

FORNO PARA CARBONIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

WASHINGTON LUIZ VOGLIOTTI JERICÓ

Relatório Final da Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

BRAGANÇA
2020

FORNO PARA CARBONIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

WASHINGTON LUIZ VOGLIOTTI JERICÓ

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla Diplomação entre a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e o Instituto Politécnico de Bragança, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Eduardo Pinto
Castro Ribeiro

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo
Vasconcelos de Carvalho

BRAGANÇA

2020

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por ter me permitido sonhar e me dado a oportunidade de adentrar em uma Universidade Federal de qualidade e cursar Engenharia Mecânica. Além, é claro, de me dar forças para seguir em frente e superar as adversidades que surgiram ao longo dos anos. Gostaria de deixar um agradecimento especial para:

a minha mãe, Regina, meu exemplo de pessoa, que sempre acreditou em mim e me apoiou como meu alicerce para poder trilhar o caminho da graduação;

a minha noiva, Caroline, por todo o apoio e amor concedido nos últimos anos e por compartilhar do meu sonho extrapolando a barreira do nosso país natal para ficar ao meu lado em Portugal;

a minha família, que me deu coragem, conselhos, amor e sustento financeiro durante os anos de graduação, nunca deixando me faltar nada. Representados aqui pelos meus padrinhos Rita e José, pelos meus avós maternos Ilda e Luiz, pelos meus avós paternos Eudócia e Gilberto, pelos meus tios Eduardo, Gilcélia e Valéria, pela minha irmã Léa e pelo meu pai Gilberto;

ao meu orientador professor João Ribeiro pela paciência, sugestões e todo o auxílio prestado para a construção desta dissertação;

ao meu co-orientador, professor Marcelo, agradeço a oportunidade de participar da disciplina "Projeto Integrador", como também por todo o auxílio recebido desde minha passagem pela equipe UTFalcon *AeroDesign*;

aos meus amigos que me apoiaram nas adversidades da graduação; em especial ao meu irmão Lucas Garlet que acreditou nesse sonho de vir a Portugal para construirmos uma empresa e por todos os anos de parceria na graduação;

a Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao Instituto Politécnico de Bragança pela oportunidade de participar do programa de Dupla Diplomação.

ao Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), representado aqui pelo professor Luís Queijo e o técnico Jorge Paulo pelo apoio na construção do protótipo do forno.

ao Sr. André Seca do departamento de manutenção do IPB, por todas as ideias e conselhos para corrigir os problemas do forno e a motivação para continuarmos em frente;

aos Srs. João Condado e José Rocha da Escola Superior Agrária do IPB pela utilização do hangar para os ensaios do forno;

ao Laboratório de Processos Químicos (LPQ), representados pela professora Olga Ferreira e a sua técnica Maria João pelo apoio na condução dos ensaios de humidade e cinzas.

ao programa StartUp Voucher 2019/2020, vinculada ao StartUp Portugal cofinanciada pelo Iapmei, Compete 2020, Portugal 2020 e o Fundo Social Europeu, agradeço a disponibilização dos recursos que permitiram a construção do forno desta dissertação.

Dedico esse trabalho a todos que têm um sonho e que ainda não sabem que são capazes de realizá-lo.

RESUMO

O problema do destino dos resíduos sólidos urbanos tornou-se expressivo nos últimos anos, acompanhado pelo desenvolvimento industrial e conseqüentemente pela maior carga de resíduos gerados. Paralelo ao aumento da produção de resíduos, a alternativa de valorização energética através da pirólise e carbonização surge como oportunidade para novas fontes de energias renováveis. Utilizando como inspiração modelos de fornos de carbonização industriais, foi projetado e construído um forno para carbonização de resíduos sólidos urbanos de baixo custo para a realização de ensaios experimentais. O forno foi construído em aço S235JR, com a capacidade de processar 10 kg. Para tal, foi, inicialmente, estimado o balanço energético do forno, de seguida, foram projetados e fabricados alguns dos principais componentes mecânicos, todos os elementos normalizados foram selecionados por catálogo. Os ensaios experimentais foram conduzidos com resíduos urbanos e, do processo, foram extraídos carvão, bio-óleo, gás de síntese. Por fim, foi realizada a análise de humidade e cinzas do carvão, os baixos níveis de humidade evidenciaram a necessidade de adicionar aglomerante para peletizar, enquanto o alto teor de cinzas descartou a utilização dos pellets de carvão em caldeiras residenciais.

