



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

KAIQUE CASTRO JEOVÁ BATISTA RIBEIRO

**PROJETO CONCEPTIVO DE UM ALIMENTADOR DE ROSCA SEM-FIM
PARA SUPRIMENTO DE BIOMASSA A UMA CALDEIRA DE LEITO
FLUIDIZADO**

FORTALEZA

2017

KAIQUE CASTRO JEOVÁ BATISTA RIBEIRO

PROJETO CONCEPTIVO DE UM ALIMENTADOR DE ROSCA SEM-FIM PARA
SUPRIMENTO DE BIOMASSA A UMA CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R369p Ribeiro, Kaique Castro Jeová Batista.

Projeto conceutivo de um alimentador de rosca sem-fim para suprimento de biomassa a uma caldeira de leito fluidizado / Kaique Castro Jeová Batista Ribeiro. – 2017.
64 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Arquitetura e Urbanismo, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.

1. Alimentador. 2. Biomassa. 3. Leito fluidizado. 4. Rosca sem-fim. I. Título.

CDD 720

PROJETO CONCEPTIVO DE UM ALIMENTADOR DE ROSCA SEM-FIM PARA
SUPRIMENTO DE BIOMASSA A UMA CALDEIRA DE LEITO FLUIDIZADO

Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica do Departamento de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro
Mecânico.

Aprovada em: 21 / 12 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Soares Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Msc. Eng. Welkson Carneiro de Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mim dar forças para realizar o curso durante esses 5 anos e de nunca ter pensado em desistir.

Aos meus pais, principalmente minha mãe, por minha educação, por ter me apoiado sempre em todas as escolhas que fiz na vida e por sempre me dar apoio quando precisei.

Ao Prof. Dr. William Magalhães Barcellos, pela excelente orientação, pelo apoio nas decisões, as quais não seria possível a realização deste trabalho, por sua contribuição no meu crescimento pessoal e profissional como engenheiro mecânico.

Ao Eng. João Diego Moreira Feitosa, pelo total apoio, paciência e por todo o conhecimento a mim passado no trabalho, como também ter sido meu coorientador não oficial.

Aos meus companheiros de laboratório, Tiago de Siqueira Pires, Fernanda Emanuelle Possidônio Cardoso, Marco Cavalcante D'Amico, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho como pela amizade criada entre nós.

Aos meus amigos, por momentos de alegria e aprendizado durante minha formação como profissional e pessoal.

“ O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano. Mas o que seria o oceano se não infinitas gotas? ”

(Isaac Newton)

RESUMO

O lodo é um dos principais subprodutos do processo de tratamento das águas residuárias em reatores biológicos anaeróbios, para o qual ainda não estão bem desenvolvidas as metodologias de aproveitamento do seu potencial energético. Quando não aproveitado através de reciclagem para produção de fertilizante, seu descarte tem sido feito por despejo em aterro sanitário e em recursos hídricos (rios, lagos e mar) ou é incinerado (combustão). Dentre essas formas de descarte, a incineração apresenta algumas vantagens em relações às outras alternativas de tratamento. Neste contexto, uma proposta de destinação racional para o lodo é sua queima em uma caldeira que utiliza tecnologia de combustão em leito fluidizado, sendo que o presente trabalho de conclusão de curso vem compor essa proposta com o projeto do alimentador de biomassa de rosca sem-fim. O projeto conceutivo feito com vistas na capacidade de utilizar o lodo como biomassa, por essa razão decidiu-se pela opção de empregar um sistema de alimentação com rosca helicoidal. Entretanto, o mesmo possui alguns problemas associados à operação, tais como: a dificuldade de se ter uma vazão de combustível constante e mantê-la a longo prazo, a compactação da matéria sólida, a incerteza do seu escoamento dentro do silo, dentre outras variáveis de projeto. Por essa razão, fez-se necessário um estudo detalhado do sistema de alimentação de reatores de leito fluidizado que utilizem o lodo de esgoto como combustível. Objetivamente, para o dimensionamento desse tipo de alimentador, bem como para especificar seus parâmetros de projeto, foi necessário focar na biomassa constituída de lodo seco com insumo de alimentação para reator de leito fluidizado, em escala de laboratório, porém com vistas no projeto básico de um alimentador em escala real, que será utilizado na caldeira para uma estação de tratamento de esgoto em Quixadá-CE. Essa caldeira com queimador de leito fluidizado está sendo projetada pelo Laboratório de Combustão de Energias Renováveis, sob suporte financeiro da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econ. Através de um estudo detalhado da bibliografia especializada nessa área, foram obtidos os parâmetros que auxiliaram no dimensionamento dos componentes mecânicos, e realizado, assim, os desenhos de projeto básico e construtivo, a partir dos quais foi possível fabricar um protótipo de alimentador de rosca sem-fim.

Palavra-chave: Alimentador. Biomassa. Leito fluidizado. Rosca sem-fim

ABSTRACT

Sludge is one of the main by-products of the wastewater treatment process in anaerobic biological reactors, for which the methodologies for exploiting its energy potential are not yet well developed. When not recycled for fertilizer production, it has been disposed of by landfill and water resources (rivers, lakes and sea) or incinerated (combustion). Among these forms of disposal, incineration has some advantages in relation to other treatment alternatives. In this context, a rational proposal for the disposal of sludge is its burning in a boiler that uses fluidized bed combustion technology, and the present work of course completion is part of this proposal with the design of the threaded biomass feeder without -end. The design was conceived with a view to the ability to use a wide variety of solid fuels, so it was decided to use a helical thread feeding system. However, it has some problems associated with the operation, such as: the difficulty of having a constant fuel flow, compaction of the solid matter, uncertainty of the flow inside the silo, among other design variables. For this reason, a detailed study of the fluidized bed reactor feed system using sewage sludge as fuel was necessary. Objectively, it was necessary to focus on biomass composed of dry sludge with feedstock for fluidized bed reactor, in laboratory scale, but with a view to the basic design of a full scale feeder that will be used in the boiler for a sewage treatment plant in Quixadá-CE. This fluidized bed burner boiler is being designed by the Renewable Energy Combustion Laboratory, under financial support from the Ceará Water and Sewage Company (CAGECE) and the National Development Bank. Through a detailed study of the specialized bibliography in this area, the parameters that aid in the dimensioning of the mechanical components were obtained, and the basic and constructive design drawings were obtained, from which it was possible to fabricate a prototype of screw feeder without -end.

Keywords: Feeder. Biomass. Fluidized bed. Worm thread

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Caldeira de leito luidizado borbulhante, com recirculação de combustível	6
Figura 2 – A biomassa é medida por um parafuso é alimentado no forno através de uma calha de gravidade que alimenta a biomassa no topo do leito.....	9
Figura 3 – Espalhadores de biomassa	10
Figura 4 – Exemplos de variação de passo ou o diâmetro do parafuso	12
Figura 5 – Tipos de obstruções	14
Figura 6 – Tipos de escoamento em silos	16
Figura 7 – Determinação gráfica para o tipo de fluxo	16
Figura 8 - Aparelho de cisalhamento direto de Jenike.....	20
Figura 9 – Função $H(\alpha)$ para; 1- abertura circular, 2 – abertura quadrada, 3 – abertura retangular.....	22
Figura 10 - Design do parafuso de passo ou contínuo.....	23
Figura 11 – Formatos de rosca helicoidais	24
Figura 12 - (a) Demanda concentrada, (b) Demanda distribuída.....	26
Figura 13 – Caldeira de leito fluidizado	28
Figura 14 – Esboço inicial do alimentador.....	29
Figura 15 – Esboço do parafuso de rosca sem-fim.....	30
Figura 16 – Vista cortada da parte intermediária da caldeira com o concreto refratário.....	31
Figura 17 – Vista de corte da camisa de sacrifício.....	31
Figura 18 – Imagem 3D alimentador completo.....	32
Figura 19 – Vista inferior do silo.....	33
Figura 20 – Vista lateral do silo.....	33
Figura 21 – Vista da secção A-A da Figura 18.	34
Figura 22 – Detalhes E e D da Figura 20.....	34
Figura 23 – Vista cortada da camisa de sacrifício.....	35
Figura 24 - Desenho do parafuso (rosca sem-fim)	36
Figura 25 - Caldeira montado com o alimentador.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Vazão do alimentador variando pela rotação do parafuso.	37
Gráfico 2 – Variação da potência variando a vazão.	38
Gráfico 3 – Rotação por vazão com várias curvas de diâmetro de parafuso diferentes.	39
Gráfico 4 – Variação da potência com a variação da rotação em diversos diâmetros de parafuso.	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos graneis de acordo com o tamanho da partícula	8
Tabela 2 – Análise aproximada do teor de umidade e sólidos totais (cinzas e sólidos voláteis)	18
Tabela 3 - Fator de correção para volume ocupado pelo material na hélice.....	25
Tabela 4 – Dados utilizados para a determinação dos parâmetros de funcionamento.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento

CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará

CLF – Combustão em Leito Fluidizado

LACER – Laboratório de Combustão e Energias Renováveis

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

LISTA DE SÍMBOLOS

- α – Ângulo da parede da tremonha com a vertical
- ϕ_e – Efetivo ângulo de atrito interno do material
- ϕ_s – Ângulo de atrito do material com a parede
- ϕ – Ângulo de atrito interno
- FF – Função Fluxo
- ff – Fator fluxo da tremonha
- ν – Ângulo formado entre a tangente do arco de tensão na parede da tremonha e a normal a parede
- X – Constante utilizada nas equações (2) e (3)
- Y – Constante utilizada nas equações (2) e (3)
- m – Constante utilizada nas equações (2) e (3)
- B – Abertura de saída do silo
- H – Constante utilizada na equação (5)
- g – Aceleração da gravidade local
- σ_1 – Tensão principal de consolidação
- ρ – Densidade aparente
- ψ – Fator de correção para volume ocupado pelo material na hélice (Tabela 2).
- γ – Densidade específica.
- P – Passo da rosca sem-fim.
- n – Velocidade da rosca.
- C – Fator de correção do ângulo de inclinação do alimentador
- A – Constante utilizada nas equações (7); (8) e (9)
- d – Diâmetro do eixo
- W_t – A vazão de material teoricamente transportado
- η – Eficiência de transporte
- W_r – Vazão de material transportado
- Q – Vazão de saída do alimentador
- w_0 – Fator de resistência
- N_0 – Potência necessária
- L – Comprimento da rosca sem-fim
- T_0 – Torque para eixos de parafusos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1	Fundamentos sobre combustão em leito fluidizado (CLF).	5
3.2	Biomassa solida.	7
3.3	ELEMENTOS DE PROJETO.	8
3.3.1	<i>Tipos de alimentadores.</i>	8
3.3.2	<i>Transportadores de parafuso</i>	11
3.3.3	<i>Silos</i>	13
3.4	Escoamento de sólidos granulares	15
4	METODOLOGIA	18
4.1	Levantamento de propriedades físico químicas do lodo.	18
4.2	Dimensionamento do silo	20
4.3	Dimensionamento da rosca helicoidal	22
4.4	Parâmetros de funcionamento	26
5	RESULTADOS E DISCURSÃO	28
5.1	Projeto Básico (Protótipo de laboratório)	28
5.2	Projeto construtivo do alimentador (Protótipo de laboratório)	32
5.3	Parâmetros de funcionamento do alimentador.	37
5.4	Projeto Básico do alimentador (Escala de campo)	38
6	CONCLUSÕES	41
	BIBLIOGRAFIA	42
	ANEXOS	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 50 até os dias atuais, não têm havido investimentos expressivos em saneamento básico no Brasil, como se esperava, exceto no período de 2005 a 2015 quando o Governo Federal direcionou recursos para os estados, inclusive com ajuda fiscal, para que organizassem suas gestões em torno da aplicação de políticas públicas para tratamento dos resíduos sólidos e líquidos urbanos. Entretanto, o déficit é tão elevado que ainda se mantêm os problemas crônicos nessa área, sem uma perspectiva de solução a curto prazo. Por essa razão, o Brasil ainda está marcado por uma grande desigualdade e pela dificuldade de acesso a esses serviços, principalmente em relação à coleta e tratamento de esgoto. Todavia, faz-se necessário que os investimentos sejam em novas tecnologias sustentáveis. (LEONETI, 2011).

Por outro lado, o tratamento do esgoto, tecnicamente conhecido como “águas residuárias” em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), utilizando reatores biológicos anaeróbios para digestão e degradação da matéria orgânica contida nessa solução aquosa rica em biomassa, resulta na geração de subprodutos, o lodo e o biogás, além de um efluente líquido apropriado a um pós-tratamento para destinação como água de reuso. Neste contexto, o lodo do esgoto é um dos principais elementos do saneamento, que não tem recebido a devida atenção porque ainda se tem pouca visão quanto às metodologias de aproveitamento.

Em princípio, considera-se que o descarte de lodo é classificado pelo tipo gerenciamento de cada planta de tratamento de esgoto, a qual determina uma solução e um local ideal para sua eliminação. Atualmente, a destinação do lodo que existem são; reciclagem como fertilizante, aterro, despejo no mar e incineração (combustão). (WERTHER, 1999).

Dentre essas formas de descarte, a incineração possui várias vantagens que não são encontradas em outras alternativas de tratamento, incluindo uma grande redução do volume de lodo para uma pequena cinza estabilizada, que representa apenas 10% do volume de lamas mecanicamente descartadas e destruição de constituintes orgânicos tóxicos. (VESILIND, 1996).

Pelo fato desses problemas estarem sempre latentes, a equipe de pesquisadores do Laboratório de Combustão de Energias Renováveis (LACER), do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da UFC, passou a buscar uma solução econômica e ambientalmente viável para o “descarte” do lodo. Neste sentido, criou-se um projeto integrado de aproveitamento das águas residuárias para geração de energia e calor, a partir de uma usina termoelétrica de microgeração, onde a participação do lodo passa a ter importância enquanto

insumo energético, com conteúdo calorífico significativo para contribuir nesse sistema de geração.

Assim, o LACER em parceria com a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), com suporte financeiro do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e contrapartida da própria parceira, uniram-se para a realização deste Projeto, que pode ser considerado como uma tecnologia inovadora, em termos de tecnologias apropriadas ao saneamento. Especialmente, o lodo, o qual é um subproduto destas estações de tratamento, as quais enfrentam certa dificuldade em buscar uma solução prática aplicável, principalmente porque há pouquíssima literatura sobre tecnologias apropriadas ao seu aproveitamento.

Neste contexto, os pesquisadores do LACER decidiram utilizar esse lodo, na condição de biomassa seca, para alimentar a caldeira de leito fluidizado, outrora desenvolvida no LACER, que opera com um leito poroso formado por sílica, onde ocorre a combustão. Essa caldeira tem a capacidade de utilizar uma vasta variedade de combustíveis sólidos, inclusive os de baixo poder calorífico. Além disso, essa tecnologia se mostra vantajosa em relação as caldeiras convencionais pelo fato de possibilitar emissões reduzidas de poluentes agressivos ao meio ambiente. (FEITOSA, 2015).

Entre outras vantagens da caldeira de leito fluidizado está a elevada eficiência de combustão devido à existência de fenômenos que ocorrem no meio poroso, que proporciona uniformidade da temperatura na zona de reação. Além disso, reduzem-se as perdas de calor do processo, que normalmente ocorreriam através dos gases de exaustão. Outra vantagem da tecnologia de combustão em leito fluidizado reside nas baixas emissões de NO_x em comparação aos métodos convencionais de combustão. (FEITOSA, 2015).

Todavia, tem-se que a funcionalidade de uma caldeira de leito fluidizado é limitada pelo seu sistema de alimentação de combustível. Vários fatores que podem ocorrer no sistema de alimentação podem interromper a operação da caldeira. Este sistema é vulnerável, especialmente para a biomassa.

Uma das características atraentes de uma caldeira de leito fluidizado, é tolerar até vários minutos de interrupção em seu fluxo de combustível. Esta é uma melhoria significativa em relação a uma caldeira de carvão pulverizado, que não pode tolerar uma interrupção de combustível com mais de alguns segundos de duração.

Além do problema de interrupção na operação, há a questão do desempenho da caldeira. Um bom *design* do sistema de alimentação de combustível, é essencial para o bom funcionamento de uma caldeira de leito fluidizado. (BASU, 2006).

Basicamente existem 4 tipos fundamentais de sistemas de alimentação de combustível a serem utilizados em reatores de leito fluidizado (BASU, 2006). Entre eles, o sistema de rosca-sem-fim e o mais comumente utilizado nas instalações de caldeira em leito fluidizado, mesmo quando combinado com outros sistemas, por exemplo, o sistema pneumático.

O alimentador do tipo rosca-sem-fim é o mais indicado por sua simplicidade de construção, operação, manutenção e baixo custo. Assim este trabalho tem como objetivo principal concepção para um sistema de alimentador helicoidal de biomassa (lodo) para uma caldeira de leito fluidizado, a qual está sendo projetada para uma estação de tratamento de esgoto na cidade de Quixadá-CE.

Nesse contexto, faz-se necessário um estudo mais detalhado do sistema de alimentação de reatores de leito fluidizado que utilizem o lodo de esgoto como combustível. Almejando obter ferramentas adequadas para o dimensionamento desse tipo de alimentador, bem como especificar seus parâmetros de projeto, o presente trabalho tem por objetivo projetar um alimentador de biomassa para um reator de leito fluidizado.

Através de um estudo detalhado da bibliografia especializada, foram obtidos os parâmetros de dimensionamento (comprimento, alturas, diâmetros, espessuras de chapa, potência, torque, passo) como o material utilizado (aço ABNT 1020, por ser de baixo custo e o fato de que o protótipo testará futuramente só as condições de funcionamento), sendo realizados, assim, desenhos de projeto básico e construtivo, a partir dos quais será possível fabricar um protótipo de alimentador de rosca sem-fim.

