÃO DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI)

O poder calorífico inferior foi obtido através de análises feitas pela empresa DATA4CROPS® em São Paulo que seguiram procedimentos descritos da norma ASTM E 711 (ASTM, 2004).

### 3.3 MEDIÇÃO DA UMIDADE DO COMBUSTÍVEL

A umidade do cavaco foi adquirida através de um equipamento chamado medidor de umidade para materiais granulados que apresenta o valor da umidade da

biomassa de maneira a bombardear o cavaco que está em seu interior com micro-ondas, já que ela é sensível as moléculas de água. A Fig. 6 mostra o equipamento para medição do cavaco utilizado para combustão:

Figura 6 - Medição da umidade do cavaco através de equipamento.



Fonte: Do Autor (2023).

A partir da medição desta umidade, garante-se que o lote de cavaco está apto a ser introduzido no processo de combustão sem que comprometa a eficiência do equipamento.

### 3.4 DESENVOLVIMENTO DOS EQUACIONAMENTOS ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE COMBUSTÃO

Para efeito de cálculo algumas variáveis devem ser definidas antes do modelamento matemático (dados de entrada), sendo elas:

- Temperatura ambiente (referência) e do combustível: 25 °C;
- Temperatura na câmara de combustão e de secagem dos grãos: 600 °C e 110 °C;
- Teor de cinzas: 1 % (Dado Empírico);
- Rendimento estimado do processo de queima e ar em excesso: 85 % e  $\alpha = 40$  %;
- Constante K: 250 kg/m<sup>2</sup>h (Tab. 3);
- Densidade do combustível: 320 kg/m<sup>3</sup>;
- Extensão total do grelhado onde o cavaco percorrerá = 1,8 m;
- Raio da biela (acionamento) = 0,06 m.

Com base nos dados de entrada acima, e por meio das Equações de 6 até 18, o modelamento matemático foi desenvolvido.

As Equações 6 e 7 foram utilizadas para determinar a quantidade de ar necessária para combustão completa, as Equações 8, 9 e 10 foram desenvolvidas a fim de mostrar os potenciais energéticos e dinâmicos do equipamento. O modelamento realizado que utiliza as Equações 11 até a 17 são referentes ao desempenho do cavaco de madeira como combustível na combustão em grelha. E por fim, a Equação 18 é utilizada para relacionar o acionamento do equipamento com o tempo de permanência do combustível na câmara de combustão.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos equacionamentos feitos, os comparativos entre os dois processos de queima em grelha e o modelamento do protótipo em *SolidEdge*<sup>®</sup>.

##### 4.1 RESULTADOS DOS EQUACIONAMENTOS PERTINENTES AO PROCESSO DE COMBUSTÃO

As Tab. 4 e 5 ilustram os resultados obtidos nas equações aplicadas para o processo de acordo com a bibliografia apresentada e os resultados alcançados a partir das experimentações. Estes resultados foram utilizados para o modelamento do protótipo de grelhas móveis e para o comparativo entre os conceitos de queima em grelha, além de mostrar a situação real da fornalha que utiliza o conceito de grelhas fixas em relação ao rendimento do processo.

Tabela 4 – Resultados dos equacionamentos matemáticos.

<b>Energia fornecida pela fornalha (<math>\dot{q}_d</math>)</b>	6963200	kcal/h
<b>Energia real fornecida pela fornalha (<math>\dot{q}_f</math>)</b>	5918720	kcal/h
<b>Vazão de ar para secagem (<math>v</math>)</b>	286433,5664	m <sup>3</sup> /h
<b>Taxa de consumo de combustível (<math>m\dot{c}b</math>)</b>	2,38	kg/s
<b>Área do grelhado calculado (<math>A_g</math>)</b>	5,8026	m <sup>2</sup>
<b>Quantidade de cinzas produzida (<math>m_{cinza}</math>)</b>	0,0238	Kg/s
<b>Quantidade de ar necessário para combustão (<math>m_{ugu}</math>)</b>	22729,02	Kg/h

Fonte: Do Autor (2023).

Tabela 5 – Resultados das experimentações feitas em campo.