Palavras-chave: forno de carbonização, pirólise, resíduos sólidos urbanos.

ABSTRACT

The problem of the destination of solid urban waste has become significant in recent years, accompanied by industrial development and, consequently, by the greater load of waste generated. Parallel to the increase in waste production, the alternative of energy recovery through pyrolysis and carbonization appears as an opportunity for new sources of renewable energy. Using models of industrial carbonization furnaces as inspiration, a low-cost carbonization furnace for urban solid waste was designed and built to carry out experimental tests. The furnace was built in S235JR steel, with the capacity to process 10 kg. For this purpose, the energy balance of the furnace was initially estimated, then some of the main mechanical components were designed and manufactured, all standard elements were selected by catalog. The experimental tests were conducted with urban waste and, from the process, coal, bio-oil and synthesis gas were extracted. Finally, the analysis of moisture and coal ash was carried out, the low levels of humidity evidenced the need to add binder to pelletize, while the high ash content discarded the use of coal pellets in residential boilers.

Keywords: carbonization furnace, pyrolysis, municipal solid waste.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	4
1.1.1 Objetivos específicos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE	5
2.1 PIRÓLISE	5
2.1.1 Produtos da Pirólise	6
2.1.2 Classificação e Parâmetros de Influência na Pirólise	7
2.1.3 Tipo de reator.....	11
3 MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1 PRESSUPOSTOS:	15
3.2 BALANÇO ENERGÉTICO E ESTEQUIOMÉTRICO DA PIRÓLISE	16
3.2.1 Cálculos Balanço estequiométrico	19
3.2.2 Balanço de Calor	22
3.2.3 Perda de calor no forno	23
3.2.4 Efeitos da humidade nos produtos a pirrolisar	24
3.2.5 Balanço estequiométrico de combustão	25
3.3 DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA	28
3.3.1 Geometria da Fornalha	29
3.4 DETERMINAÇÃO DE ESPESSURA DO TAMBOR ROTATIVO SOB PRESSÃO EXTERNA	32
3.5 DILATAÇÃO ENTRE TAMBOR ROTATIVO E CAPA DO FORNO.....	34
3.6 SELEÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO E REDUTOR	34
3.7 CONTROLADOR DE VELOCIDADE	37
3.8 SELEÇÃO DA CORRENTE E DOS PINHÕES PARA CORRENTE	39
3.8.1 Seleção da corrente.....	39
3.8.2 Seleção do pinhão para corrente	41
3.9 EIXO PARA ACOPLAR PINHÃO MOVIDO	42