2 OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho é a realização de dois projetos básicos: um é o alimentador de biomassa que será montado no protótipo de laboratório, ou seja, o alimentador para testes no LACER; e o outro é o alimentador que comporá o protótipo da caldeira que será instalada na Estação de Tratamento de Esgoto da CAGECE na cidade de Quixadá-CE, que tem o nome de ETE Herval. É também escopo desse trabalho o desenvolvimento de um projeto construtivo do alimentador de protótipo pronto para sua fabricação.

Destacam-se como objetivos específicos do trabalho, as seguintes ações:

- Estudos das metodologias de cálculo existentes para projeto;
- Identificar a metodologia de cálculo adequada;
- Levantamento dos principais elementos do projeto de transporte helicoidal;
- Identificar por meio de cálculos a capacidade de transporte do sistema.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Fundamentos sobre combustão em leito fluidizado (CLF).

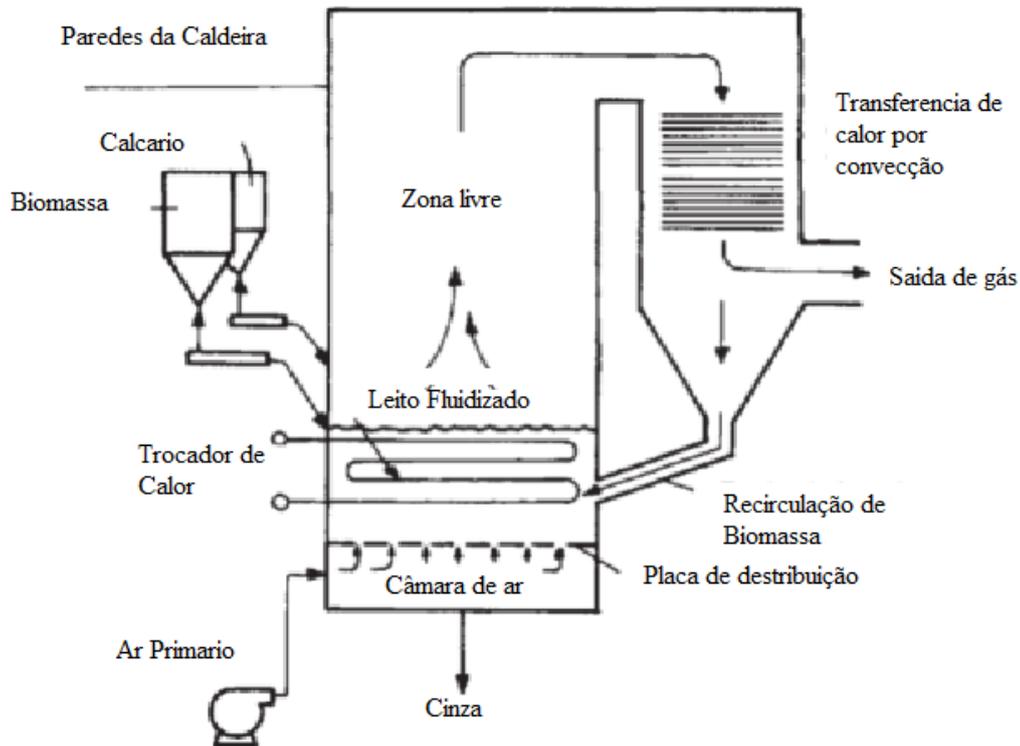
O principal objetivo no desenvolvimento da tecnologia caldeiras de leito fluidizado é permitir a utilização biomassa com alto teor de enxofre, pois cumpre rígidas regulamentações de proteção ambiental. Pelo motivo das tecnologias convencionais da combustão de biomassa não satisfazerem requisitos contemporâneos e não podem competir com combustíveis líquidos e gasosos no requisito de potência. Portanto, uma nova tecnologia para combustão de biomassa, como a caldeira de leito fluidizado, deve proporcionar alta eficiência de combustão, proteção ambiental satisfatória, combustão de combustíveis de baixa qualidade e flexibilidade para diferentes combustíveis e cargas.

As características da combustão do leito fluidizado (vantagens e desvantagens) resultam do fato de que o combustível queima em um leito de material inerte (areia, cinza, pedra calcária) que é fluidizado pelo fluxo de ar ascendente. Onde o material inerte não participa da combustão, mas fornece condições muito favoráveis para a combustão. No leito fluidizado a força de arrasto das partículas (fluxo ascendente) deve ser suficiente para suportar o peso das partículas. Assim as partículas sólidas ficam com propriedades fluidodinâmicas.

Segundo Oka (2004), vários modos de fluidização são reconhecidos em relação à velocidade do gás (velocidade de fluidização): leito estacionário ou borbulhante; leito turbulento; e fluidização rápida (ou leito fluidizado circulante). As caldeiras CLF de primeira geração são as de fluidização borbulhante e, portanto, são chamadas de caldeiras CLF borbulhantes estacionários. As caldeiras CLF da segunda geração empregam o regime de fluidização rápida e, conseqüentemente, são chamadas de caldeiras de combustão de leito fluidizado circulante.

A Figura 1 ilustra uma caldeira CLF borbulhante. Na parte inferior do forno, na placa de distribuição, existe um leito de material particulado inerte o qual será fluidizado. O ar necessário para a combustão e fluidização entra no forno através da placa de distribuição.

Figura 1 – Caldeira de leito luidizado borbulhante, com recirculação de combustível.



Fonte – Basu (2006), modificado pelo autor.

A queima de combustível (geração de calor) ocorre principalmente neste leito fluidizado de material inerte. A temperatura de combustão é tipicamente a cerca de 800 a 900 °C, a maior parte do calor é removida pelas superfícies da serpentina imersas ou não no leito fluidizado.

Existem duas formas de alimentar o combustível: sobre o leito ou abaixo da superfície do leito. Para biomassa grosseiras e reativas, com ou sem pequenas partículas finas, o ideal é utilizar uma alimentação sobre a superfície do leito. Assim, a distribuição de combustível em uma área maior da seção transversal do forno é possível.

Para partículas de 6 mm ou menos de diâmetro, a alimentação de combustível abaixo da superfície do leito é a mais utilizada. Acima do leito há um freeboard (zona livre após leito fluidizado), com muito baixa concentração de partículas sólidas, onde a combustão de partículas finas e voláteis continua. As perdas de energia com as partículas que ainda não foram queimadas, arrastadas com os produtos de combustão, podem ser reduzidas pela sua recirculação e reintrodução no forno. (BASU, 2006).

3.2 Biomassa sólida.

Em uma caldeira, a alimentação da biomassa exige grande atenção, a maioria do tempo e dinheiro são gastas em plantas, especialmente durante seus primeiros anos de operação, tentando resolver problemas como odores do combustível, aquecimento do alimentador, desgaste excessivo de equipamentos, problemas no possível entupimento no decorrer da alimentação. Assim, o projeto de sistemas de alimentação de biomassa requer uma análise cuidadosa. Segundo Basu (2006), a biomassa pode ser facilmente classificada em dois grandes grupos: colhidos e não colhidos.

Os combustíveis colhidos incluem biomassa fina como palha, grama e bagaço, os mesmos têm quantidades consideráveis de umidade. Já exemplos de combustíveis não colhidos são as aparas de madeira, as cascas de arroz entre outros em geral, esses combustíveis não são tão longos quanto os combustíveis colhidos e alguns deles são de forma granulares.

Existem dois tipos gerais de sistema de alimentação de biomassa escolhidos de acordo com o tipo de biomassa a ser manuseada. Para biocombustíveis sólidos, há duas maneiras diferentes de se lidar com a matéria-prima durante sua alimentação, levando ao desenvolvimento de dois sistemas de alimentação diferentes, cada um otimizado para um tipo de combustível principal. (SPIVAKOVSKI, 1982)

As cargas a granel incluem vários materiais carregados por montante, como granulados (minério, carvão, turfa, areia de moldagem, cimento de serra, etc.). Estas cargas são caracterizadas por suas propriedades físicas e mecânicas, como o tamanho da partícula (distribuição de sua separação partículas de acordo com o tamanho), peso específico, mobilidade de suas partículas, ângulo de repouso, abrasividade entre outras. Assim o ideal é considerar cada uma dessas propriedades separadamente. (SPIVAKOVSKI, 1982)

De acordo com o tamanho de suas partículas, os materiais a granel são classificados como: grande, médio, pequeno, granulados ou em pó (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação dos graneis de acordo com o tamanho da partícula.

Grupos de cargas	Tamanho da partícula (maior diâmetro em mm)
Grande	<160
Média	60 á 160
Pequena	10 á 60
Granular	0,5 á 10
Pó	>0,5

Fonte - Spivakovski, A; Dyachkov, V. (1982). Modificado pelo autor.

A propriedade das partículas de um material a granel para desgastar a superfície em que estão em contato quando em movimento é chamada de abrasividade de um material. Materiais a granel, como cinzas, bauxita, óxido de alumínio, cimento, minério esmagado, areia, e lodo são altamente abrasivos.

As propriedades devem ser levadas em consideração quando as máquinas de transporte e os equipamentos auxiliares são projetados; teor de umidade, viscosidade, fragilidade, higroscopia, toxicidade, corrosividade e explosividade, etc. Para assim tomar medidas efetivas para redefinir sua influência nociva sobre o equipamento e o meio ambiente.

3.3 ELEMENTOS DE PROJETO.

3.3.1 *Tipos de alimentadores.*

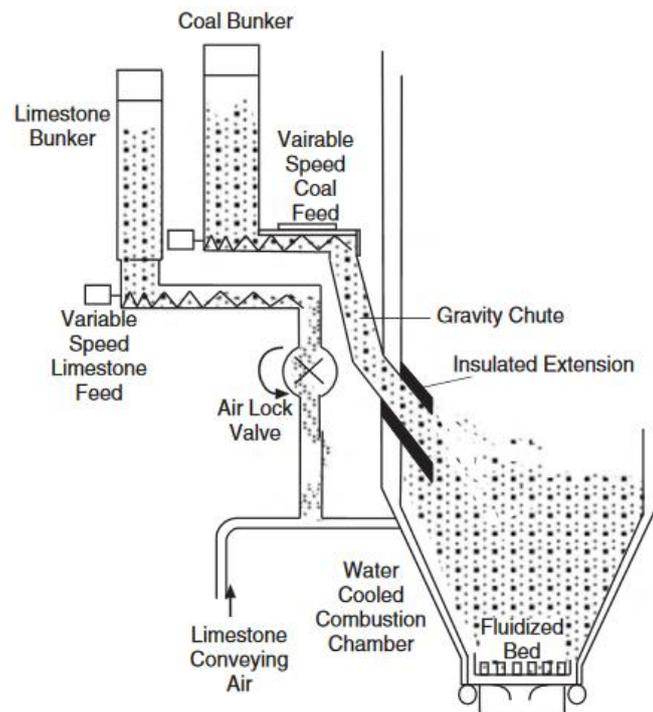
Basu (2006), classificou em 5, os tipos de alimentadores de combustíveis para uma caldeira de leito fluidizado borbulhante: calha de gravidade, transportador de parafuso, espalhador de caldeira automático, injeção pneumática, alimentador de furo móvel.

- Calha de gravidade

Na calha de gravidade as partículas de biomassa são alimentadas no leito através de uma calha com a ajuda da gravidade (Figura 2). Para esse método funcionar, exige-se que a pressão no forno seja pelo menos ligeiramente inferior à pressão atmosférica, caso contrário, as

partículas de gás quente e de combustível serão voltadas para dentro da calha, criando riscos operacionais e possível bloqueio.

Figura 2 – A biomassa é medida por um parafuso é alimentado no forno através de uma calha de gravidade que alimenta a biomassa no topo do leito.



Fonte – Basu (2006)

Apesar das caldeiras de leitos fluidizados terem excelente capacidade de mistura, uma vez que o combustível não está bem disperso no alimentador de calha gravitacional, pode haver uma grande quantidade de matéria volátil liberada perto da saída do alimentador, o que provoca uma onda de pressão e uma atmosfera redutora. Este aumento de pressão pode soprar as partículas de combustível fino na calha para fora do leito.

Uma solução, é um jato de ar empurrando a biomassa para leito, o que pode ajudar a dispersar partículas finas longe dessa zona. Outra medida para amenizar ou evitar esse problema, é de a calha ser estendida para o forno como mostrado na Figura 2. Contudo, por estar perto da combustão, uma zona bastante quente, a parte estendida precisaria de isolamento ao redor ou algum ar de refrigeração para evitar a desvolatilização prematura.(BASU, 2006).

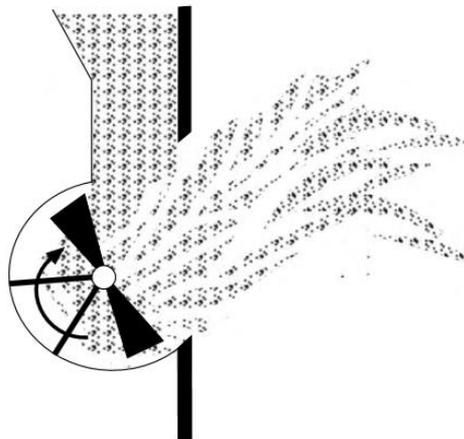
Infelizmente o alimentador de gravidade não é um dispositivo de que tenha qualquer processo de medição da biomassa, o que significa que não pode controlar nem medir a taxa de

alimentação do combustível. Então é necessário um dispositivo de medição separado como um parafuso antes da calha.(BASU, 2006).

- Espalhador de caldeira automático

Para obter uma ampla dispersão do combustível sobre o leito, pode-se usar as rodas de espalhamento (Figura 3). Estas rodas são normalmente compostas por um par de lâminas girando em alta velocidade, que lançam o combustível recebido de um parafuso ou outro tipo de alimentador de medição sobre uma grande área da superfície do leito. Uma orientação ligeiramente oposta destas lâminas pode ajudar a jogar o combustível sobre uma área lateral maior.(BASU, 2006).

Figura 3 – Espalhadores de biomassa.



Fonte – Basu (2006).

- Alimentador de injeção pneumática

O alimentador de injeção pneumática em baixo do leito é preferido por sua contribuição para uma maior eficiência de combustão, especialmente para combustíveis menos reativos. O objetivo desse tipo de alimentador é transportar combustível seco em uma corrente de ar a uma velocidade superior à velocidade de fluidização da caldeira.

Normalmente o ideal é que o combustível seja alimentado por debaixo da do leito. Basu (2006), fala que a velocidade máxima de ar nas linhas de transporte de combustível geralmente é inferior a 11 a 15 m/s. O ar para o transporte na injeção de biomassa é o mesmo que faz parte

do ar de combustão. Os sólidos finos como a pedra calcária geralmente usam alimentadores de injeção pneumática.

Os dois principais problemas dos alimentadores de injeção pneumática, são a divisão da mistura de combustível/ar em múltiplas linhas de combustível e a formação de jato de ar de alta velocidade no leito.

Esses jatos de ar, que transportam partículas sólidas, entram no leito a velocidades muito altas. Essas partículas com alto impulso, impacto em qualquer tubo que se encontra nessas zonas causando erosão severa. Assim, uma zona altamente erosiva pode se formar na saída de cada alimentador de combustível.

3.3.2 Transportadores de parafuso

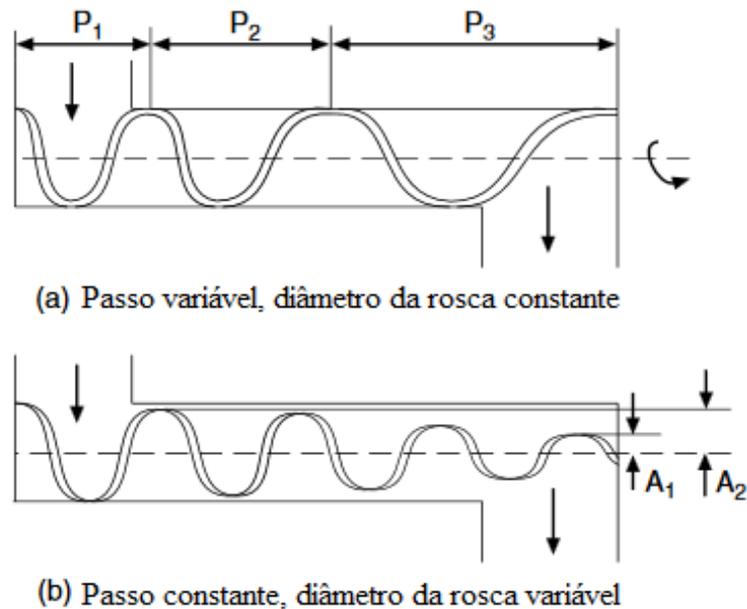
O transportador de parafuso é considerado uma “bomba” de deslocamento positivo. A qual pode mover partículas sólidas de uma zona de baixa pressão para uma zona de alta pressão com uma vedação de pressão. Um aspecto positivo o qual a calha de gravidade não possui, é o fato de poder medir a quantidade de combustível alimentado para o forno.

Podendo variar sua rotação, um alimentador de parafuso pode controlar facilmente a taxa de alimentação, um aspecto muito importante e que tem bastante influencia na caldeira. No entanto, como na calha de gravidade, o combustível de um alimentador de parafuso não tem nenhum meio de dispersão. A solução do jato de dispersão de ar, empregado sob o transportador de parafuso, poderia servir para este propósito.

Outros problemas do parafuso sem-fim estão relacionados aos sólidos dentro dos flancos (entre parafuso e calha), que podem ser comprimidos enquanto se movem. Às vezes, esse sólido é empurrado com tanta força que não cai do parafuso, por ter uma compactação da biomassa contra as extremidade da calha, o que acareta muitas vezes ao bloqueio do parafuso.