<b>Área do grelhado atual</b>	4,6256	m <sup>2</sup>
<b>Poder Calorífico Inferior (PCI)</b>	3400	kJ/kg
<b>Umidade do combustível</b>	37,4	%
<b>Taxa de carregamento com motores a 60Hz</b>	1,6	m <sup>3</sup> /h
<b>Tempo de permanência do cavaco na área de queima</b>	7	min
<b>Velocidade de movimentação da grelha móvel</b>	1,1428	RPM

Fonte: Do Autor (2023).

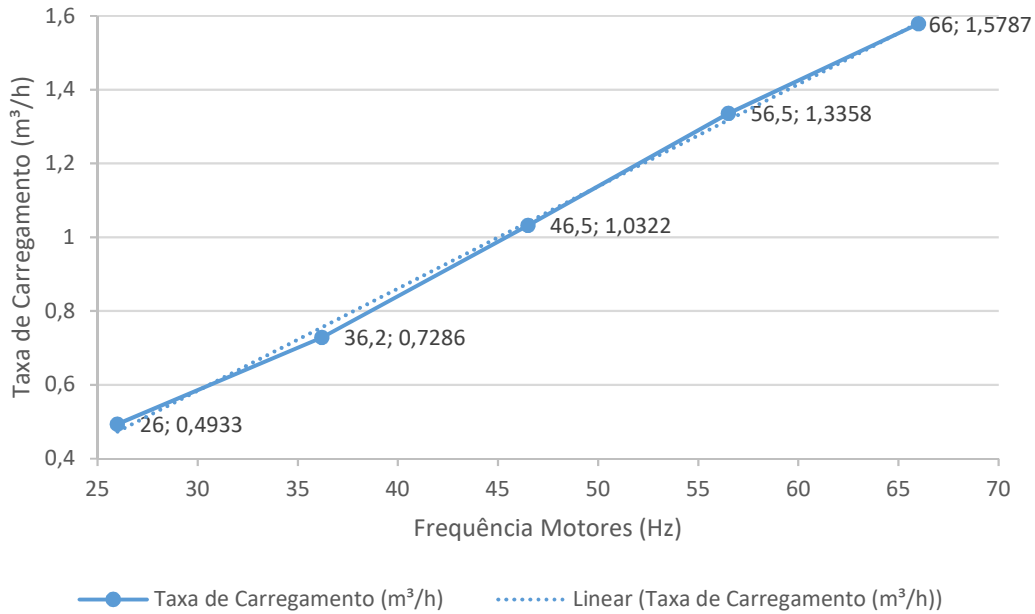
Além dos resultados dos modelamentos matemáticos, são apresentados na Tab. 4 as variáveis do processo obtidas através de experimentações, como por exemplo a taxa de carregamento do combustível, o tempo de permanência do cavaco na câmara de combustão e a umidade real do combustível.

Salienta-se a variação entre o resultado do cálculo da área ideal da grelha e a área atual que a fornalha possui. Segundo Bazzo (1995) esta diferença gera impactos diretos ao rendimento final do processo de combustão, pois o cavaco não tem área ideal para ocupar dentro da câmara de combustão.

#### 4.2 VARIACÃO DA TAXA DE CARREGAMENTO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DOS MOTORES

A Fig. 7 ilustra a variação da taxa de carregamento de acordo com as frequências em que os motores responsáveis pela injeção de cavaco na câmara de combustão trabalham:

Figura 7 - Gráfico da taxa de carregamento em função da frequência de trabalho dos motores que injetam o cavaco na área de queima.



Fonte: Do Autor (2023).