3.10	DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS NO ROLAMENTO DE APOIO DO TAMBOR	43
3.11	SELEÇÃO JUNTA ROTATIVA.....	48
3.12	JUNTA DE EMPANQUE PARA TAMPA DO TAMBOR ROTATIVO	49
3.13	SEGURANÇA NO TAMBOR ROTATIVO.....	50
3.14	GEOMETRIA DA BANCADA DE SUSTENTAÇÃO DO FORNO ..	50
3.15	CONSTRUÇÃO.....	54
4	RESULTADOS	58
4.1	MONTAGEM NO <i>SOLIDWORKS</i>	58
4.2	CONSTRUÇÃO	63
4.3	PRODUTOS DO FORNO CARBONIZADOR.....	67
4.4	ENSAIOS QUÍMICOS	70
4.5	PELETIZAÇÃO DO PÓ DE CARVÃO.....	72
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	73
5.1	CONCLUSÃO	73
5.2	TRABALHOS FUTUROS	74
6	BIBLIOGRAFIA	76
7	ANEXOS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pirólise em uma partícula de biomassa (Adaptado de [8]).....	6
Figura 2 - Liberação de gases durante a destilação a seco da madeira (Adaptado de [8]).....	10
Figura 3 - Rendimento de carvão de pirólise de madeira bétula em função da temperatura [8].....	10
Figura 4 - Diagrama de fluxo esquemático de um sistema de pirólise para geração de energia [14]	17
Figura 5 - Diagrama de equilíbrio de calor em torno de um forno de pirólise [14].....	18
Figura 6 - Soprador de ar selecionado com caudal de 70m ³ /h [19].....	28
Figura 7 - Geometria da capa do forno com a câmara de combustão	31
Figura 8 - Catálogo de motores trifásicos IV pólos com rotação até 1500 rpm [32] ..	37
Figura 9 - Catálogo de redutores [33].....	37
Figura 10 - Inversor de frequência J7 [34].....	38
Figura 11 - Catálogo corrente simples padrão DIN8187 [36]	41
Figura 12 - Catálogo pinhão para corrente de rolos padrão DIN8187 [37].....	42
Figura 13 - Viga representando o conjunto: tambor rotativo com suas tampas carga de resíduos dentro do tambor e a carga de acionamento	45
Figura 14 - Os 4 roletes que sustentam o tambor rotativo	46
Figura 15 - Par de rolamento em um rolete.....	46
Figura 16 - Catálogo iterativo de rolamento de esferas SKF [42].....	48
Figura 17 - Catálogo junta rotativa para altas temperaturas (Adaptado de [44]).....	49
Figura 18 - Seleção de cordão de empanque do catálogo da Vamiel [45]	50
Figura 19 - Exemplo de montagem [46]	50
Figura 20 - Geometria da bancada.....	51
Figura 21 - Malha da estrutura	52
Figura 22 - Força dividida nos roletes encontradas em 3.10.....	52
Figura 23 - Pressão devido a força peso da capa do forno sob as laterais da mesa	53
Figura 24 - Apoio fixo (em azul) sob os 4 pés da bancada	53
Figura 25 - Deslocamento máximo na bancada	54
Figura 26 - Tensão máxima equivalente de von-Mises na bancada.	54

Figura 27 - Máquina de solda MIG 453 modular	55
Figura 28 - Furadora de bancada EFI Portugal modelo FJR N° 2.....	55
Figura 29 - Serrote de fita Optimum modelo S181	56
Figura 30 - Guilhotina Guifil modelo mini 320.....	56
Figura 31 - Máquina de corte a plasma Air Cutter LG-60.....	57
Figura 32 - Rebarbadora	57
Figura 33 - Forno carbonizador com seus componentes principais	59
Figura 34 - Tampa de entrada de RSU com sistema de segurança composto por manômetro e válvula de alívio de pressão manual, conforme descrito no item 3.12.59	
Figura 35 - Tambor rotativo apoiado sobre 4 roletes (A) e o eixo de transmissão (B), conforme itens 3.10 e 3.9 respectivamente.....	60
Figura 36 - Montagem do conjunto rolete.....	60
Figura 37 - Conjunto de acionamento conforme itens 3.6 e 3.7	61
Figura 38 - Alhetas para movimentação do RSU dentro do tambor rotativo, conforme item 3.4	61
Figura 39 - Capa do forno com a abertura da porta de entrada de combustível e sua gaveta de cinzas	62
Figura 40 - Vista em corte da capa do forno	62
Figura 41 - Vista traseira do forno evidenciando a localização do soprador, conforme item 3.2.5.1.....	63
Figura 42 - Fabricação da capa do Forno	63
Figura 43 - Pós soldagem das aletas no tambor rotativo a), soldagem da bancada b), posicionamento da capa do forno sobre a bancada c), pós soldagem da capa do forno com posicionamento do	64
Figura 44 - Bancada montada a), montagem conjunto de acionamento b), inserção da chaminé c), inserção do soprador d).	65
Figura 45 - Etapas de construção, em a) nota-se as chapas refratárias, os roletes posicionados e a grelha, em b) evidencia o mecanismo confeccionado pelo autor e seu parceiro Lucas para corte circular no plasma disponibilizado pelo LTM, c) mostra as soldagem das flanges para fixar a nova tampa, d) nova tampa e e) sistema de segurança da nova tampa.....	66
Figura 46 - Ensaio com RSU do forno Carbonizador, nota-se a utilização de lã mineral para reter calor dentro da capa da fornalha (conforme descrito em 3.2.3)...	67