Segundo Basu (2006), as seguintes opções de design podem evitar o problema de interferência: parafuso de inclinação variável (Figura 4a) 2. Diâmetro variável para evitar a compressão de combustíveis em direção à extremidade de descarga (Figura 4b). Ao mudar o passo ou o diâmetro do parafuso, pode-se evitar a compactação de sólidos que ocorrem nos alimentadores de parafusos.

Figura 4 – Exemplos de variação de passo ou o diâmetro do parafuso.



Fonte – Basu (2006)

Porem esse tipo de alimentador normalmente serve apenas para pequenas caldeiras. Outro problema operacional importante é que o combustível não pode conter uma alta umidade. Por isso o mesmo deve ser seco antes de entrar no transportador, caso contrário ele pode danificar o sistema.

A alimentação tem sempre que ser uma etapa confiável do processo, principalmente em processos contínuos, onde o alimentador é uma peça de fundamental importância no sistema de alimentação da combustão no leito fluidizado. No caso de uma falha nessa alimentação, ou sua operação em condições não adequadas, o controle da combustão e da estabilidade da chama será prejudicada, podendo ter que reiniciar a caldeira, um fato que gera muito custo e tempo.

O projeto de rosca transportadoras geralmente tem uma abordagem empírica, havendo na literatura recomendações de projeto para auxiliar no dimensionamento, em função da capacidade e da distância. (SPIVAKOVSKY, 1983; GARCIA, 1987).

Schlesinger (1997), utiliza uma teoria analítica e propõe soluções combinadas. Principalmente nos casos que não existe tempo disponível para obtenção dos dados necessários, como exemplo recomenda que a determinação da potência necessária seja feita do modo empírico, seguindo instruções e tabelas de seu livro.

Muitas vezes o transportador é “acusado” por um problema que muitas vezes está ocorrendo no silo do qual o transportador está retirando material para alimentar o processo.

Tendo isso em vista, muitos pesquisadores dedicaram-se aos problemas interface silo-transportador, que costuma ser fonte comum de problemas nos sistemas de alimentação.

3.3.3 Silos

Silos são construções que tem como finalidade o armazenamento de algum produto. Normalmente a retirada desse produto em silos verticais é realizado por escoamento pela parte inferior do silo, onde há uma seção convergente denominada tremonha. (NEIVA, 1998)

O principal objetivo no projeto de um silo é garantir que o material armazenado escoe por gravidade e que o mesmo não sofra de obstruções. A geometria da tremonha e a geometria da abertura de saída são os elementos fundamentais no projeto.

Os tipos de obstruções encontradas no escoamento estão relacionados com o sólido atingir resistência suficiente para suportar seu próprio peso, impedindo o material situado sobre ele de fluir livremente. Os problemas predominantes, são a parada do escoamento derivada do aparecimento da obstrução em abóbada ou obstrução em tubo, em contrapartida o escoamento irregular acontece na altura da descarga. (PIRES, 2015).

- Obstruções em abóbada

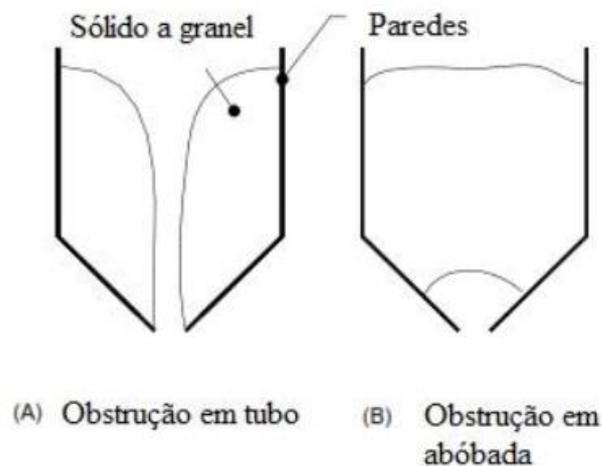
A obstrução em abóbada Figura 5B, é a formação de uma espécie de arco imediatamente acima da abertura da tremonha, a qual impede o escoamento do sólido. Este tipo de arco é originado pela interligação mecânica das partículas sólidas, ou pela elevada coesão do material. (MAYNARD, 2004).

Um arco de interligação mecânica ocorre quando as partículas são grandes quando comparadas com a saída da tremonha. Ou quando há uma compactação entre as partículas, levando a sua obstrução. (MAYNARD, 2004).

- Obstrução em tubo

Na Figura 5A ilustra a obstrução com uma forma de tubo, elas estão mais presente em silos com escoamento de funil. O problema é originado quando se armazenam produtos que demonstram elevada coesão, quando o escoamento é feito apenas e diretamente acima da saída do reservatório, e quando o material restante estagna e não flui. A região estagnada é estável o suficiente para não fluir e, deixa assim, um furo cilíndrico que acompanha todo o material armazenado.(PIRES, 2015).

Figura 5 - Tipos de obstruções.



Fonte – Pires (2015).

- Tempo de armazenamento

O tempo é muito importante, pois com o aumento do tempo de armazenamento as propriedades vão-se deteriorando. Outra coisa que acontece, é o aumento da força de coesão entre partículas, pois é diretamente proporcional a coesão, aumentando assim a dificuldade de escoamento.(PIRES, 2015)

- Segregação

A segregação existe quando o material sólido armazenado tem uma grande variação na dimensão das partículas. As partículas de maiores dimensões ficam junto às paredes do silo e as de menor dimensão no centro. Dependendo do tipo de escoamento (funil ou massa), as

partículas do centro seriam descarregadas em primeiro lugar, levando a problemas de segregação.(PIRES, 2015).

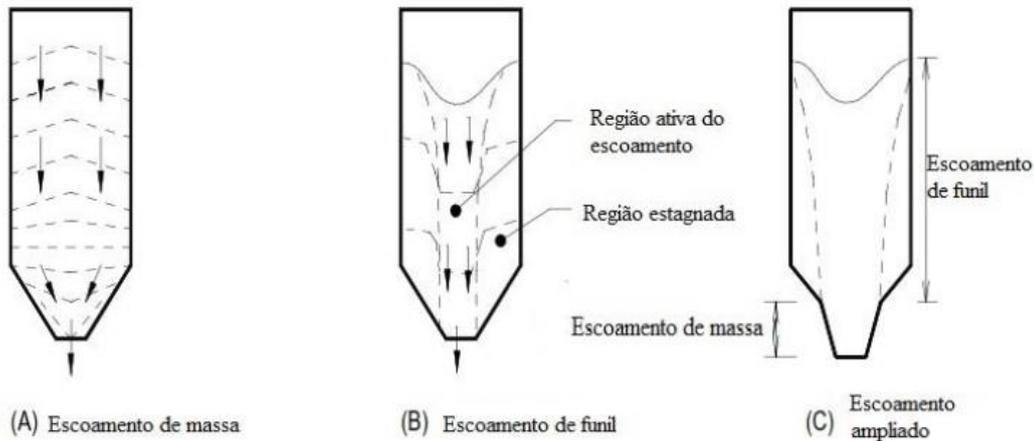
3.4 Escoamento de sólidos granulares

O fluxo de produtos sólidos pode ser descrito como o movimento sucessivo entre partículas em contato umas com as outras e com a superfície das paredes dos silos. A possibilidade de ocorrência do fluxo é fortemente regida, dentre outros fatores, pela capacidade de dilatação do produto armazenado, por se acreditar que durante a fase de armazenamento o produto é sujeito a cargas constantes de consolidação responsáveis pelo aumento de sua densidade. No instante do fluxo o sólido armazenado deve ser suficientemente capaz de se expandir e fluir por pequenos canais.(MEDEIROS, 2012).

As pressões presentes em silos são muito diferentes das encontradas num tanque que contém um fluido, e são dominadas por fenômenos de atrito. Pois no escoamento de materiais sólidos a granel poucas analogias podem ser feitas sobre o armazenamento de materiais líquido, uma delas é que diferentemente de um líquido, as quais as pressões aumentam em proporção da altura do reservatório, as pressões horizontais causadas por um sólido granular nas paredes do silo deixam de aumentar quando chegam a uma determinada altura de material.

A descarga por gravidade de um produto armazenado no silo pode realizar-se mediante dois tipos de escoamento: escoamento de massa e escoamento de funil Figura 6a e Figura 6b respectivamente. A diferença entre estes escoamentos ocorre devido a diferenças entre as propriedades físicas do produto, a geometria, e as características da superfície da tremonha. (PIRES, 2015).

Figura 6 – Tipos de escoamento em silos.

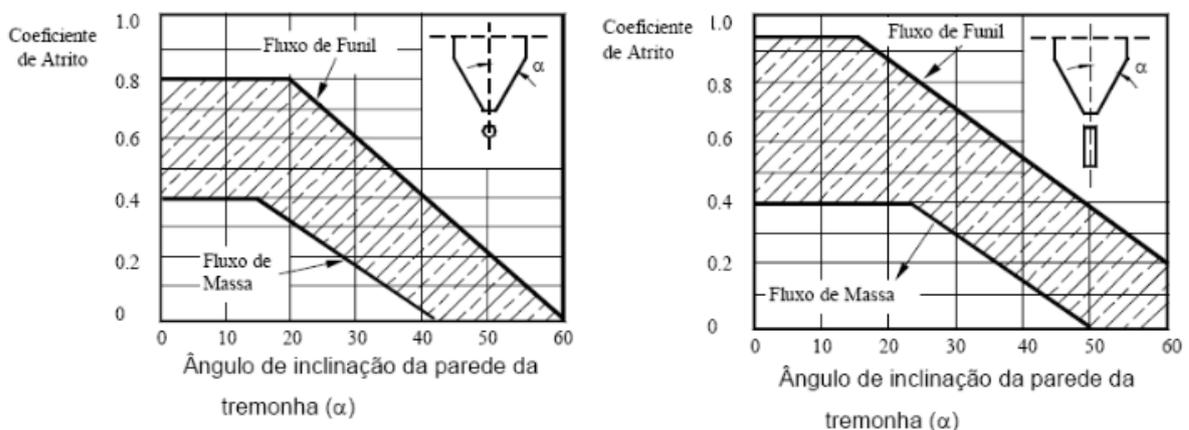


Fonte – Pires (2015)

As principais diferenças entre os tipos de escoamento estão nas diferenças de movimento entre as zonas do escoamento. No escoamento de massa, todo o material sólido dentro do silo está em movimento, contudo não necessariamente à mesma velocidade. Já no escoamento de funil apenas o material no centro do escoamento, acima da saída da tremonha, está em movimento enquanto o material que está em contato com as paredes se mantém estagnado. (CHASE, 2004).

O tipo de fluxo pode ser predefinido com base no coeficiente de atrito do produto com a parede e na inclinação da tremonha. Para a escolha do ângulo de inclinação da tremonha Calil Junior e Cheung (2007) apud Medeiros (2012), recomendam que seja sempre diminuído de 3° para se obter um padrão de fluxo seguro, devido às incertezas embutidas no processo, conforme se observa na Figura 7.

Figura 7 – Determinação gráfica para o tipo de fluxo.



Fonte – Medeiros (2012).

Pode-se lista possível problemas ou características relevantes na hora de se projetar um silo;

- Conhecimento relativo ao contorno entre fluxo de massa e funil;
- Observações experimentais de fluxo de funil em modelos e silos reais;
- Correlações entre observações padrões de fluxo com propriedades simples dos produtos;
- Conceitos mecânicos simples relativos a orientações dos contornos do fluxo interno;
- Empirismo, simplicidade e conservadorismo;
- Possíveis problemas;
 1. A integridade estrutural do silo pode ser comprometida pelas pressões as quais podem ser muito altas, muito baixas ou muito assimétricas;
 2. O produto armazenado pode permanecer estagnado ou ocorrer fluxo com configuração irregular;
 3. O processo de carregamento ou tipo de fluxo pode causar segregação da massa ensilada

No caso da tremonha, um tronco-prismático de base retangular (cunha), o ângulo da parede com a vertical pode se aproximadamente 8° a 10° maior que no caso de uma tremonha cônica, por esse motivo será utilizada a cunha, pois a mesma apresenta maior capacidade volumétrica do que os com tremonha cônica, para as mesmas condições de escoamento e mesmas dimensões disponíveis para sua instalação.

De acordo com Neiva (1998), a faixa de incerteza existente entre as regiões de fluxo de massa e fluxo de funil são maiores para as tremonhas cônicas do que as em cunha, a chance da mudança de fluxo durante a operação é maior na cônica, podendo acarretar escoamentos indesejáveis, vibrações e outros problemas.

4 METODOLOGIA

4.1 Levantamento de propriedades físico químicas do lodo

Para a utilização de resíduos como fonte alternativa de energia, o conhecimento de suas propriedades e características químicas é essencial, de modo a permitir o projeto do sistema de combustão, como principalmente para o projeto do alimentador. A seguir, serão detalhadas as análises de caracterização de resíduos, visando o seu aproveitamento como fonte alternativa de energia e para parâmetros de cálculos usados para o dimensionamento dos componentes do alimentador para a caldeira.

- Teor de umidade

O teor de umidade dos grãos representa a quantidade de água por unidade de massa do grão úmido ou seco. Segundo Borges (2004), os ensaios com as amostras de lodo foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas. E a análise aproximada dos teores de umidade, sólidos totais, sólidos voláteis totais e cinzas foi obtida segundo metodologias descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (GREENBERG et al, 1998 apud BORGES, 2004).

Na Tabela 2 apresenta os resultados obtidos por Borges (2004) da análise aproximada de sólidos totais, cinzas, sólidos voláteis e umidade para os três lodos analisados.

Tabela 2 - Análise aproximada do teor de umidade e sólidos totais (cinzas e sólidos voláteis).

Lodo	Sólidos Totais (%)	Umidade (%)	Cinzas (%)	Sólidos Voláteis Totais (%)
Sanitário	90,9	9,05	47,6	43,3
Celulose e papel	89,1	10,9	13,6	75,5
Têxtil	91,0	8,96	44,3	46,8

Fonte – Borges (2004).

- Granulometria

Boa parte da biomassa é composta, de uma forma geral, por um grande número de partículas que possuem diferentes dimensões. A granulometria ou análise granulométrica dessa biomassa é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em massa que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise. A análise granulométrica pode ser realizada por peneiramento.

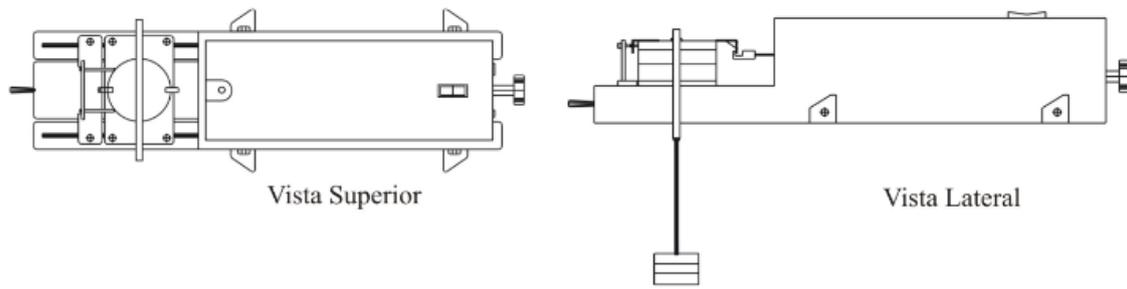
Os resultados utilizados forem retirados Pontes (2009), serão utilizados no dimensionamento empírico do silo, onde a percentagem média de partículas com dimensões maiores que 2,38 mm (de 3,1 para 6,1%) e com dimensões entre 0,71 e 2,38 mm (de 13,0 para 20,6%); e a diminuição na percentagem média de partículas menores que 0,71 mm (de 83,4 para 73,3%).

- Propriedades físicas para os parâmetros de projeto

As características dos sólidos a serem relevantes em um projeto, apresentam grande influência nas pressões exercidas nas paredes e fundo de um silo, assim como no modelo de fluxo ocorrente. Entretanto, pouco se conhece sobre as reais propriedades e seus valores; mas quando se trata de armazenagem de modo geral, erroneamente o comportamento dos sólidos nos silos é associado aos de líquidos cujos mecanismos de fluxo apresentam diferenças significativas.(MEDEIROS, 2012).

Quanto às suas determinações, Jenike (1964) apud Medeiros (2012), deu grande contribuição científica ao desenvolver um aparelho de cisalhamento direto apropriado para produtos sólidos denominado de “Jenike shear cell”. Com ele, é possível determinar os esforços sobre os quais o produto estará sujeito durante o armazenamento e nas condições de fluxo previstas para acontecer no silo conforme Figura 8.

Figura 8 - Aparelho de cisalhamento direto de Jenike.



Fonte – Medeiros (2012)

Com este aparelho Neiva determinou as principais propriedades de fluxo do bagaço de cana de açúcar, sendo elas:

- Peso específico consolidado (γ);
- Ângulo de atrito interno (ϕ);
- Ângulo efetivo de atrito interno (ϕ_e);
- Ângulo de atrito interno do produto com a parede (ϕ_s);
- Função Fluxo (FF);
- Fator fluxo da tremonha (ff);

4.2 Dimensionamento do silo

Existem vários tipos de dimensionamentos empíricos, um caso geral, uma saída circular deve ter diâmetro 6 á 8 vezes maior que o da partícula. No caso de saída oblonga, a largura mínima deve ser de 3 ou 4 vezes maior que a partícula. Segundo Jenike (1964), já para evitar arcos coesivos, tipicamente a saída circular deve ter diâmetros igual ao dobro da largura da saída oblonga.