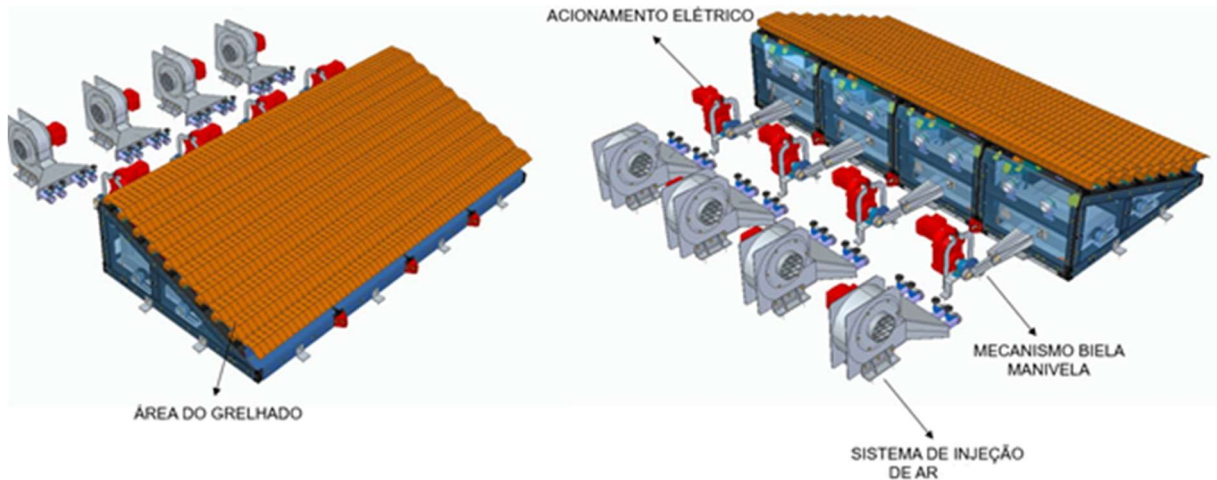
Pode-se avaliar que a taxa de carregamento apresenta uma linearidade diretamente proporcional a frequência que os motores atuam, já que o gráfico traçado pelo experimento desempenha um comportamento linear crescente.

#### 4.3 MODELAMENTO EM SOFTWARE SOLIDEDGE®.

Uma vez que todo processo foi representado através dos equacionamentos, um protótipo do conjunto foi modelado utilizando o software *SolidEdge*® e recomendado para implantação ao portfólio da empresa.

O movimento de vaivém será acionado de forma elétrica, já que a maioria dos fabricantes de grelhas móveis no mercado oferece este acionamento de forma hidráulica; a principal vantagem deste movimento ser acionado eletricamente é o operador ter o total controle de velocidades em que a grelha oscila e nos momentos em que a mesma iria ficar estática. A Fig. 8 mostra o protótipo modelamento e os componentes de seu acionamento:

Figura 8 – Modelamento do protótipo utilizando software CAD 3D.



Fonte: Do Autor (2023).

Ressalta-se que o projeto sugerido é construído de maneira modular, sendo possível aplica-lo em qualquer modelo de fornalhas fabricada pela empresa, já que a principal variação de projetos é o número de injetores de cavaco que a fornalha necessita. Como já mencionado, o projeto alvo de estudos é uma fornalha com quatro injetores.

A ideia inicial deste projeto seria concluir a montagem do protótipo em parceria com a empresa, porém não foi possível realizar a construção em tempo hábil.