Figura 47 - Tambor rotativo em a) com o bagaço seco da azeitona e em b) com os resíduos indiferenciados do aterro de Urjais	68
Figura 48 - Produtos do ensaio no forno carbonizador, em a) nota-se o acúmulo de pó de carvão de RSU sobre as aletas do tambor e nota-se pedaços metálicos de alumínio derivados de caixa de leite padrão <i>Tetra Pak</i> , em b) apresenta o carvão obtido do bagaço da azeite	69
Figura 49 - Equipamentos utilizados nos ensaios no laboratório de química do IPB, a) balança de precisão, b) estufa para determinação de humidade com secagem a 105°C, c) mufla para determinação de cinzas com temperatura de 500°C.....	71
Figura 50 - Pellets confeccionados a partir do carvão obtido no forno carbonizador	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de alguns processos de pirólise (Adaptado de [8]).....	9
Tabela 2 - Reatores e sistemas de pirólise de RSU típicos na literatura (Adaptado de [11])	13
Tabela 3 - Determinação da fórmula de composição da unidade de madeira e carvão vegetal.....	20
Tabela 4 - Fórmula de reação de pirólise de carvalho Mizunara obtida por cálculo estequiométrico [14]	20
Tabela 5 - Balanço de átomos de carvão e produtos gasosos [14]	21
Tabela 6 - Valores calculados relacionados ao balanço de calor em torno de um forno em pirólise a 773 K * (Adaptado de [14]).....	23
Tabela 7 - Calor adicional necessário para pirólise de madeira com 20% em peso de umidade *1 (Adaptado de [14]).....	25
Tabela 8 - Dados para construção da equação estequiométrica (Adaptado de [16])	26
Tabela 9 - Relações de excesso de ar de acordo com combustível [17]	27
Tabela 10 - Propriedade termofísica do ar a pressão atmosférica [18]	27
Tabela 11 - Dados para projecto da fornalha	29
Tabela 12 - Dados para projecto	31
Tabela 13 - Dados para cálculo da pressão admissível P_a	33
Tabela 14 - Dados para cálculo da dilatação térmica.....	34
Tabela 15 - Dados para dimensionamento do motor	36
Tabela 16 - Dados ensaios com tacômetro	38
Tabela 17 - Dados para seleção da corrente	40
Tabela 18 - Dados para cálculo tensão de cisalhamento no eixo com o pinhão movido.....	43
Tabela 19 - Dados para cálculo das forças	44
Tabela 20 - Dados para cálculo da carga dinâmica no rolamento.....	47

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ABRELPE.	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
A_I	Área da superfície inferior do forno
A_S	Área da superfície superior do forno
ASME	Sociedade Norte-americana de Engenheiros Mecânico
A_T	Área total da superfície do forno
A_V	Área da superfície vertical do forno
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
C_{pmi}	Capacidade média calor a pressão constante
C_{reator}	Comprimento do reator
D_{reator}	Diâmetro do reator
\overline{d}_{RSU}	Densidade média do RSU
h_c	Perda de calor por convecção natural
H_E	Calor externo necessário para a pirólise
H_{HF}	Poder Calorífico Superior de alimentação (matéria-prima)
H_{HP}	Poder Calorífico Superior total dos produtos
H_L	Perda de calor no forno
H_{LP}	Calor latente dos produtos líquidos
h_r	Perda de calor por radiação
H_S	Calor sensível total
H_{SF}	Calor sensível de alimentação (matéria-prima)
H_{SP}	Calor sensível total dos produtos
\dot{m}_{comb}	Vazão mássica de combustível
m_{RSU}	Massa de RSU
n_i	Quantidade molar do produto i
$PCI_{carvão\ RSU}$	Poder calorífico inferior do carvão de RSU
PCS	Poder calorífico superior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos

$t_{\text{aquecimento}}$	Tempo de aquecimento
T_p	Temperatura de pirólise
T_0	Temperatura ambiente
V_{reator}	Volume do reator
V_{RSU}	Volume do RSU

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

A conscientização ambiental frente aos impactos advindos do uso indiscriminado de combustíveis fósseis ocasionou o avanço de alternativas para o fornecimento energético mundial. Segundo Irena [1], desde 2012, a instalação de capacidade de energias renováveis ultrapassou, de forma crescente, a instalação das não renováveis. O aumento é devido, essencialmente, à expansão da energia eólica e solar [2].