Para o dimensionamento do silo as fundamentações e referencias foram retirados do trabalho da dissertação de mestrado do Neiva (1998). Serão apresentados procedimentos e formulações para o projeto de geometria de silo para um escoamento de massa. Pois o mesmo apresenta as seguintes vantagens em relação ao escoamento de fluxo.

- Vazão regular;
- O efeito de segregação radial é reduzido com a melhora da homogeneidade;
- Campo de tensões mais previsível;

- Toda capacidade é utilizada;
- Maior capacidade de armazenagem, não possui regiões com produto estagnado.

Vários autores apresentam processos diferentes, mas seguiremos com o procedimento clássico utilizado por Neiva (1998), por apresenta uma solução viável e comprovada em seu trabalho e em referencias, as quais funcionaram.

Primeiro de tudo, são os dados do material ensilado necessários; o efetivo ângulo de atrito interno do material ϕ_e , e o ângulo de atrito do material com a parede ϕ_s , o ângulo da parede da tremonha com a vertical α (Figura 7).

Os ângulos de atrito interno da matéria e o ângulo de atrito do material com a parede foram determinados por ensaios de cisalhamento forçando a biomassa a uma superfície de aço, com um equipamento sugerido por Jenike (1964) Figura 8, estes ensaios foram feitos por Neiva (1998) e seus resultados serão utilizados no projeto.

Segundo passo, é determinar o fator de fluxo da tremonha, o que precisa dos seguintes dados;

- O ângulo da parede da tremonha com a vertical α ;
- O efetivo ângulo de atrito interno do material ϕ_e ;
- O ângulo de atrito do material com a parede ϕ_s ;
- O ângulo de atrito interno ϕ .

$$ff = \frac{Y[1+\sin(\phi_e)]}{2(X-1)*\sin \alpha * F(\alpha)} \quad (1)$$

onde:

$F(\alpha)$ é dado por 0,97 fator dado por Arnold apud Neiva.

$$X = \left[\frac{2^m * \sin \phi_e}{1 - \sin \phi_e} \right] * \left[\frac{\sin(2v + \alpha)}{\sin \alpha} + 1 \right] \quad (2)$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos(v + \alpha))]^m * (\sin \alpha) + (\sin v) * [\sin^{1+m}(v + \alpha)]}{(1 - \sin \phi_e) * \sin^{2+m}(v + \alpha)} \quad (3)$$

$m = 0$ para tremonha em forma de cunha

$m = 1$ para tremonha cônica

v é o ângulo formado entre a tangente do arco de tensão na parede da tremonha e a normal a parede, dado por:

$$v = \frac{\phi + \sin^{-1}(\sin \phi / \sin \phi_e)}{2} \quad (4)$$

De acordo com Calil Junior (1990), apud Medeiros (2012), o fator fluxo da tremonha é uma função da forma da tremonha e das propriedades do produto armazenado e indica a escoabilidade do produto na tremonha; quanto menor este valor, melhor será a tremonha.

Já para determinar a abertura mínima da saída dos sólidos do silo para o parafuso, com o intuito de evitar a formação de arco coesivo, deve-se partir do valor de tensão principal de consolidação σ_1 e usar a equação:

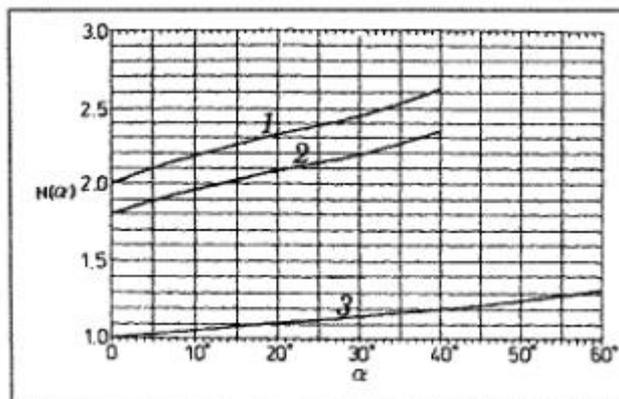
$$B_{min} = \frac{\sigma_1 * H(\alpha)}{\rho * g} \quad (5)$$

onde:

B = abertura de saída

$H(\alpha)$ = função tabelada na (Figura 9), levando em consideração o ângulo do silo e a geometria da abertura.

Figura 9 – Função $H(\alpha)$ para; 1- abertura circular, 2 – abertura quadrada, 3 – abertura retangular



Fonte – Neiva (1998).

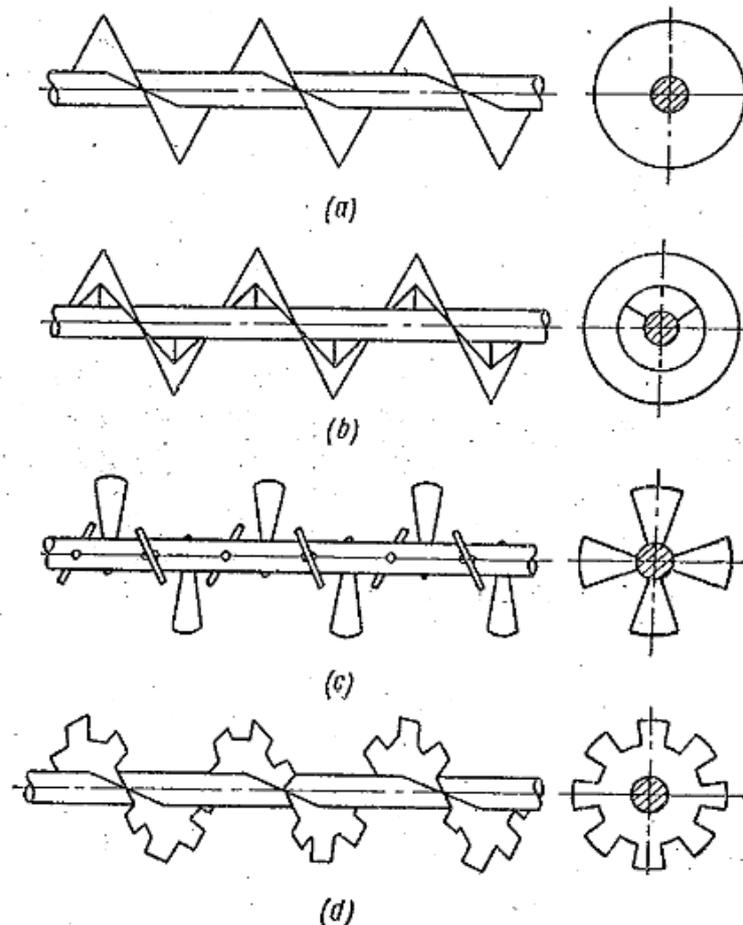
Caso não tenha os valores dos ensaios para a determinação de σ_1 , pode-se avaliar o dimensionamento da descarga, tendo apenas em vista a dimensão da partícula para evitar a formação de arco, usando dimensionamentos empíricos, um caso geral, uma saída circular deve ter diâmetro 6 á 8 vezes maior que o da partícula. No caso de saída oblonga, a largura mínima deve ser de 3 ou 4 vezes maior que a partícula. (NEIVA, 1998).

4.3 Dimensionamento da rosca helicoidal

O dimensionamento da rosca será dividido em dois autores diferentes e decidir qual deles é o mais aplicável para a idealização do sistema.

Primeiramente será apresentada a proposta de dimensionamento de Spivakovski e Dyachkov (1982), que diz que o design do parafuso é selecionado de acordo com o material transportado: hélice simples, pode ser encontrado em passos diferentes a depender do fluxo de material desejado (Figura 10a); hélice com dentes, utilizado para transporte onde seja necessário principalmente desagregar os componentes do material transportado, como a remoção de detritos e partículas que são movidos junto a grãos de cereais (Figura 10d); hélice com pás, utilizado para transporte onde seja necessário misturar os materiais transportados, podendo-se regular o trabalho das pás, para obter vários graus diferentes de mistura (Figura 10c); hélice em fita simples ou múltiplas, utilizado para transporte de materiais que apresentem características viscosas ou pegajosas, com a tendência de aderir às paredes do transportador (Figura 10b);

Figura 10 - Design do parafuso de passo ou contínuo.

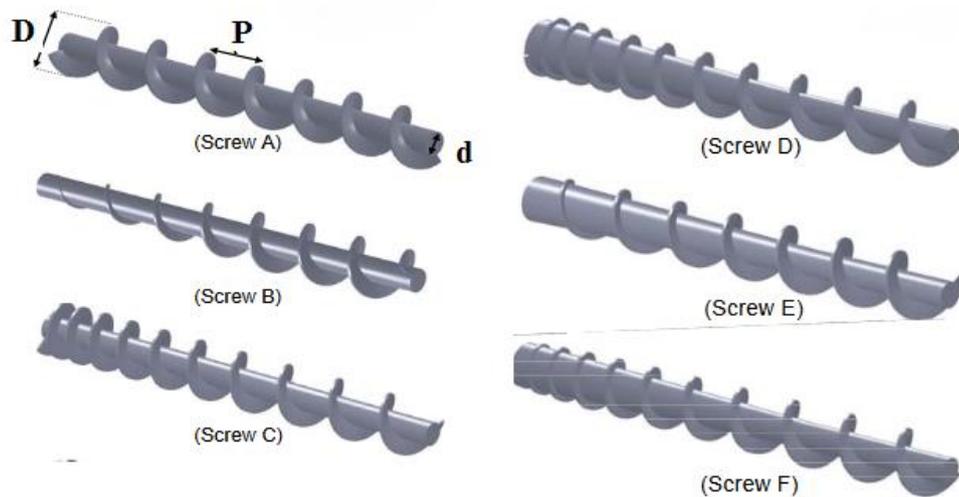


Em projetos típicos, o passo do parafuso (P) é igual ao diâmetro da rosca (D), já para materiais de fluxo lento e abrasivos é recomendado um passo de 0,8D.

Segundo Spivakovski e Dyachkov, V (1982), o diâmetro do parafuso deve ser pelo menos 12 vezes maior do que o diâmetro da biomassa ou 4 vezes maior do que os diâmetros maiores do material não padronizado. O diâmetro assim selecionado é arredondado para o valor maior mais próximo dado acima.

O trabalho de Fernandez J.W. Cleary, P. W.; McBride, W. (2009), comparou vários formatos de rosca (Figura 11), classificou os seis parafusos com base na drenagem e o uso de energia colocou o parafuso F marginalmente primeiro. Parafuso B foi um segundo próximo em termos de drenagem, mas foi observado que leva mais tempo para transportar partículas longe da parte traseira da tremonha. Parafuso D ocupou o terceiro lugar, proporcionando um desenho semelhante ao parafuso F, mas teve o dobro do consumo de energia. O quatro e quinto foram os parafusos C e E, respectivamente. Eles tiveram escoamento similar, mas C usou 20% menos potência do que E. O Parafuso A realizou o mais pobre sem retirar os 60% de massa da parte trazeira da tremonha e teve o segundo maior empate de energia.

Figura 11 – Formatos de rosca helicoidais



Fonte – Fernandez (2009), modificado pelo autor.

Para dimensionar o diâmetro da rosca parafuso, Spivakovski e Dyachkov (1982) usou a seguinte fórmula:

$$D^2 = \frac{4 \cdot Q}{60 \cdot \pi \cdot P \cdot \psi \cdot \gamma \cdot C \cdot n} \quad (6)$$

Onde:

Q = Vazão de saída do alimentador

ψ = Fator de correção para volume ocupado pelo material na hélice (Tabela 2).

γ = Peso específico.

P = Passo da rosca sem-fim.

n = Velocidade da rosca.

C = Fator de correção do ângulo de inclinação do alimentador ($C = 1$ para roscas horizontais).

Tabela 3 - Fator de correção para volume ocupado pelo material na hélice.

ψ = Fator de correção	
0,125	Pesados e abrasivos
0,250	Pesados e pouco abrasivos
0,350	Leves e pouco abrasivos
0,40	Leves e não abrasivos

Se utilizarmos uma rosca com características geométricas constantes ao longo da área de retirada de material do silo, ocorrerá após algum tempo de operação, uma distribuição variável ao longo da largura do silo. Para conseguir que o nível do silo desça uniforme ao longo de sua largura, podemos utilizar três formas de manter essa distribuição conforme a Figura 12. Também tem as equações para a variação desses parâmetros segundo ROBERTS (1996, apud NEIVA, 1998).

- Variação do diâmetro externo da rosca:

$$D(x) = D \left[A_{11} + (1 - A_{11}) \frac{x}{L} \right] \quad (7)$$

onde $A_{11} = D_i/D$

- Variação do *diâmetro do eixo*:

$$d(x) = D \left[A_{21} + (A_{21} - A_{22}) \frac{x}{L} \right] \quad (8)$$

onde d = diâmetro do eixo

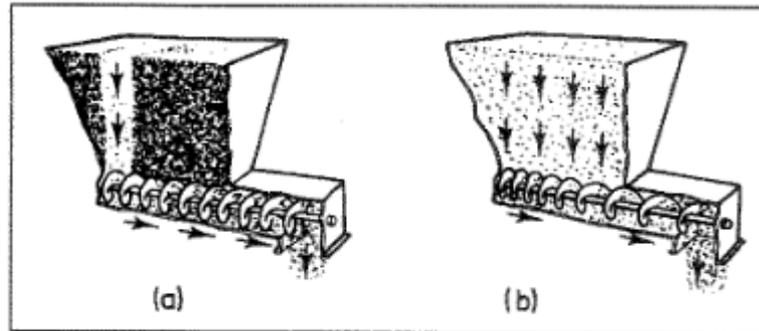
- Variação do passo

$$P(x) = D \left[A_{31} + (A_{32} - A_{31}) \frac{x}{L} \right] \quad (9)$$

onde $A_{31} = P_i/D$, $A_{32} = P/D$

A não observância destes cuidados no projeto pode causar diversos problemas, como o não aproveitamento de toda capacidade do silo, ou elevada segregação do material. Fazendo com que a biomassa perca muito do seu poder colorífico e assim perdera sua importância.

Figura 12 - (a) Demanda concentrada, (b) Demanda distribuída



Fonte – Neiva (1998).

4.4 Parâmetros de funcionamento

-Determinação da eficiência volumétrica do alimentador

A vazão de material teoricamente transportado (W_t) por uma rosca transportadora de geometria definida e rotação constante pode ser expresso por:

$$W_t = \frac{n \cdot P \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} \quad (10)$$

Onde:

n = rotação da rosca

P = passo da rosca

D = diâmetro externo da rosca

d = diâmetro do eixo sobre qual a rosca está montada

A eficiência de transporte (η) representa a relação entre a vazão de material transportado (W_r) e a teórica (W_t):

$$\eta = \frac{W_r}{W_t} * 100 \quad (11)$$

- Determinação da potência total e torque.

Para determinar a potência deve se levar em consideração a resistência total ao movimento em um transportador de parafuso, que é constituída pelas seguintes resistências: fricção do material contra a calha; fricção do material contra a superfície do parafuso; fricção nos rolamentos intermediários e terminais; fricção no rolamento de impulso axial; resistências adicionais, devido à embalagem do material nos rolamentos intermediários entre outras. (SPIVAKOVSKI, A; DYACHKOV, V. 1982)

Essas resistências que formam uma grande parte da resistência total, possuem uma difícil obtenção teórica, portanto, Spivakovski e Dyachkov, (1982) encontrou um fator de resistência (w_0) prático, estabelecido a partir da experiência prática com transportadores de parafuso. Logo ele deduziu a formulação para determina a potência necessária no parafuso de acordo com o eixo horizontal transportadores:

$$N_0 = \frac{Q * L * w_0}{367} \quad (12)$$

onde

L = Comprimento da rosca sem-fim.

Spivakovski e Dyachkov (1982) definiu, que para materiais como, carvão marrom seco, carvão de porca, sal de pedra, etc., o valor médio do fator w_0 é igual a 2,5; já para gesso, argila seca o, areia de fundição, enxofre, cimento e areias com diversas granulometria, o valor médio de w_0 é igual a 4.

Além disso, definiu a formulação para a capacidade de torque para eixos de parafusos:

$$T_0 = \frac{120 * 60 * N_0}{2 * \pi * n} \quad (13)$$

5 RESULTADOS E DISCURSÃO

Os resultados vieram em forma de cumprir o objetivo principal, que buscou avaliar uma proposta de concepção para um alimentador helicoidal de biomassa (lodo) para uma caldeira de leito fluidizado, a qual está sendo projetada para uma estação de tratamento de esgoto na cidade de Quixada-CE.

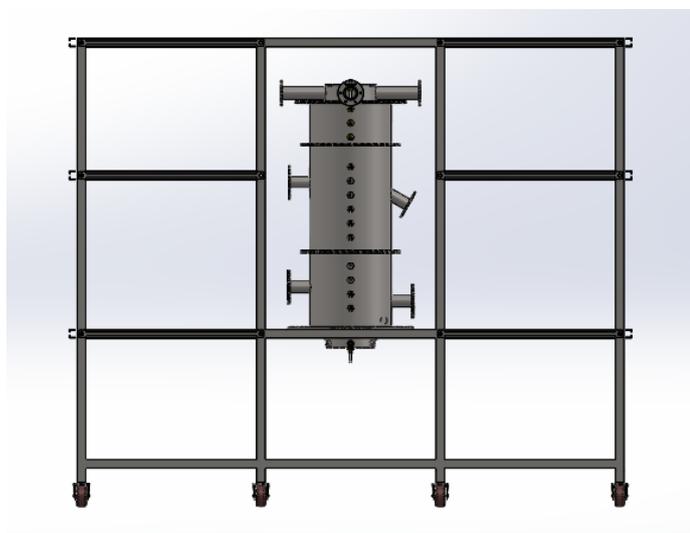
Este alimentador será implantado no LACER junto a caldeira de leito fluidizado que está sendo fabricada com o alimentador e outra para a caldeira de campo que estará na cidade de Quixada-CE.