#### 4.3.1 Sistema Biela Manivela

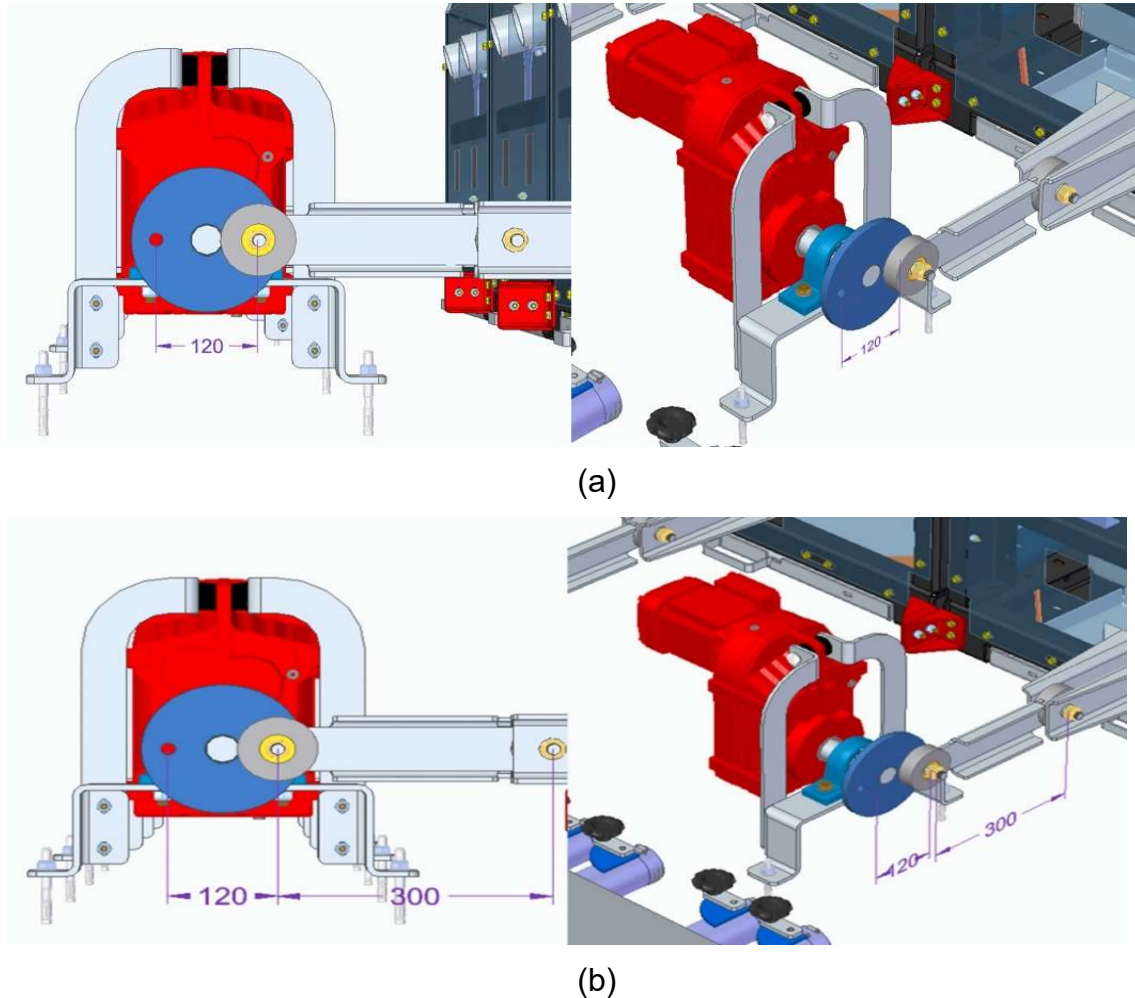
Um sistema biela manivela é um mecanismo onde o movimento circular é convertido em um movimento de translação, muito utilizado na indústria automotiva (SEW EURODRIVE BRASIL LTDA., 2007).

Levando em consideração o manual de seleção de acionamentos da SEW EURODRIVE (2007), para utilização deste conceito no conjunto modelado, alguns fatores foram analisados, como por exemplo:

1. O curso de trabalho do conjunto é de 120 mm, devido ao espaço disponível dentro da câmara de combustão. A Fig. 10a ilustra o curso total que o projeto poderá se deslocar;
2. A relação de comprimentos entre o braço de biela e o braço manivela deve sempre ficar entre 0,2 e 0,4 para que desta forma todo mecanismo atue de forma harmônica. A Fig. 10b mostra tal relação sendo aplicada ao acionamento do conjunto:



Figura 10 – (a) Sistema Biela-Manivela: Curso Total. (b) Acionamento do Conjunto Biela-Manivela.



Fonte: Do Autor (2023).

Desta forma:

$$\text{Relação biela manivela} = \frac{120}{300}$$

$$\text{Relação biela manivela} = 0,4$$

#### 4.3.2 Custos para fabricação do protótipo

Para fabricação do protótipo modelado, foram feitos orçamentos com empresas da região que atuam no ramo de conformação mecânica, fundição e fornecimento de elementos fixadores e acionamentos elétricos. Apresenta-se os seguintes custos para fabricação através da Tab. 6:



Tabela 6 – Custos para fabricação do protótipo.