No Brasil, o cenário de utilização de energias renováveis para a matriz elétrica é promissor visto a sua utilização histórica da energia hidráulica. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018, mais de 80% da matriz de energia elétrica brasileira é renovável, com a contribuição hidráulica, na casa dos 65%. Entretanto, a expansão da energia hidráulica acarreta impactos ambientais tais como inundações de grandes áreas e requer um custo de investimento alto [3].

Paralelo ao desafio energético, o Brasil enfrenta outra adversidade no que se refere ao destino de resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), no ano de 2017 foram geradas, aproximadamente, 214000 ton/dia de resíduos sólidos, sendo que 40,9% destes resíduos são destinados a lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessárias para proteção do meio ambiente contra danos e degradações [4].

A Lei Federal brasileira número 12.305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabeleceu regras e metas para a solução dos problemas que envolvem esta temática. Segundo a lei, os municípios brasileiros terão a obrigação de destinar e dispor adequadamente seus resíduos [5].

De acordo com o Art. 3º, Inciso VII, da referida lei a disposição adequada é definida por:

[...] destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes [...] entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos [5].

Tendo como base o cenário de aproveitamento energético, existem duas alternativas principais para a extração de energia de resíduos sólidos, difundidas mundialmente.

A ***gaseificação***, presente em aterros sanitários modernos com reaproveitamento do biogás gerado pela decomposição anaeróbica da fração orgânica presente nos resíduos.

A ***combustão***, que trata termicamente os resíduos, para diminuir o seu volume, aproveitando o calor para geração de energia.

Nos últimos anos, uma terceira alternativa, difundida entre os produtores de carvão vegetal, tem sido constantemente estudada e utilizada para o tratamento de RSU, também conhecida como técnica da ***pirólise***. Basicamente, esta técnica consiste em tratar termicamente os resíduos numa atmosfera inerte ou com baixo valor de oxigênio, onde o resíduo não entra em contato com o fogo. Como subprodutos do processo de pirólise, podem ser obtidos carvão, bio-óleo e gás de síntese. Todos possuem poder calorífico elevado e podem ser utilizados como combustíveis ou matéria-prima para indústria de transformação.

Importantes avanços foram alcançados, nos últimos anos, ao redor do mundo com a utilização da pirólise, destaque-se a patente de invenção número 1001690-2 A2, sob titularidade do Eng. José Railton Souza de Lima que consiste em um forno carbonizador de resíduos sólidos urbanos, que está ativo em uma usina de tratamento de RSU na cidade de Unaí em Minas Gerais – Brasil [6]. Com sua invenção, Lima [7] afirma que para cada cinco toneladas de resíduos são obtidos, aproximadamente:

- Óleo vegetal – 32 litros
- Água ácida – 18 litros

- Lignina – 12 litros
- Alcatrão – 18 litros
- Pó de carvão – 2 toneladas

Além dos produtos citados acima, Lima [6] afirma, por meio de testes, que o poder calorífico inferior do carvão produzido por sua invenção encontra-se no intervalo de 14 a 27 MJ/kg, próximos dos poderes caloríficos citados por Basu [8].

Todavia, a utilização da pirólise para aproveitamento térmico de RSU requer elevado custo de investimento inicial e, até ao momento de escrita desta dissertação, não são difundidas em larga escala. Tampouco existe metodologia *open source* para o projeto de fornos de pirólise para tratar RSU. Diante deste fato, esta dissertação de mestrado destina-se ao projeto mecânico e construção de um forno carbonizador de resíduos sólidos urbanos.

O forno estará direcionado para aplicações em pequena escala com o intuito de obtenção de carvão para, futuramente, ser utilizado como matéria-prima na *StartUp Energie*. Esta *StartUp* do qual o autor será cofundador, está vinculada ao programa *StartUp Voucher 2020 & StartUp Portugal* e é cofinanciada pelo Iapmei, Compete 2020, Portugal 2020 e o Fundo Social Europeu.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é o de dimensionar e projetar os elementos mecânicos, bem com, construir um forno, considerando fatores como a facilidade de construção, manutenção e custos, para realizar a carbonização de 10 kg resíduos sólidos urbanos. O forno será destinado a um número limitado de ensaios, conduzidos sob a tutela da StartUp Energie, do qual o autor será co-fundador.