Os resultados foram dividido em três partes; no projeto básico do alimentador como um protótipo para testes no LACER, outro projeto básico do alimentador que possivelmente será implantado em campo e em um projeto construtivo do alimentador de protótipo pronto para sua fabricação.

5.1 Projeto Básico (Protótipo de laboratório)

Com o intuito de alimentar uma caldeira de CLF projetada com base no trabalho do Feitosa (2015), Figura 13. O principal objetivo foi projeta um alimentador, que fosse capaz de transportar o lodo em uma vazão previamente calculada de 1,27 kg/h, calculada no LACER com base em cálculos feitos por Feitosa (2015).

Figura 13 – Caldeira de leito fluidizado

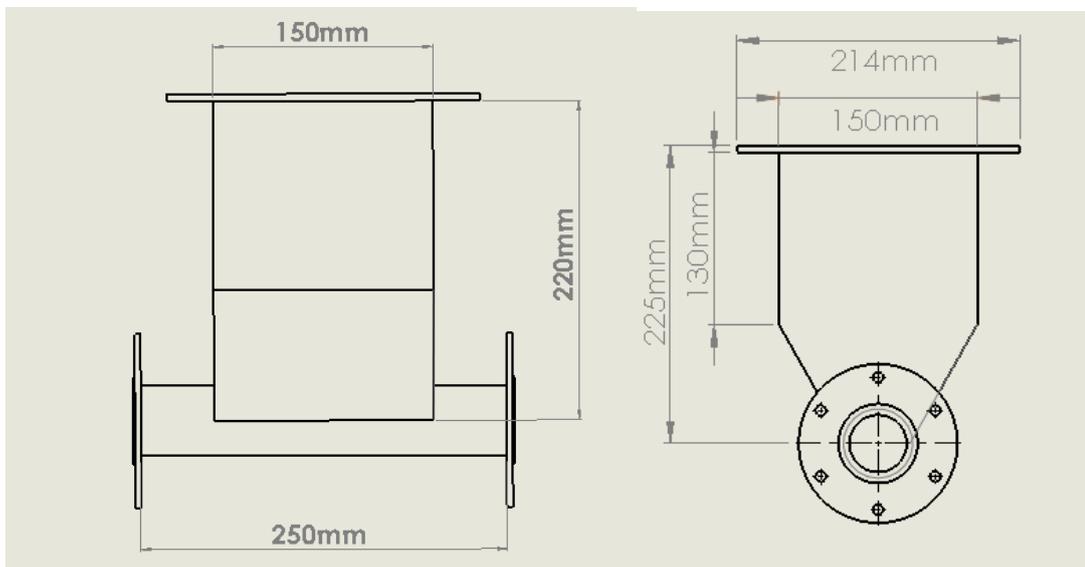


Fonte – Feitosa (2015).

Porém o diâmetro da entrada de biomassa não poderia ser modificado, pois poderia causar consequências no funcionamento da caldeira, como: maior transferência de calor, maior instabilidade na fluidodinâmica e uma vedação de ar mais complicada.

Assim foi feito um esboço de como ficaria o projeto inicial para o silo (um dos dois elementos principais no projeto), o qual precisar armazenar no mínimo 3kg de biomassa, calculada previamente no LACER. Figura 14.

Figura 14 – Esboço inicial do alimentador.



Fonte – Autor

A escolha o design deste alimentador, foi realizada por avaliar trabalhos anteriores, os quais utilizaram com satisfação o silo de tronco-prismático de base retangular (GOMEZ, 1996; DAI, 2009; HOU, 2013; FERNANDEZ, 2009; ARNOLD, 1997).

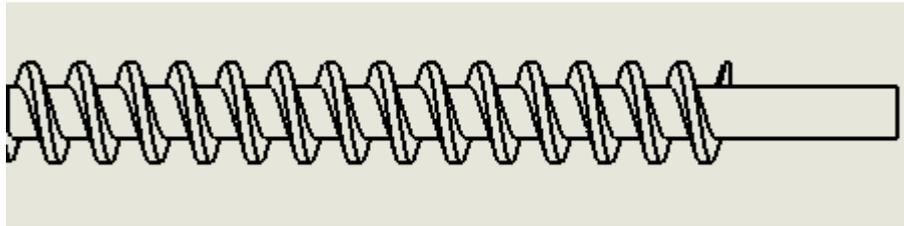
A tremonha em tronco-prismático de base retangular, tem um ângulo da parede com a vertical pode aproximadamente 8° a 10° maior que no caso de uma tremonha cônica e a tremonha prismática não corre o risco ocorrer a obstrução em abóbada, por esses motivos será utilizada a cunha prismática.

As suas medidas bases: largura, comprimento e altura, foram estabelecidas de acordo com a sua necessidade (3kg), de manter uma vazão de biomassa com o tempo necessário para fazer os testes. Já o diâmetro interno foi escolhido um tubo industrial já fabricado, o qual seu diâmetro ficasse próximo ao da entrada da caldeira, a qual não poderia ser modificada.

Na escolha da rosca, optou-se pela rosca helicoidal transportadoras, que em diversos trabalhos (GOMEZ, 1996; NEIVA 1998; FERNANDEZ, 2009), desempenhou seus objetivos satisfatoriamente. Como também proposto na fundamentação teoria do dimensionamento.

Protótipo de alimentador concebido neste trabalho e do tipo rosca sem-fim (Figura 15), selecionado pela sua simplicidade de construção, operação e manutenção, além de serem baratos.

Figura 15 – Esboço do parafuso de rosca sem-fim

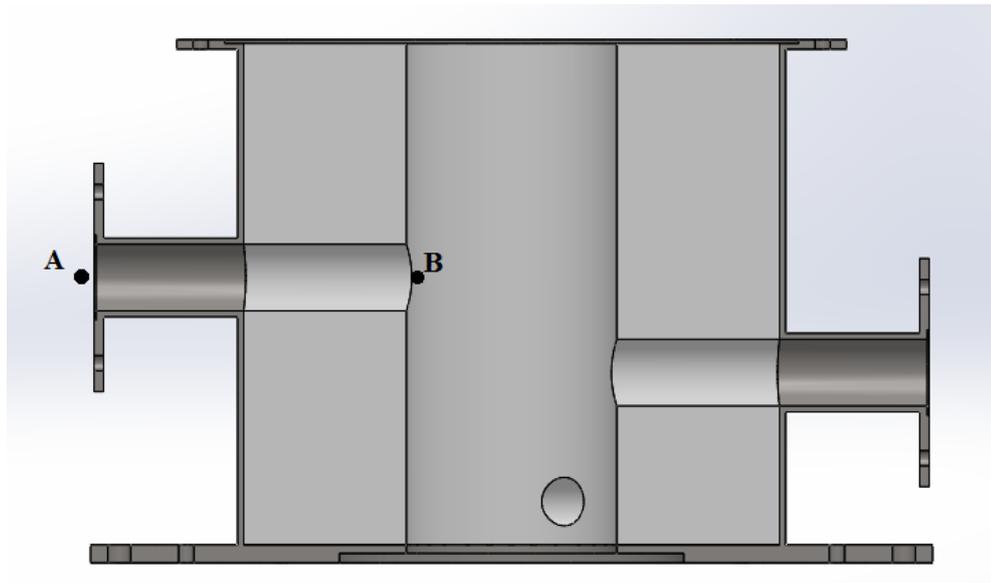


Fonte – Autor.

O projeto visa a determinação do diâmetro da rosca D para os outros parâmetros de projeto e operacionais conhecidos, segundo a equação de (SPIVAKOVSKY e DYACHKOV, 1982). E seu comprimento determinado pela soma do comprimento do alimentador junta ao comprimento do caminho da biomassa chegue na parede o reator.

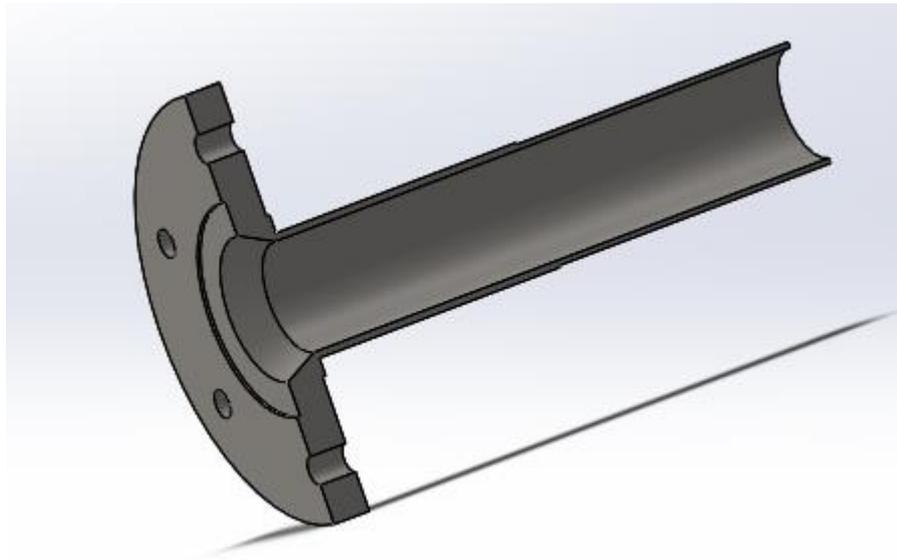
Devido a troca de calor intensa que o parafuso sofre perto das paredes do alimentador (entre o ponto “A” e o ponto “B” da Figura 16) e a necessidade de manutenção (biomassa poderia aderir no cimento refratário, assim sua limpeza seria mais problemática). Foi pensando em uma camisa de sacrifício, a qual tinha como objetivo proteger a rosca sem-fim até sua chegada no reator. (Figura 17). Porém a rosca veio com uma redução de diâmetro (D), a qual pode-se ver vista na Figura 17 pela conicidade existente na entrada no flange.

Figura 16 – Vista em corte da parte intermediária da caldeira com o concreto refratário.



Fonte – Autor

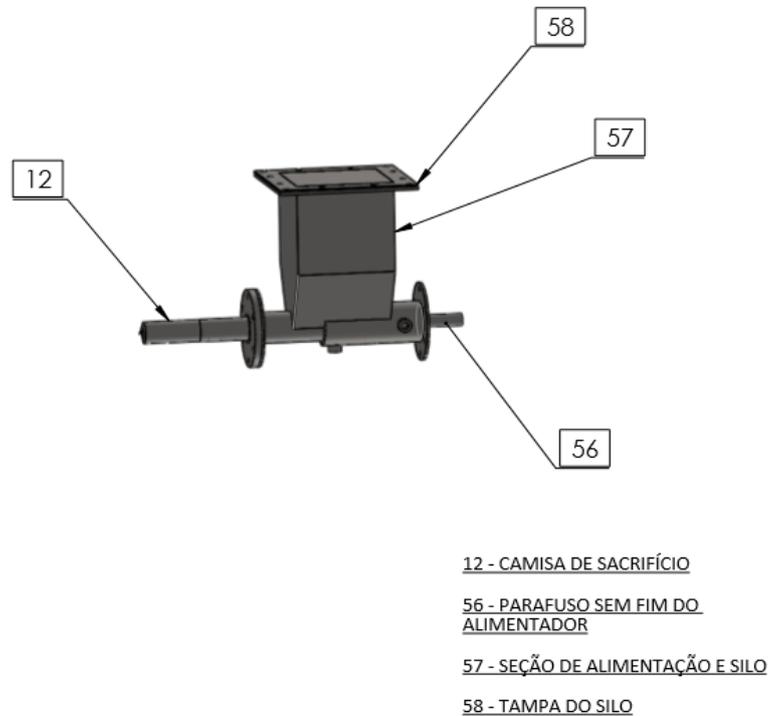
Figura 17 – Vista de corte da camisa de sacrifício



Fonte – Autor

Na Figura 18, segue a imagem em 3D de como ficou idealizado o alimentador de protótipo de laboratório, restando apenas os desenhos de fabricação e suas observações. Onde os números 12, 56, 57 e 58 representam respectivamente: camisa de sacrifício, parafuso sem fim do alimentador, seção de alimentação e silo tampa do silo.

Figura 18 – Imagem 3D alimentador completo



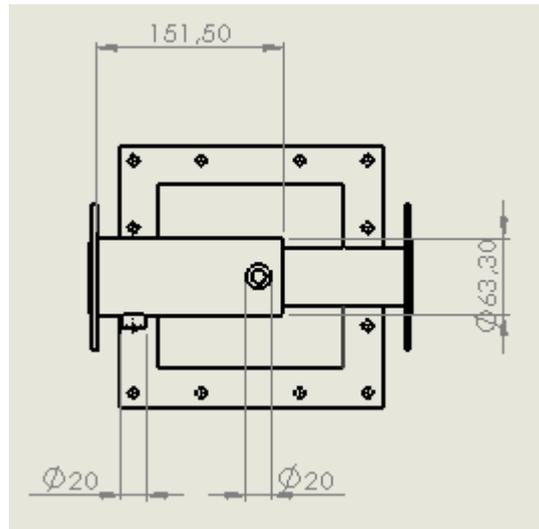
Fonte – Autor

5.2 Projeto construtivo do alimentador (Protótipo de laboratório)

A escolha do material dos componentes do projeto foi a do aço ABNT 1020, por ser de baixo custo e facilidade da compra. Além de que o projeto vem a busca uma funcionalidade do alimentador, para depois disso apresentar uma formatação melhor do material e suas tensões em trabalhos futuros.

Para o projeto construtivo ficou separada o desenho técnico do projeto, e seus detalhes de construção. Na Figura 19 e Figura 20, pode-se ver alguns desses detalhes.

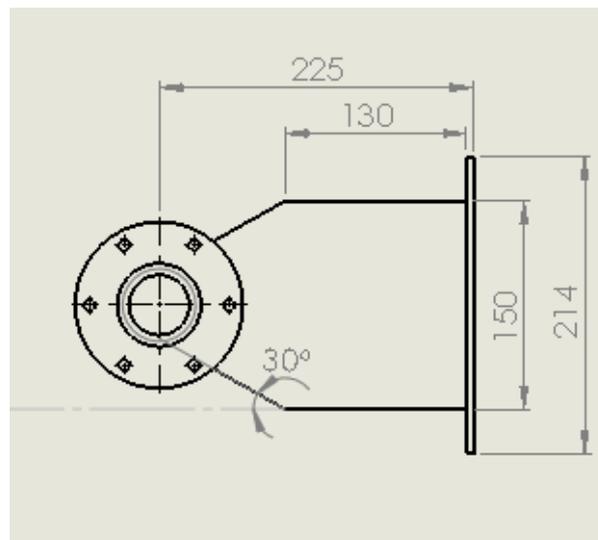
Figura 19 – Vista inferior do silo



Fonte – Autor

Na Figura 20 tem-se as dimensões que foram necessárias para cumprir os requisitos do projeto básico (ter capacidade de no mínimo 3kg de biomassa), também a inclinação ideal segundo Spivakovsky (1982), o qual suas tabelas previa a inclinação de no mínimo 35°, foi utilizado 30°, por margem de erro de no mínimo 4°, citada na metodologia.

Figura 20 – Vista lateral do silo

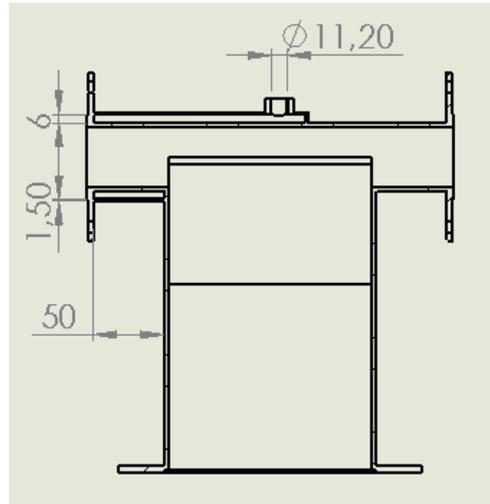


Fonte – Autor

O sistema de alimentação de combustível é constituído de um sistema de resfriamento a água para o silo. Foi utilizado um tubo de aço carbono que envolve o duto de alimentação

numa região situada perto da descarga do alimentador. Pode ser visto na Figura 19 e especificado pela vista de corte na Figura 21.

Figura 21 – Vista de corte do alimentador.

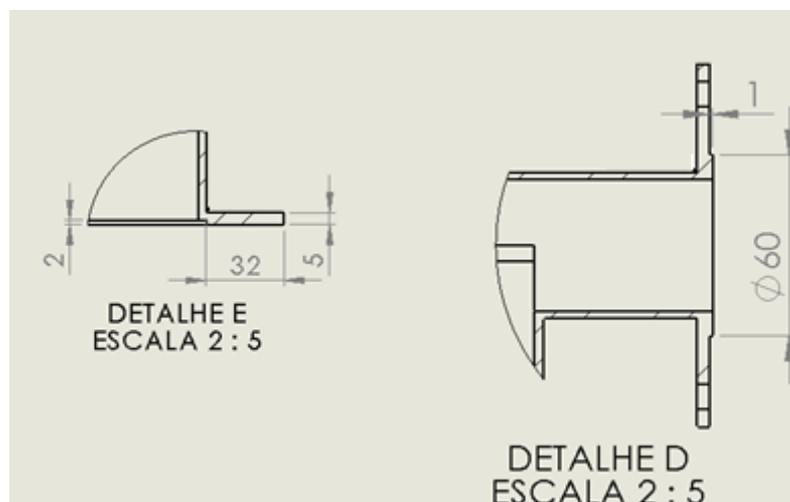


Fonte - Autor

O espaço entre ambos os dutos forma uma camisa de resfriamento com entrada e saída de água forçadas. A utilização da carcaça de resfriamento tem sido incorporada há muito tempo, em quase todos os projetos de combustores em leito fluidizado, visando evitar problemas de deformação da rosca pela combustão do combustível aglomerado como consequência da elevada temperatura de operação do leito.(GOMEZ, 1996)

Nos detalhes E e D da Figura 22 podemos ver um rebaixo e um ressalto, ambos feito com o objetivo na melhoria da vedação do sistema. Para não ter problema de vazão de ar e combustível.