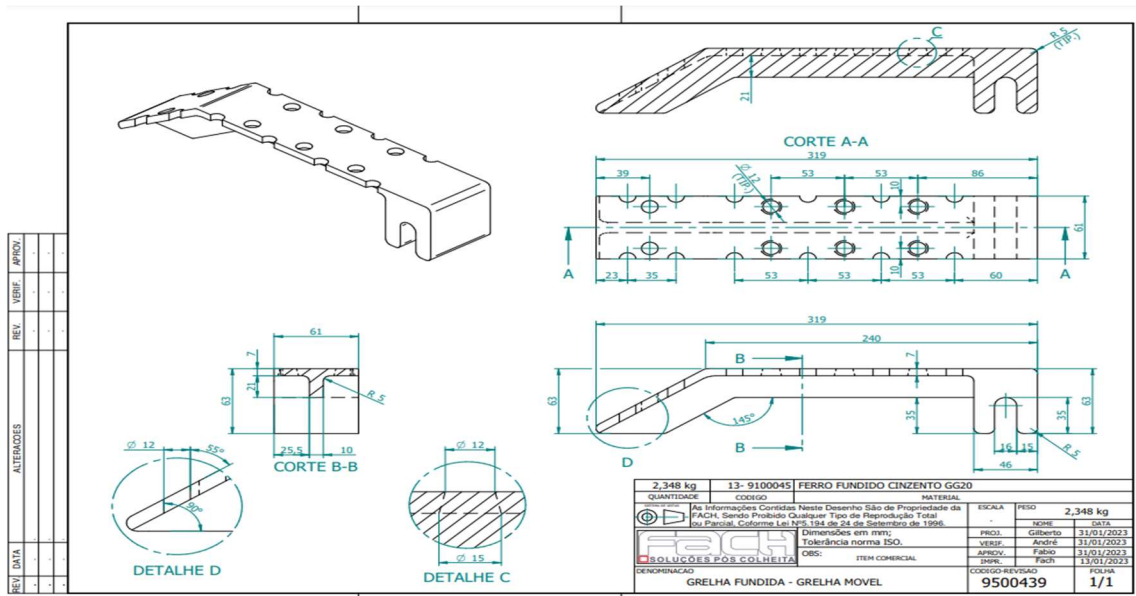
<b>Itens comerciais para fixação e acionamentos</b>	R\$ 9.326,90
<b>Chapas conformadas</b>	R\$ 16.590,63
<b>Fundição das grelhas + molde</b>	R\$ 15.552,00

Fonte: Do Autor (2023).

O custo total de materiais para construção deste protótipo para um equipamento de quatro injetores seria de R\$ 41.469,53.

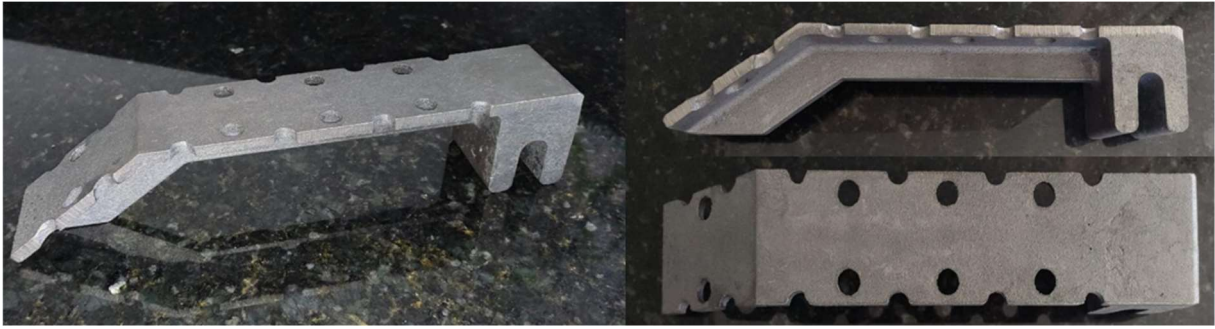
As grelhas foram desenvolvidas com o intuito de possibilitar a injeção de ar (OFA) e ao mesmo tempo garantir o menor custo de fabricação. A peça foi modelada utilizando como material para fundição o Ferro Fundido Cinzento GG20 e passou por inúmeras revisões até obter um *design* que garantisse o funcionamento dinâmico ao acionar o conjunto e baixo peso para baratear a fabricação. A Fig. 11 mostra o desenho técnico utilizado para fabricação das peças e a Fig. 12 ilustra as peças prontas após o processo de fundição.

Figura 11 – Desenho técnico do modelamento feito dos perfis de grelhas fundidas utilizadas para o conjunto de grelhas móveis.



Fonte: Do Autor (2023).