1.1.1 Objetivos específicos

- Elaborar uma revisão da literatura sobre pirólise e modelos de fornos de pirólise.
- Realizar uma estimativa da quantidade de calor a ser fornecida na fornalha.
- Projetar o tambor rotativo, de acordo com a norma ASME para vasos de pressão submetidos a pressão externa.
- Dimensionar e projetar o sistema de acionamento do tambor rotativo.
- Seleção de itens periféricos do forno em catálogos.
- Dimensionar uma bancada para acoplar toda a estrutura.
- Construir o forno e corrigir possíveis problemas.
- Testar o forno com resíduos sólidos urbanos.
- Estimar a humidade e cinzas do carvão produzido.

Capítulo 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E ESTADO DA ARTE

Antes de iniciar a metodologia de projeto do forno, é necessário definir e caracterizar o processo da pirólise, conhecer quais os produtos extraídos, as características que influenciam a pirólise e fornos (ou reatores) referidos na literatura; para, então, determinar os *inputs* do projeto mecânico.

2.1 Pirólise

De acordo com Williams [9], a pirólise caracteriza-se pelo aquecimento de biomassa em ambiente com ausência ou com os menores níveis possíveis de oxigênio, até certa temperatura, chamada temperatura de pirólise, por um determinado período. Os produtos da pirólise variam de acordo com diversos fatores como a **taxa de aquecimento**, a **temperatura de pirólise** e o **tempo de permanência no forno**.

Como pode ser observado na Figura 1, do processo de pirólise em uma partícula inicialmente são extraídos carvão sólido, gás não condensável e gás condensável chamado de alcatrão. O alcatrão pode ser quebrado em carvão, gases permanentes não condensáveis como CO, CO₂, CH₄ e H₂ e uma parte líquida denominada bio-óleo que contém teores de água [8].

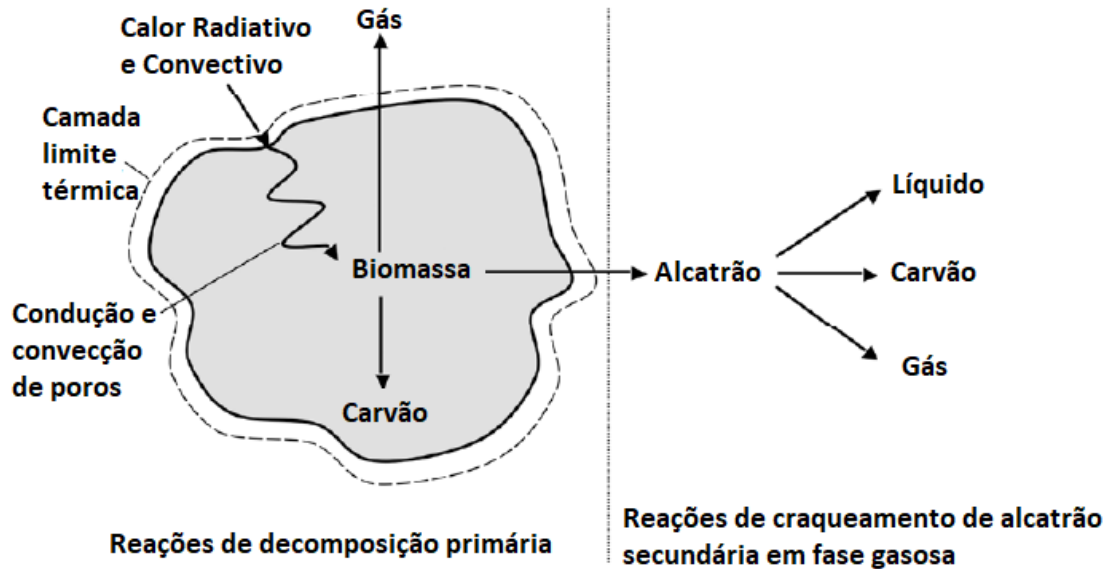
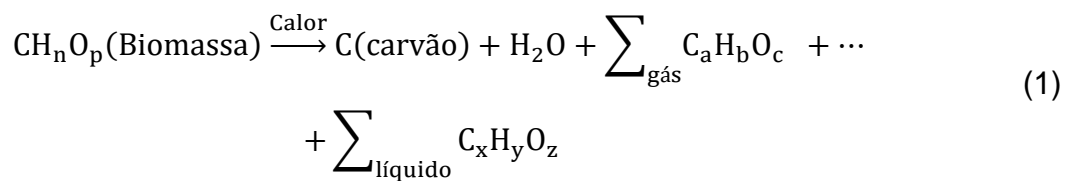