Figura 22 – Detalhes E e D da Figura 20

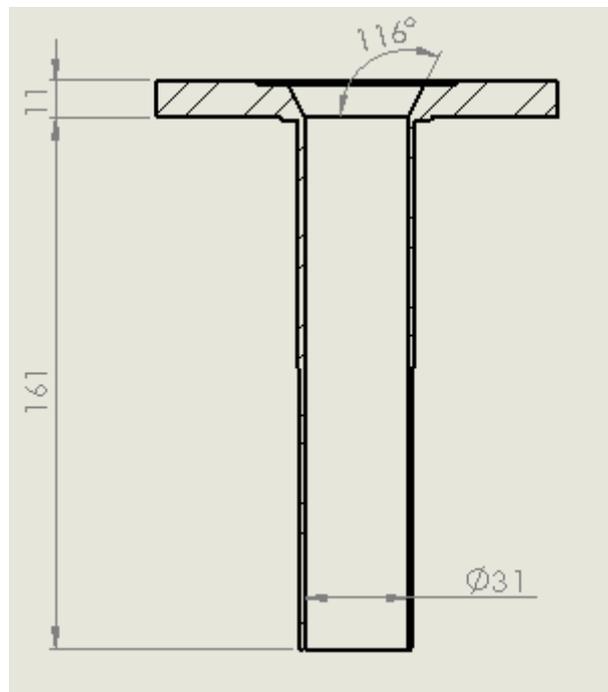


Fonte - Autor

A necessidade da camisa de sacrificio (Figura 23) foi proposta para evitar o desgaste do parafuso, entretanto não poderia mudar os flanges da caldeira, pelo fato do mesmo está padronizado. Logo a solução seria uma redução nos diâmetros do eixo e da roca.

O projeto da rosca helicoidal foi realizado pelos métodos matemáticos de (SPIVAKOVSKY; DYACHKOV, 1982). Entretanto o diâmetro da rosca tinha uma limitação, não poderia passar de 28 mm, pois o diâmetro da camisa de estrangulamento ficou de 31 mm, colocando 1,5 mm de folga entre a parede da camisa com o parafuso, seu diâmetro ficou assim limitado em 28 mm.

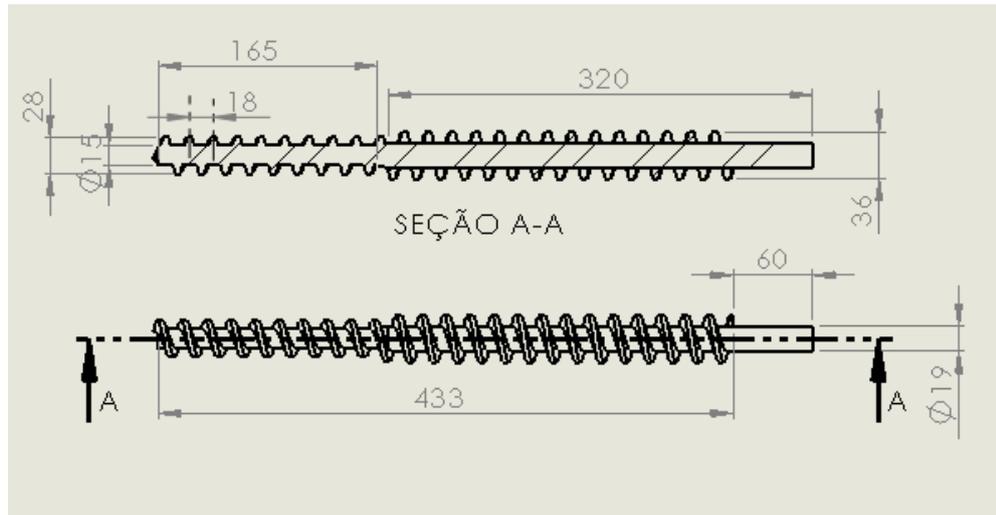
Figura 23 – Vista de corte da camisa de sacrificio (Figura 16).



Fonte - Autor

Como a equação (6), a vazão pode ser variada com a rotação, logo pode-se obter a vazão desejada apenas variando a rotação, garantindo que a limitação do projeto (diâmetro da rosca de 28 mm), seja satisfeita. Segue na Figura 24 o desenho do parafuso utilizado no alimentador.

Figura 24 - Desenho do parafuso (rosca sem-fim)



Fonte – Autor

O comprimento da rosca foi estabelecido pela distância total necessária para que ocorra a alimentação da biomassa até o ponto B da Figura 16. A redução feita no diâmetro da rosca e do eixo, foram ocasionadas pela camisa de sacrifício (para proteção térmica do parafuso, e facilidade na limpeza).

A união do eixo do motor com o eixo do parafuso sem-fim pode ser feita por uma utilização de acoplamentos elásticos. Para acomodar pequenos desalinhamentos entre dois eixos, acoplamentos elásticos são normalmente escolhidos (por não haver garantia que o eixo do motor-reductor será o mesmo do alimentador). Visto que está comercialmente disponível uma grande variedade de acoplamentos elásticos, um projetista tipicamente seleciona um acoplamento adequado através de catálogos de fabricantes, em vez de projetá-lo a partir de um esboço.

O uso de mancais de deslizamento é o mais adequado, pela simples manutenção e de custo barateado, a utilização dos mancais e rolamento será feita após a conclusão da fabricação e pesquisa em catálogos, aqueles que satisfazem as dimensões do eixo do parafuso, como as dimensões do eixo do motor.

O uso ideal é o de rolamento simples por esferas, pelo fato de haver vários catálogos e de fácil compra, além de que o sistema não passara por grandes rotações nem de muitos esforços.

Todas as folhas de desenhos técnicos dos componentes projetados estão em anexo do trabalho, os quais já foram enviados para suas fabricações.

5.3 Parâmetros de funcionamento do alimentador.

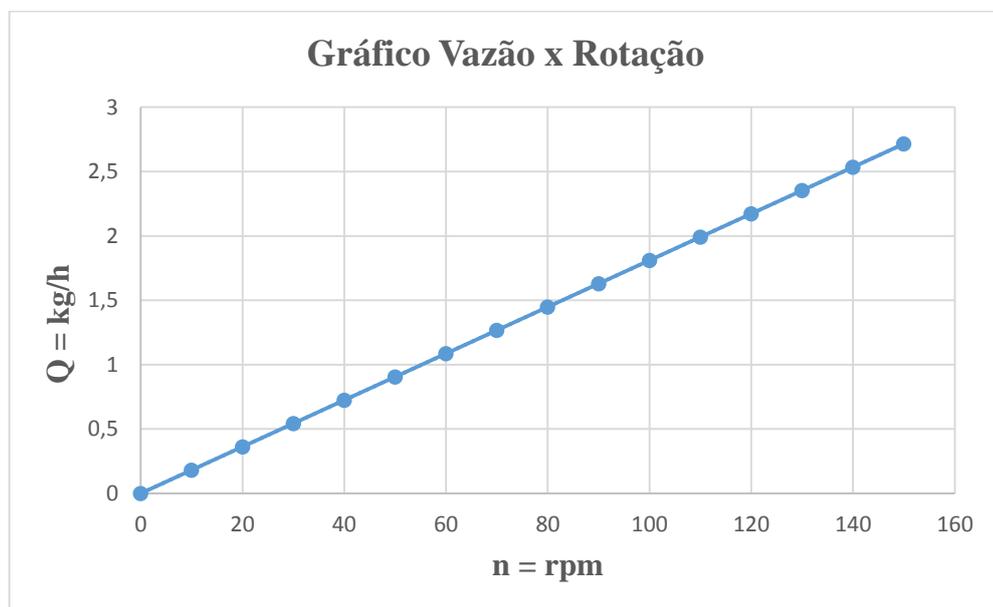
Utilizou os métodos de cálculos do Spivakovski e Dyachkov (1982), por apresentar métodos mais práticos e com parâmetros bem estabelecidos, assim obteve-se os parâmetros de funcionamento como: vazão de saída do alimentador, potência necessária, utilizado as equações (6) e (10) para seus cálculos, com os dados referente da Tabela 3.

Tabela 4 – Dados utilizados para a determinação dos parâmetros de funcionamento.

Dados utilizados	Valor	Unidade
Diâmetro (D)	0,028	m
Passo (P)	0,028	m
Fator de correção para volume ocupado pelo material na hélice (ψ)	0,125	
Densidade específica (γ)	140	kg/m ³
Fator de correção do ângulo de inclinação do alimentador (C)	1	
Comprimento do parafuso (L)	0,433	m
Fator de resistência (w_0)	4	

Fonte – Autor

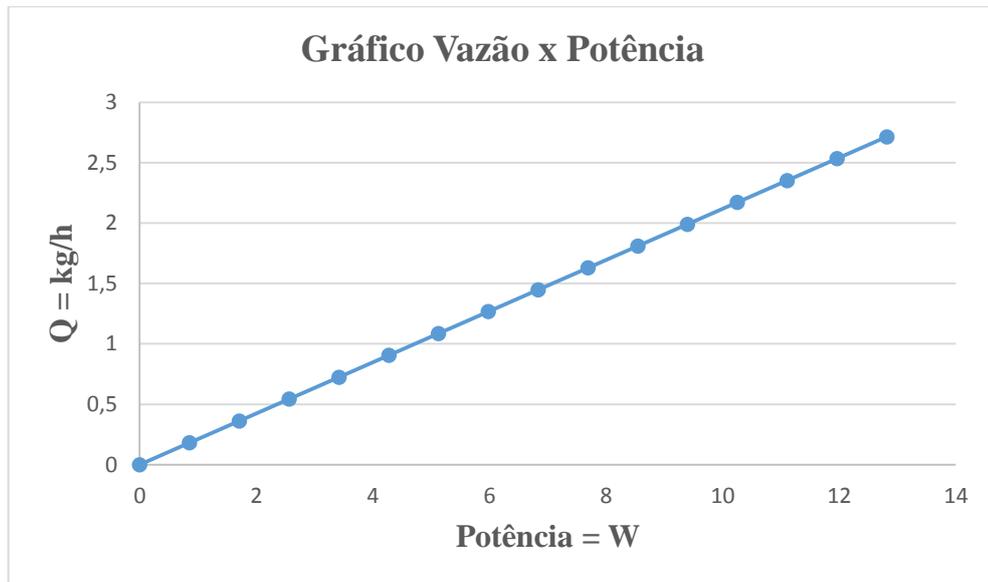
Gráfico 1 – Vazão do alimentador variando pela rotação do parafuso.



Fonte – Autor

O Gráfico 1 mostra a variação da vazão rotação com a vazão, por esse gráfico é capaz de perceber que o alimentador irá satisfazer sua demanda, a qual estava prevista aproximadamente em 1,3 kg/h.

Gráfico 2 – Variação da potência variando a vazão.



Fonte – Autor

Segue no Gráfico 2 a variação de potência necessária de acordo com que a vazão do sistema é aumentada. Assim é possível determina qual motor-redutor será comprado para o funcionamento do alimentador, o qual deve suportar uma potência de 14 W, um torque de no mínimo 900 N/m² e um inversor de frequência que faça o motor-redutor trabalhar na faixa de 30-100 rpm.

5.4 Projeto Básico do alimentador (Escala de campo)

Para o dimensionamento do silo usou dimensionamentos empíricos, um caso geral, uma saída circular deve ter diâmetro 6 á 8 vezes maior que o da partícula. No caso de saída oblonga, a largura mínima deve ser de 3 ou 4 vezes maior que a partícula. A largura base não poderia ser menor que 12mm.

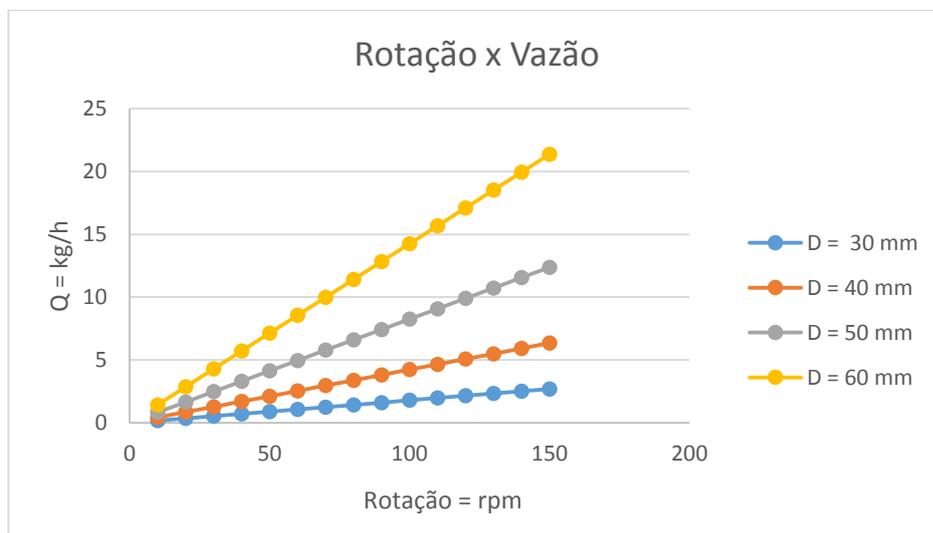
Já sua inclinação foi utilizada o parâmetro de (SPIVAKOVSKY; DYACHKOV, 1982), que sugeria uma inclinação (α) crítica de 35°, porém pede-se que essa inclinação esteja com uma margem de erro de no mínimo 4°, logo poderia se fechar em um valor fixo de 30° para ajudar na fabricação do mesmo.

Quanto as dimensões do silo (largura, comprimento e altura), foram feitas para suporta um volume de biomassa, o suficiente para funcionar a caldeira por um longo tempo sem a necessidade de reabastecimento constante do silo.

Como visto por Fernandez (2009), o ideal seria o uso dos parafusos F ou B da Figura 11, por terem um melhor desempenho, apesar de ter um custo de fabricação alto, poderia escolher um dos dois pelo acaso de que seu custo seria pago, na econômica de energia dos motores, que diferentemente da escala de laboratório a caldeira de campo deverá ficar em funcionamento por mais tempo. Ficou evidenciado que a utilização da metodologia de Roberts (1996) será a mais adequada nesse projeto, apesar de seu custo de fabricação ser bem maior.

Segundo Spivakovski e Dyachkov, (1982), a rotação do alimentador não pode ultrapassar 150 rpm, assim o Gráfico 3 plota a vazão do alimentador por sua rotação, variando também o diâmetro do parafuso em 30, 40, 50 e 60 mm respectivamente.

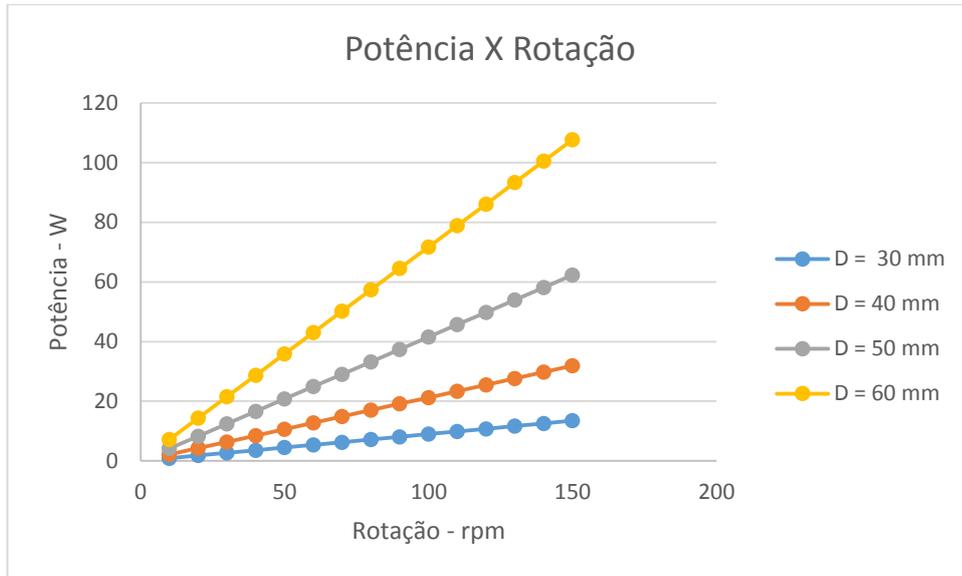
Gráfico 3 – Rotação por vazão com várias curvas de diâmetro de parafuso diferentes.



Fonte – Autor

No Gráfico 4 fica visível a variação da potência como variação da rotação, podendo perceber que a potência aumenta de acordo com o aumento do diâmetro do parafuso, pelo fato de sua capacidade de vazão aumenta. Porém a sensibilidade da vazão variando a rotação diminui. Percebeu-se que para o alimentador em escala de campo, o diâmetro de parafuso ideal seria o de 40 mm, por apresentar maior faixa perto da vazão desejada (2,5 kg/h) e uma menor potência requerida comparando com um de 50 mm de diâmetro.

Gráfico 4 – Variação da potência com a variação da rotação em diversos diâmetros de parafuso.



Fonte - Autor

O alimentador deve ter um motor-reductor com potência de 31 W e um torque de 2100 N/m, e o seu silo deve ter um ângulo de inclinação de 30° e suas dimensões de acordo com sua capacidade desejada.