Figura 12 – Peças finais obtidas através do processo de fundição utilizando o material Ferro Fundido Cinzento GG20.



Fonte: Do Autor (2023).

#### 4.4 COMPARATIVO ENTRE O CONCEITO DE GRELHAS FIXAS E GRELHAS MÓVEIS

A principal vantagem observada na substituição de grelhas fixas por grelhas móveis no projeto é o aproveitamento de toda energia que o combustível tem a oferecer no processo. Pode-se observar isso através de alguns fatores, como por exemplo o controle com as cinzas geradas no processo de combustão, pois ela será retirada do grelhado impossibilitando a sua solidificação e predispondo melhor injeção de ar na queima, maior durabilidade do conjunto e melhor eficiência do processo.

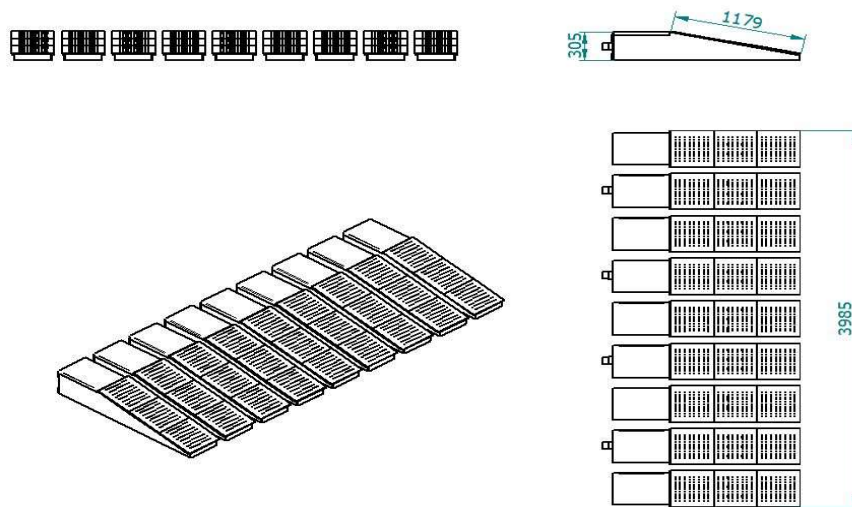
Outro ponto interessante a ser abordado é a quantidade de carbono não queimado presente nas cinzas. Na queima em grelha fixa ocorre um aproveitamento menor do carbono de sua composição em comparação com um combustível utilizado em uma queima em grelhas móveis, já que o combustível transita em toda extensão do grelhado, melhorando a injeção de *OFA* permitindo a homogeneização e promovendo a combustão completa.

A energia gerada em uma fornalha através de um conceito de queima em grelhas móveis também sofre alterações positivas. Isso ocorre devido ao alto índice de aproveitamento de cavaco, a aceitação de combustíveis com teores elevados de umidades já que, como o conjunto dispõe de um acionamento elétrico, pode ter sua velocidade de trabalho alterada conforme a necessidade do processo, e possui operação contínua.

Vale ressaltar que o controle da frequência com que o conjunto de grelhas realizam o movimento de vaivém otimiza o processo, porém deve ser utilizado com cautela já que tal velocidade de acionamento influencia diretamente na combustão do combustível, conforme já mencionado na subseção 3.1.

Observando o projeto proposto em relação ao conjunto que está em vigor atualmente, nota-se que a principal discrepância está na área disponível de grelhas. Como já ilustrado, o projeto atual possui 4,62 m<sup>2</sup> para que o cavaco possa ser depositado durante a combustão, enquanto a área ideal calculada pela Eq.12 é de 5,80 m<sup>2</sup>. A Fig.13 e 14 ilustram as diferenças entre as dimensões:

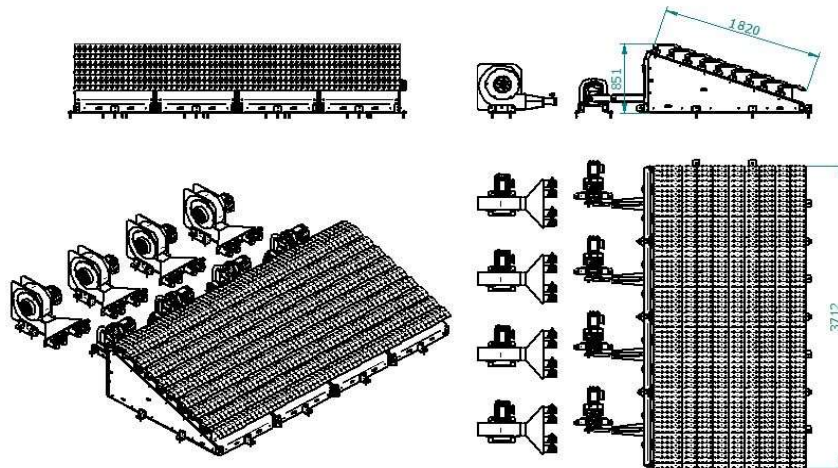
Figura 13 – Dimensões do projeto de grelhas fixas utilizadas em uma fornalha de quatro injetores.



Fonte: Do Autor (2023)

Calculando a área deste conjunto obtém-se o valor de 4,62m<sup>2</sup> apresentado anteriormente.

Figura 14 – Dimensões do projeto de grelhas móveis proposto.



Fonte: Do Autor (2023)

Ressalta-se que para o projeto de grelhas móveis propostos foi desenvolvido com a área aproximadamente 16% maior do que o calculado, já que a área de combustão da fornalha possuía mais espaço para alocar o grelhado e dessa forma criando maior segurança para os cálculos desenvolvidos. A área final do grelhado dispõe de 6,75m<sup>2</sup>.

## 5. CONCLUSÃO

- A área da grelha calculada mostrou-se distinta da área real atualmente, tendo em vista que o projeto apresenta uma diferença de 20,28% menor do que o desejado pelo processo. Recomenda-se para empresa que aumente a área útil dos grelhados que utilizam o conceito de grelhas fixas.
- Para a vazão de ar disponível na secagem os resultados obtidos apresentaram-se satisfatórios em comparação com os catálogos dos principais fabricantes de secadores, tendo um desempenho 16,21% maior do que o exigido pelos fabricantes.
- Em relação ao combustível incombusto, o projeto de grelhas móveis diminuirá a produção delas, já que a combustão é favorecida pelo maior aproveitamento da energia que o combustível oferece, além da melhoria da oxigenação feita pelo OFA, já que o cavaco estará sempre em movimento sobre os grelhados.
- O acionamento elétrico desenvolvido no protótipo a ser construído será promissor como uma saída para os modelos existentes no mercado, a principal vantagem é o controle do processo através da variação da rotação do motor, reduzindo perdas de combustível e melhorando o domínio do processo.
- Além da inovação com o acionamento feito de forma elétrica o sistema de biela-manivela modelado em *SolidEdge*® mostrou-se muito eficaz no projeto, pois não necessita de componentes elaborados para sua construção e as manutenções e prevenções mostram-se mais simples e baratas se comparadas com acionamentos hidráulicos. Vale ressaltar que para construção deste acionamento, vários conceitos mecânicos foram respeitados para que a conversão do movimento circular em translação pudesse ocorrer de maneira suave e harmônica.

- O tempo utilizado para modelamento do protótipo foi de 176 horas trabalhadas, sendo elas divididas em 88 horas (50%) para modelamento e construção do protótipo em *SolidEdge*<sup>®</sup>, 44 horas (25%) destinadas aos estudos e validações da construção e funcionamento do projeto proposto, 26,4 horas (15%) utilizadas para análise de custos para fabricação e 17,6 horas (10%) homologando e buscando os principais fornecedores dos componentes utilizados para o projeto.
- De maneira geral, os equacionamentos feitos para o processo de combustão em grelhas fixas mostraram-se próximos ao que ocorre realmente na operação, sendo possível confrontar os resultados através de catálogos utilizados para dimensionamento, porém muitas perdas ocorrem devido ao acúmulo de cinzas provenientes da combustão, o projeto de grelhas móveis proposto eleva esta eficiência pois, como já mencionado, auxilia no processo de combustão.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar o tempo de residência de maneira conceitual utilizando exclusivamente grelhas móveis e listar os principais fatores que impactam na variação deste tempo.
- Análise da redução de custos da utilização do cavaco de madeira em conjuntos de grelhas móveis em comparativo com grelhas fixas.