Figura 1 - Pirólise em uma partícula de biomassa (Adaptado de [8]).

O processo de pirólise pode ser representado pela Equação 1, conforme exposta por Basu [8].



2.1.1 Produtos da Pirólise

Os produtos da pirólise são obtidos através da quebra de ligações de grandes cadeias de compostos orgânicos e podem ser segregados em três principais produtos:

2.1.1.1 Carvão

Rendimento sólido da pirólise, constituído por carbono (~85%), mas pode conter um pouco de oxigênio e hidrogênio. O poder calorífico inferior pode chegar a 33,6 MJ/kg de acordo com Czajczyńska [10].

2.1.1.2 Bio-óleo

Rendimento líquido da pirólise, também conhecido como alcatrão, mantém uma percentagem de até 20% de água. Czajczyńska [10] afirma que a composição do bio-óleo é atrelada à composição de sua matéria-prima formadora e pode conter substâncias como ácidos, açúcares, álcoois, cetonas, aldeídos, fenóis e seus derivados, furanos e outros compostos mistos oxigenados. Seu poder calorífico inferior situa-se entre 15 a 20 MJ/kg para biomassa, podendo chegar de 30 a 45 MJ/kg para a pirólise de plásticos.

2.1.1.3 Gás de síntese

A decomposição térmica primária da pirólise produz dois tipos de gases: condensáveis (vapor) e não condensáveis (gás primário). Os vapores são condensáveis por um sistema como um condensador e transformados em bio-óleo e água.

Os não condensáveis, de acordo com Basu [8] são formados por uma mistura de menor peso molecular que inclui monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, etano e etileno. Durante o processo de pirólise ocorrem reações secundárias que promovem o craqueamento térmico do vapor em gases não condensáveis.

O poder calorífico inferior dos gases primários pode chegar a 11MJ/Nm³, enquanto com a mistura dos gases secundários esse valor pode chegar a 20MJ/Nm³.

2.1.2 Classificação e Parâmetros de Influência na Pirólise

Existem vários tipos de pirólise e estes são dependentes de fatores como a *taxa de aquecimento*, *temperatura de pirólise*, *tempo de permanência*, *meio reacional* e *tamanho da partícula*. Basu [8] classifica os tipos de pirólise em lenta ou rápida com base na taxa de aquecimento.

Basicamente, se o tempo de aquecimento ($t_{\text{aquecimento}}$) for muito maior que o tempo de permanência na temperatura de pirólise (T_p) é considerado pirólise lenta e o contrário seria a pirólise rápida.

A pirólise lenta ou rápida, geralmente, ocorre sem um meio reacional. Todavia, Basu [8] também menciona outras variantes para classificar a pirólise, de acordo com o meio específico empregado.

Além das categorias mencionadas acima, é possível classificar a pirólise de acordo com o tamanho das partículas. Chen, D., et al [8] mencionam que, quanto menor a partícula, maior será sua área superficial e, desse modo, a taxa de aquecimento é maior, proporcionando o craqueamento térmico acelerado das partículas e aumento do rendimento de gases e líquidos.

2.1.2.1 Pirólise Lenta

A pirólise lenta pode ser dividida em carbonização e pirólise convencional, de acordo com o exposto por Basu [8]. Na Carbonização, o objetivo é a maximizar a obtenção de carvão, onde a temperatura empregada é $\sim 400^\circ\text{C}$ e o tempo de permanência é longo. Esta técnica é muito difundida para obtenção do carvão vegetal.