6 CONCLUSÕES

Por estudo de bibliografias ficou claro que para o projeto de um alimentador ser eficiente devem ser projetados com cautela dois componentes: o silo e o parafuso. A geometria do silo é um dos principais parâmetros, existem várias formas de calcular seu dimensionamento tanto empíricas quanto por base de cálculos teóricos. Porém para dimensioná-la por cálculos, existem experimentos e testes feitos com a biomassa o qual ele transportar, para com eles tirar seus parâmetros de projeto e assim fazer seu projeto ideal.

Foi visto que o segundo principal elemento a ser projetando é o parafuso de rosca sem-fim, sendo que há várias formas de dimensionar o mesmo, usando nesse projeto a abordagem de Spivakovsky (1982), por apresentar uma formatação mais simplista. Porém para um projeto que envolva alto custo, ficou evidenciado que a formatação para o projeto ideal seria a proposta por Roberts (1996).

Segundo os cálculos dos parâmetros de funcionamento, o projeto do alimentador irá satisfazer a demanda da caldeira, permitindo que futuramente sejam realizados testes de sua vazão e de sua rotação, podendo ainda compará-las conforme especificação segundo a teoria aqui proposta. Através de cálculos teóricos os parâmetros de funcionamento chegaram a uma potência de 14 W e um torque de 900 N/m², sendo que futuramente pode-se utilizar um motor-variador com um inversor de frequência (para variar a sua rotação) e assim realizar testes e comparações.

Percebeu-se que para o alimentador em escala de campo o diâmetro de parafuso ideal seria o de 40 mm, por apresentar maior faixa perto da vazão desejada (2,5 kg/h) e uma menor potência requerida comparando com um de 50 mm de diâmetro. O alimentador deve ter um motor-reductor com potência de 31 W e um torque de 2100 N/m, e o seu silo deve ter um ângulo de inclinação de 30° e suas dimensões de acordo com sua capacidade desejada.

Verificando todo o trabalho realizado, chegou-se aos parâmetros de funcionamento dos alimentadores de protótipo quanto ao de campo, como também fora especificada a teoria adequada a cada um. Por final foram feitos desenhos do projeto construtivo do alimentador de protótipo, todos em anexos já prontos para a sua construção.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, Y. YU, P.C. Theoretical modelling of torque requirements for single screw feeders. **Powder Technology**. Wollongong, v.n.93 p.151-193, abr., 1997.
- BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. New York: Taylor & Francis Group, 2006.
- CHASE, G. **Solid notes on hopper design**. Solids processing course, University of Akron, 2004.
- DAI, J.; GRACE, J. R. Biomass granular screw feeding: An experimental investigation. **Biomass and Bioenergy**. Canadá, v.n .35 p 942-955, 2011.
- FEITOSA, J. D. M. **Aplicação da tecnologia de leito fluidizado em projeto de caldeira de vapor**. Monografia - Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- FERNANDEZ, J.W.; CLEARY, P. W.; McBRIDE, W. **Effect of screw design on hopper draw down by a horizontal screw feeder**. Callaghan, 2009.
- GARCIA, A. D. **Equipos para el transporte de materiales de la Industria Azucarera**. Transportadores y bombas. Ed. ISPJAM, Santiago de Cuba, 1987.
- GOMEZ, E. O. **Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação do bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação - Departamento de Construções Rurais, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.
- HOU, K.J.; DONG, A.B.; YU. DEM study of the flow of cohesive particles in a screw feeder. **Powder Technology**. Sydney, v.n 256 p 529-539, 2014.
- JANIKE, A. W. **Storage and flow of solids**. **Bulletin** No. 123, University of Utah, Salt Lake City, 1964.
- LEONETI, A. B. et al. Saneamento básico no Brasil: considerações sobre investimentos e sustentabilidade para o século XXI. **Revista de Administração Pública**. Rio de Janeiro, 2011.
- MAYNARD, E. **Practical solutions for solving bulk solids flow problems**. Janike & Johanson Inc, 2004.
- MEDEIROS, I. F. **Características de fluxo e vazão de descarga em silos verticais**. Dissertação - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campinas, 2012.
- NEIVA, A. C. De BARROS. **Estudo de alimentadores de bagaço de cana-de-açúcar para reatores atmosféricos**. Campinas, UNICAMP, 1998.

PIRES, A. C. **Estudo do escoamento de sólidos granel em silos – caso da estilha**. Dissertação - Mestre em Engenharia Mecânica, Coimbra, Fevereiro, 2015.

PONTES, P. P. **Efeito do retorno de lodo aeróbio sobre as características da biomassa presente em reatores UASB tratando esgoto sanitário**. Eng Sanit Ambient, Minas Gerais, 2009.

OKA, S. N. **Fluidized Bed Combustion**. New York: Marcell Dekker, 2004.

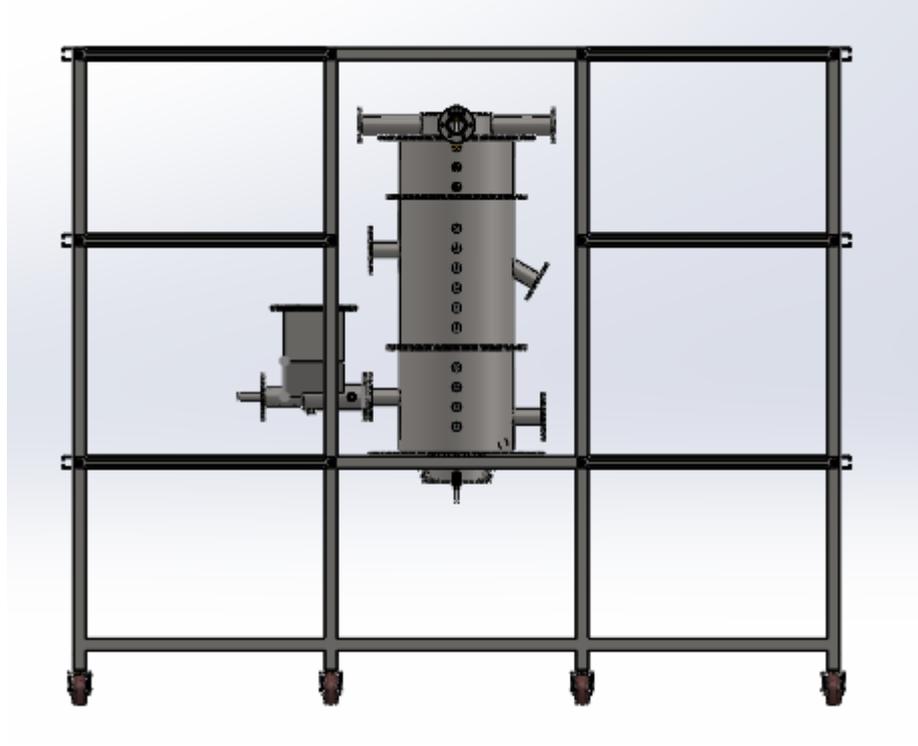
SPIVAKOVSKI, A; DYACHKOV, V. **Conveyors and related equipment**. Peace Publishers. Moscow. 1982.

VESILIND PA, RAMSEY TB. **Effect of drying temperature on the fuel value of wastewater sludge**. Wastewater Management and Research, 1996.

WERTHERA, J. OGADAB, T. **Sewage sludge combustion**. Progress in Energy and Combustion Science, Hamburgo, 1999.

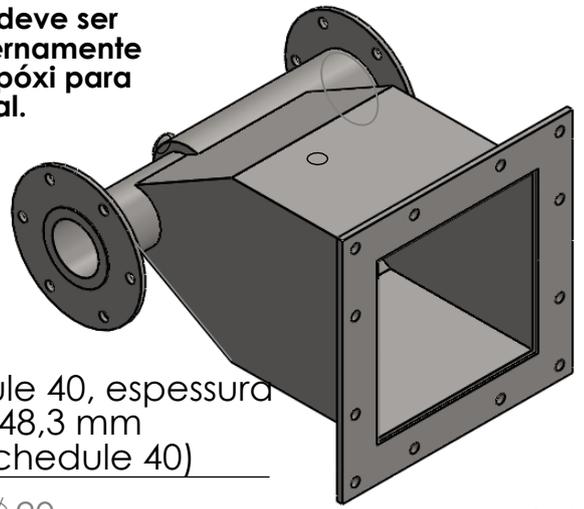
APÊNDICE

Figura 25 - Caldeira montado com o alimentador.

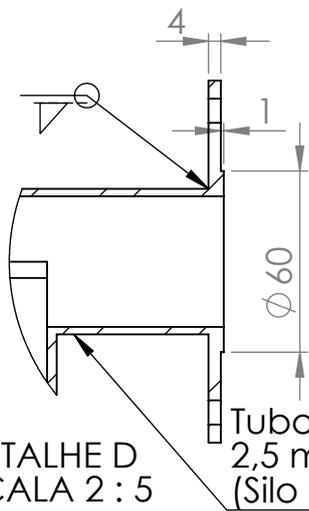


Fonte – Autor.

Esta peça deve ser pintada externamente com tinta epóxi para metal.

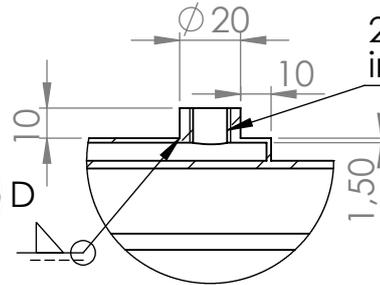


DETALHE D
ESCALA 2 : 5

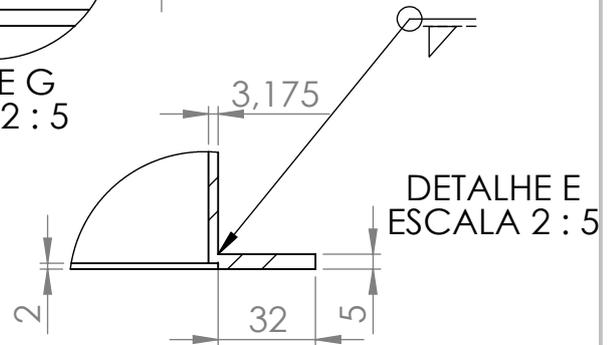


Tubo de aço comercial schedule 40, espessura 2,5 mm e diâmetro externo de 48,3 mm (Silo será soldado no tubo de schedule 40)

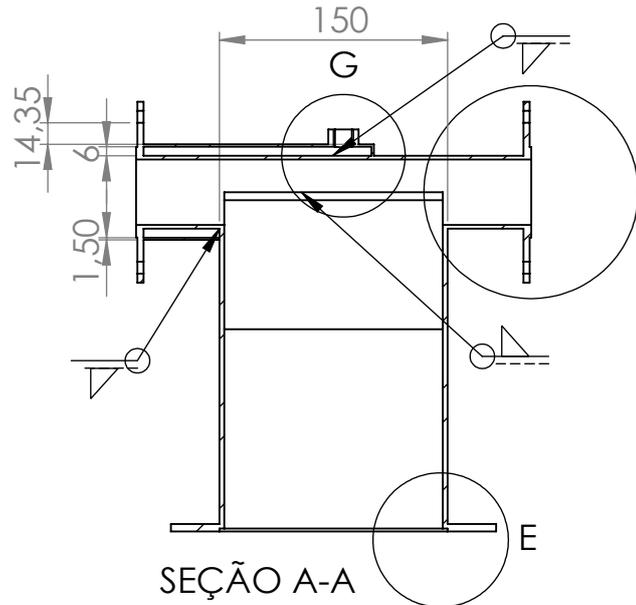
2 tubos com rosca cônica interna de 1/4-18 NPT



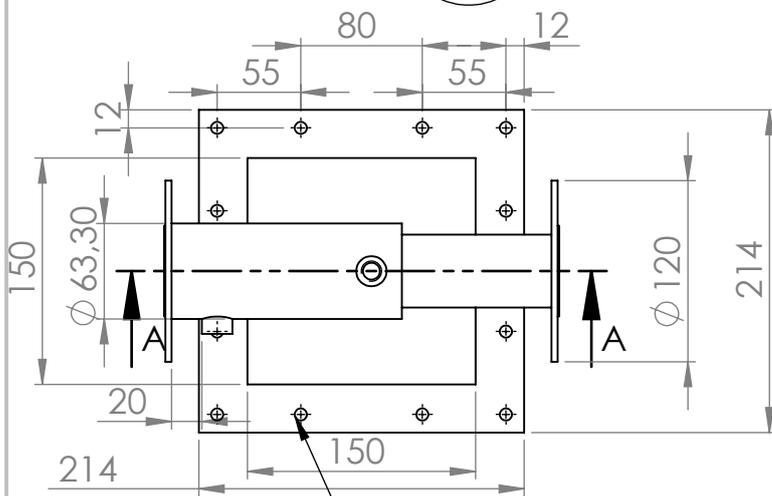
DETALHE G
ESCALA 2 : 5



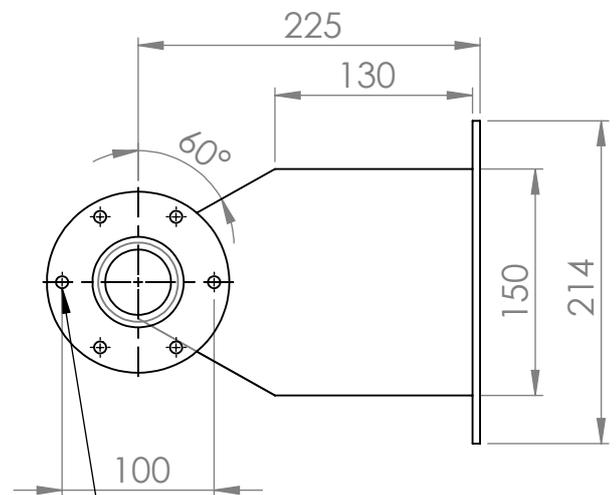
DETALHE E
ESCALA 2 : 5



SEÇÃO A-A



12 furos passantes de $\phi 8\text{mm}$



6 furos passantes de $\phi 8\text{mm}$ (distribuídos igualmente em 360°)

Obs:



CÓDIGO DO DESENHO: CLFPL1 - P057

	NOME	ASSINATURA	DATA
DES.	Desenho		
VERIF.	Revisão		
APROV.	Supervisão		

TÍTULO: Seção de alimentação e silo

VOLUME: 680000 mm³

MATERIAL: AÇO 1020

Nº DO DESENHO: P057

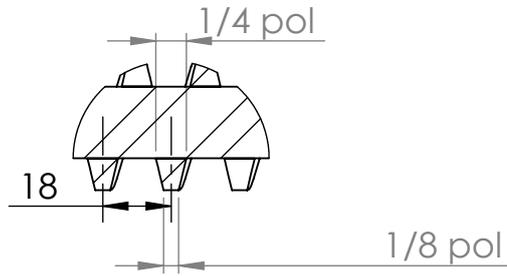
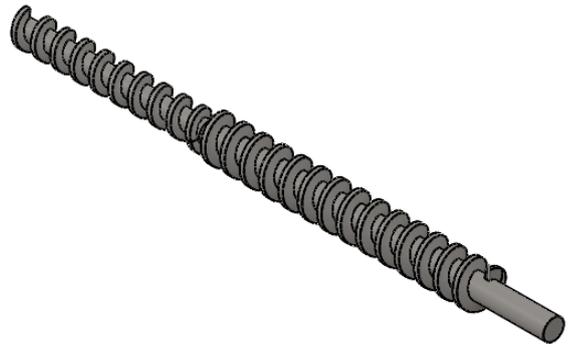
A4