## 6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E711 -87**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. West Conshohocken: (-), 2004.

BARREIROS, Gabriel Duarte Martins. **Monitorização das condições de operação de uma fornalha industrial a biomassa**. 2015. 84 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2015. Disponível em:  
<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/15493/1/tese.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2022.

BAZZO, Edson. 2. Ed.— **Geração de Vapor**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995. 216p (Didática).

COSTA, Mário. **Biomassa Características e Utilização**. 2005. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica Instituto Superior Técnico, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal, 2005. Disponível em: <file:///C:/Users/Usu%C3%A1rio/Downloads/T%C3%ADtulo.%20BIOMASSA%20Caracter%C3%ADsticas%20e%20Utiliza%C3%A7%C3%A3o.%20M%C3%A1rio%20Costa.pdf>. Acesso em: 23 out. 2022.

GARCIA, Roberto. **Combustíveis e Combustão industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. 358 p.

GOMES, Helena Gil Martins de Faria. **Monitorização das condições de operação de uma fornalha com grelha móvel para combustão de biomassa**. 2017. 82 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2017. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/23341/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2022

KHAN, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J. & Spliethoff, H. 2009. **Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies**. *Fuel Processing Technology* , 90, 21-50.

KITTO, John B. *et al.* **Steam/its generation and use**. 41. ed. Barberton, Ohio, U.s.A: The Babcock & Wilcox Company, 2005. 1106 p. Livro publicado pela empresa fabricante de caldeiras The Babcock & Wilcox Company.. Disponível em: [https://stream2.doceru.com/pdf\\_dummy/eyJpZCI6IjMyNDA5ODciLCJuYW1lIjojU1RFQU0gLSBHZW5lcmF0aW9uIGFuZCBVc2UgLSBCYWJjb2NrlGFuZCBXaWxjb3ggQ28iLCJleHRlbnNpb24iOiJwZGYiLCJjaGVja3N1bV9pZCI6IjExMDAzNzE2In0,?](https://stream2.doceru.com/pdf_dummy/eyJpZCI6IjMyNDA5ODciLCJuYW1lIjojU1RFQU0gLSBHZW5lcmF0aW9uIGFuZCBVc2UgLSBCYWJjb2NrlGFuZCBXaWxjb3ggQ28iLCJleHRlbnNpb24iOiJwZGYiLCJjaGVja3N1bV9pZCI6IjExMDAzNzE2In0,?). Acesso em: 11 jan. 2023.



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 - Minas Gerais, 2007. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/798/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2022.

MILMAN, Mario José. **Equipamentos para Pré-Processamento de Grãos**. Pelotas: Editora Gráfica Universitária da Universidade Federal de Pelotas, 2002. v. 200. 206p.

MELO, Fernanda Augusta de Oliveira; SILVA, Jadir Nogueira da; SILVA, Juarez de Sousa; SAMPAIO, Cristiane Pires; SILVA, Denise de Freitas. **Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar**. Acta Scientiarum. Technology, [S.L.], v. 32, n. 2, p. 129-136, 12 jul. 2010. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i2.1575>.

MENEGHETTI, Luana A. M.; BONFIM-SILVA, Edna M.; SILVA, Tonny J. A. da; DUARTE, Thiago F.; PINHEIRO, Everton A. R.; OLIVEIRA, Jakeline R. de. Biomass and water use efficiency of chrysanthemum under organic, mineral, and organomineral fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campo Grande, p. 505-511, 16 fev. 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n7p505-511>. Acesso em: 25 ago. 2022.

SEW EURODRIVE BRASIL LTDA. (São Paulo) (org.). **Seleção de Acionamentos, Métodos de Cálculo e Exemplos**. 9. ed. Avenida Amâncio Gaiolli, 50, Rodovia Presidente Dutra, Km 208, Guarulhos - 07251 250 - Sp, 2007. 159 p. (1052 3801 / BP).

SILVA, Juarez de Souza e. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2ª Ed. Editora Aprenda Fácil. Viçosa, 2008. v.1. 560p.





WEBER, Érico Aquino. **Excelência Em Beneficiamento E Armazenagem De Grãos.**  
Panambi RS: Ed. Panambi, 2005. 587 p.