QUANTIDADE:
2 unidades

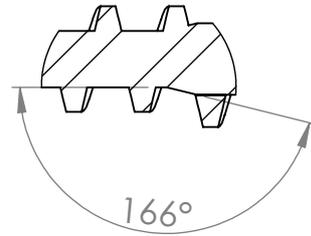
MASSA : 5364g

ESCALA: 1:5

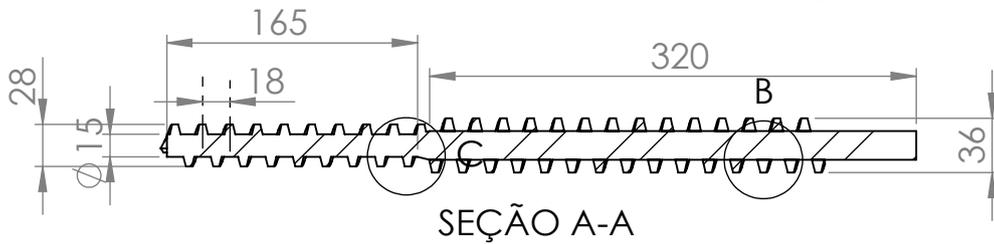
FOLHA 1 DE 1



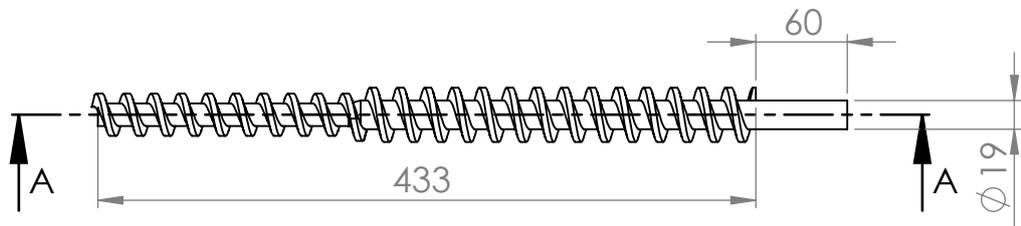
DETALHE B
ESCALA 1 : 2



DETALHE C
ESCALA 1 : 2

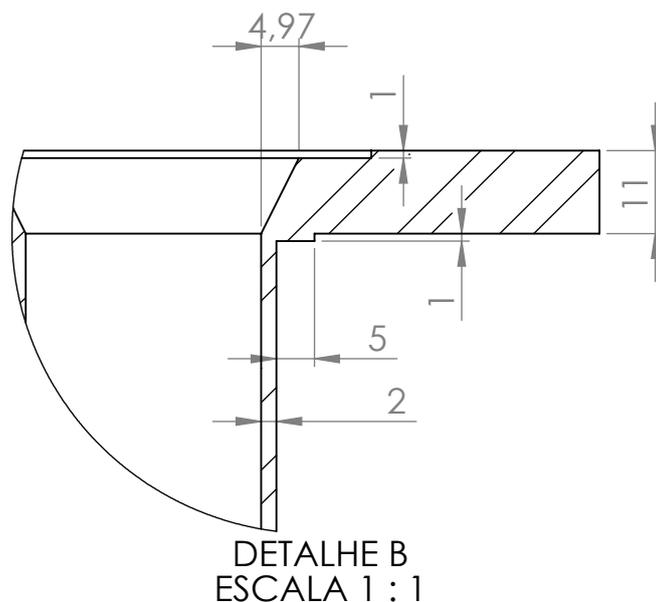
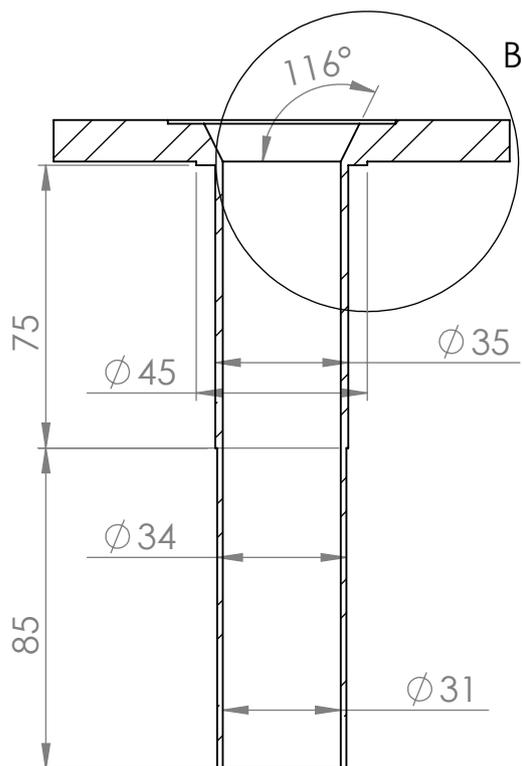
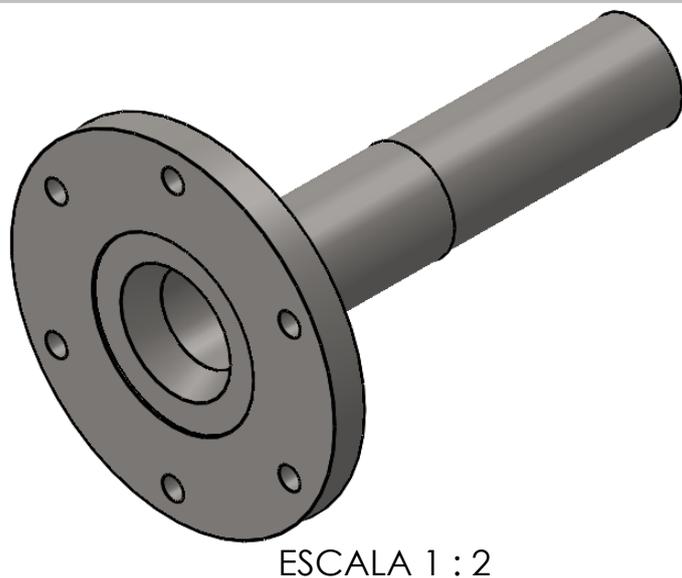
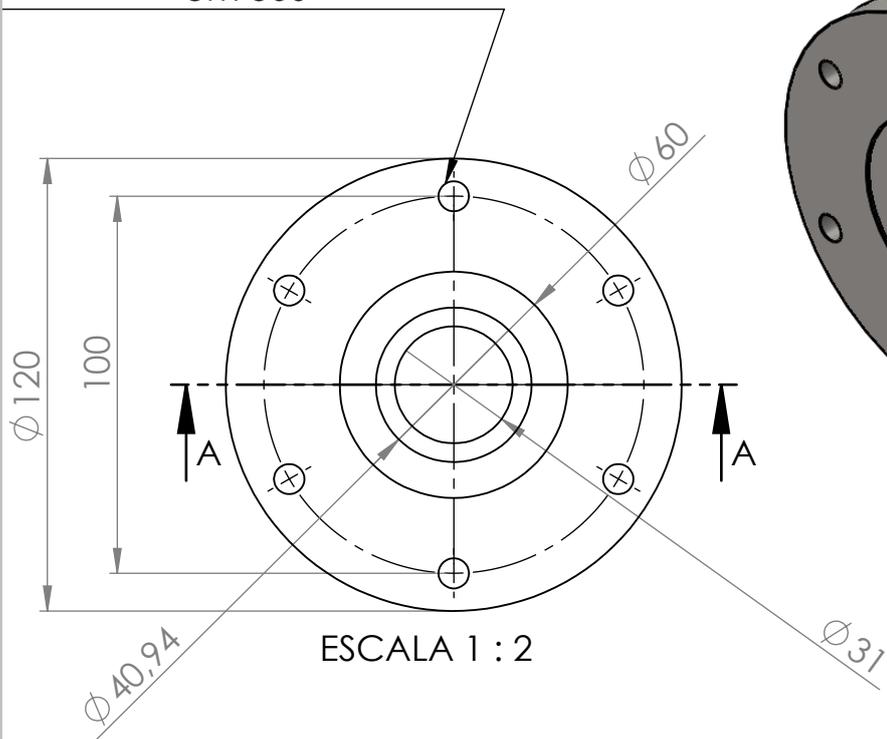


SEÇÃO A-A



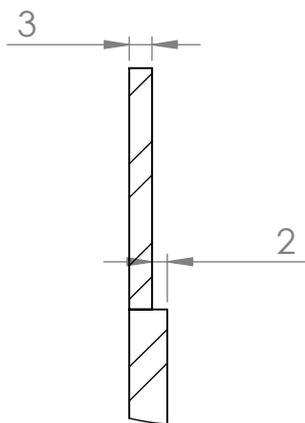
Obs:				CÓDIGO DO DESENHO: CLFPL1 - P056	
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Parafuso sem fim do alimentador	
VERIF.	Revisão				
APROV.	Supervisão				
VOLUME: 205000mm³		MATERIAL: Aço 1020		Nº DO DESENHO: P056	
QUANTIDADE: 2 unidades		MASSA : 1,6 kg		ESCALA:1:5	FOLHA 1 DE 1
				A4	

6 furos de $\phi 8$ mm passantes distribuídos igualmente em 360°

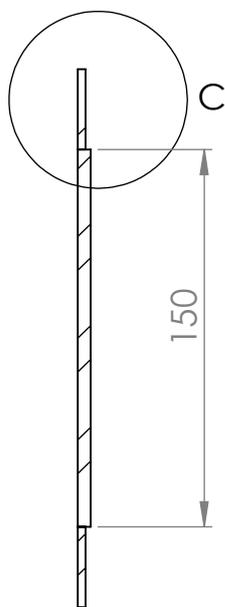
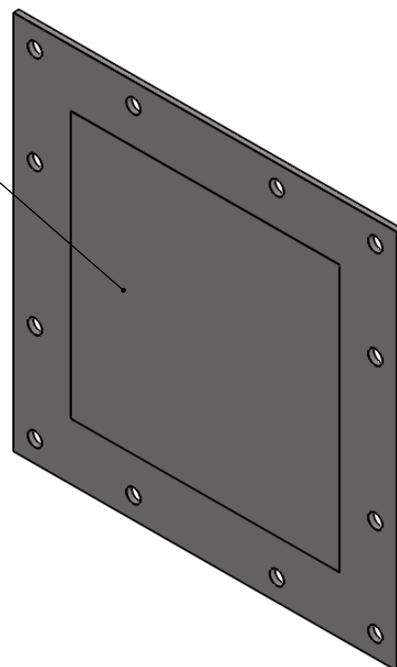


Obs:				CÓDIGO DO DESENHO: CLFPL1 - P012	
DES.	Desenho	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: CAMISA DE SACRIFÍCIO	
VERIF.	Revisão				
APROV.	Supervisão				
VOLUME: 138879 mm³		MATERIAL: AÇO 1020		Nº DO DESENHO: P012	
QUANTIDADE: 3 unidades		MASSA :1.098 kg		ESCALA:1:5	FOLHA 1 DE 1
A4					

Esta peça deve ser pintada externamente com tinta epóxi para metal.

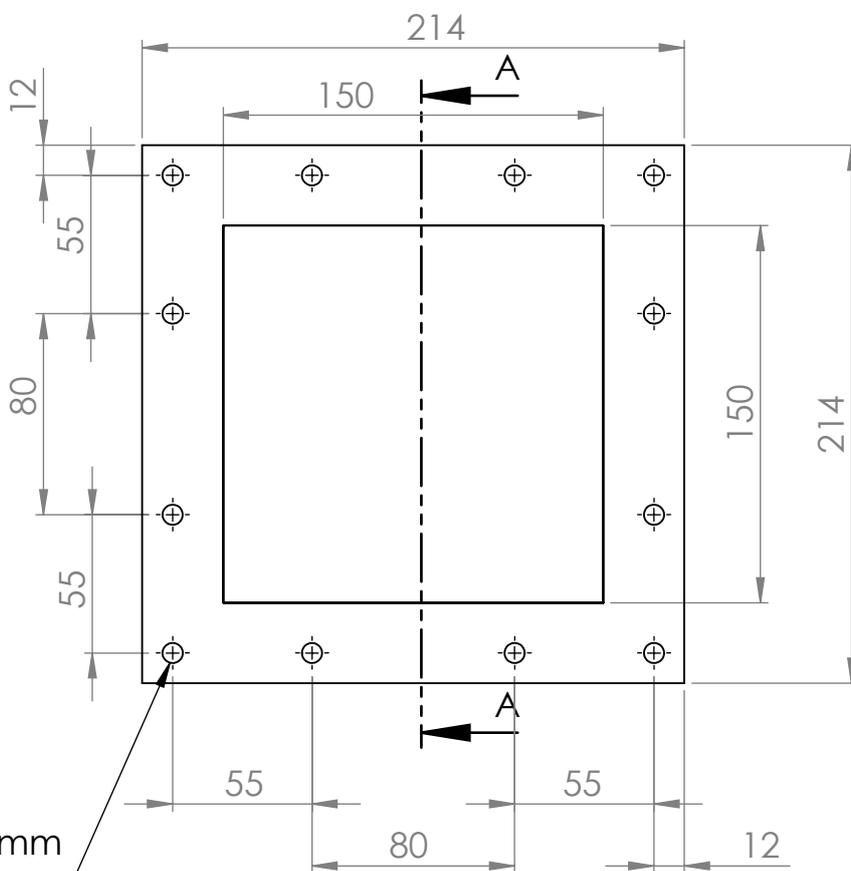


DETALHE C
ESCALA 1 : 1



SEÇÃO A-A
ESCALA 1 : 3

12 furos passantes de $\varnothing 8\text{mm}$



CÓDIGO DO DESENHO: CLFPL1 - P058

	NOME	ASSINATURA	DATA
DES.	Desenho		
VERIF.	Revisão		
APROV.	Supervisão		

TÍTULO: Tampa do silo

VOLUME: 180580mm³

MATERIAL: AÇO 1020

Nº DO DESENHO: P058

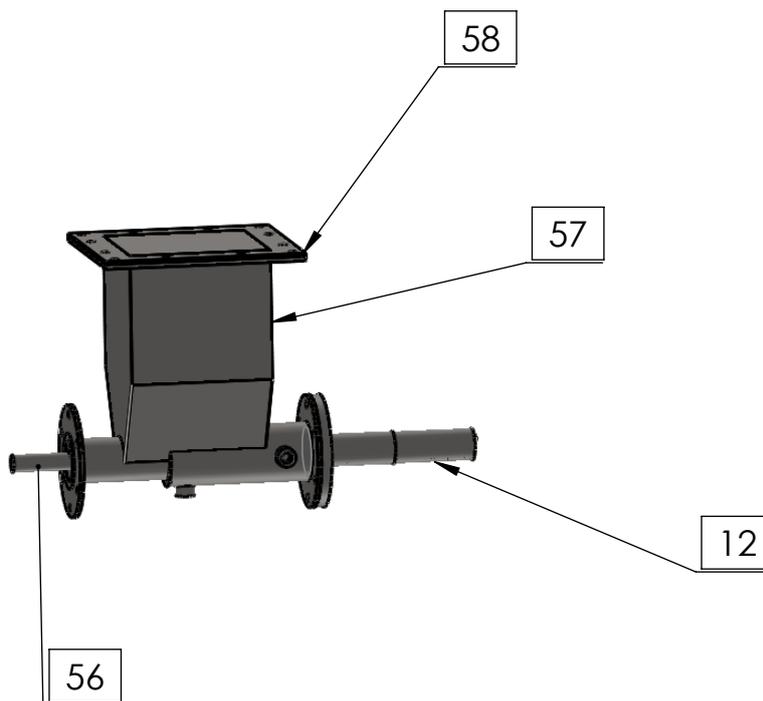
A4

QUANTIDADE:
2 unidades

MASSA :1426 g

ESCALA: 1:3

FOLHA 1 DE 1



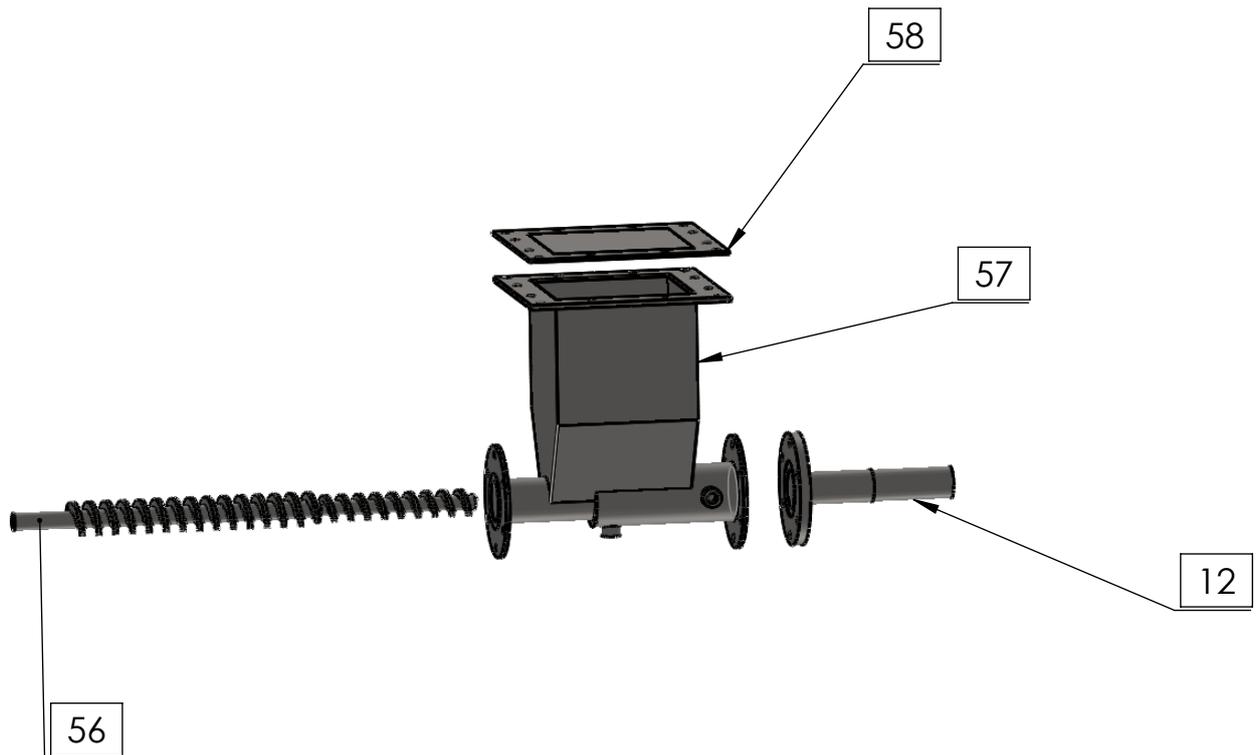
12 - CAMISA DE SACRIFÍCIO

56 - PARAFUSO SEM FIM DO ALIMENTADOR

57 - SEÇÃO DE ALIMENTAÇÃO E SILO

58 - TAMPA DO SILO

Obs:		 Laboratório de Combustão em Energias Renováveis		CÓDIGO DO DESENHO: CLFPL1 - MN09	
	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Montagem do Alimentador I	
DES.	Desenho				
VERIF.	Revisão				
APROV.	Supervisão				
VOLUME:		MATERIAL: AÇO 1020		Nº DO DESENHO: MN09	
QUANTIDADE:		MASSA :		ESCALA: 1:8	FOLHA 1 DE 1
					A4



12 - CAMISA DE SACRIFÍCIO

56 - PARAFUSO SEM FIM DO ALIMENTADOR

57 - SEÇÃO DE ALIMENTAÇÃO E SILO

58 - TAMPA DO SILO

Obs:				CÓDIGO DO DESENHO: CLFPL1 - MN09	
	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: Montagem do Alimentador I	
DES.	Desenho				
VERIF.	Revisão				
APROV.	Supervisão				
VOLUME:		MATERIAL: AÇO 1020		Nº DO DESENHO: MN09	
QUANTIDADE:		MASSA :		ESCALA: 1:8	FOLHA 1 DE 1
					A4