Na pirólise convencional, a temperatura empregada é de $\sim 600^\circ\text{C}$ e o tempo de permanência na ordem de minutos. Como subprodutos pode-se obter carvão, bio-óleo e gás de síntese.

2.1.2.2 Pirólise Rápida

O principal objetivo da pirólise rápida é a obtenção de bio-óleo. Para isso Basu [8] menciona que se deve utilizar um tempo de aquecimento rápido o suficiente para a biomassa atingir a temperatura de pirólise sem se decompor. A taxa de aquecimento varia na faixa de 1000 a 10000 $^\circ\text{C/s}$ com a temperatura de pirólise abaixo de 650°C para obter o bio-óleo.

2.1.2.3 Pirólise Instantânea

É semelhante a pirólise rápida, mas se diferencia desta por taxas de aquecimento e tempo de residência dos vapores dentro da zona de pirólise menores, o que proporciona a obtenção de bio-óleo e gás de síntese, de acordo com Basu [8].

2.1.2.4 Pirólise Ultra Rápida

Caracteriza-se pela presença de um sólido portador de calor que é misturado à biomassa para proporcionar taxas de transferência de calor elevadas e consequentemente altas taxas de aquecimento. Os produtos primários são expelidos do reator rapidamente e a temperatura de pirólise é próxima de 1000°C. Seu objetivo é a extração de químicos e gases, afirma Basu [8].

2.1.2.5 Pirólise na Presença de um Meio

Por norma a pirólise caracteriza-se por ocorrer na ausência de um meio. Todavia, há um tipo de pirólise que utiliza a água ou hidrogênio como meio reacional, afirma Basu [8]. A água ou o hidrogênio são introduzidos a alta pressão durante a realização do processo de pirólise, com o objetivo de maximização de gases ou outros produtos químicos. A Tabela 1 sintetiza os processos mencionados acima.

Tabela 1 - Características de alguns processos de pirólise (Adaptado de [8])

Processo Pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura Final (°C)	Produtos
Carbonização	Dias	Muito baixa	400	Carvão
Convencional	5-30 min	baixa	600	Carvão, bio-óleo e gás
Rápida	<2 s	Muito Alta	~500	Bio-óleo
Instantânea	<1 s	Alta	<650	Bio-óleo, químicos, gás
Ultra-rápida	<0,5 s	Muito Alta	~1000	Químicos, gás
Vácuo	<2 – 30 s	Média	400	Bio-óleo
Hidro pirólise	<10 s	Alta	<500	Bio-óleo

2.1.2.6 Influência da Temperatura de Pirólise

A temperatura de pirólise influencia diretamente da proporção de produtos extraídos do processo, tanto no que diz respeito a produtos gasosos, conforme a Figura 2, como em produtos sólidos (Figura 3).

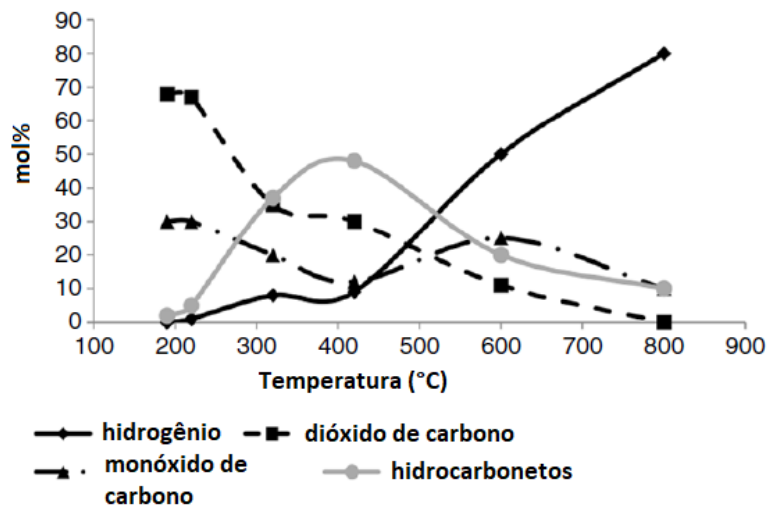


Figura 2 - Liberação de gases durante a destilação a seco da madeira (Adaptado de [8]).

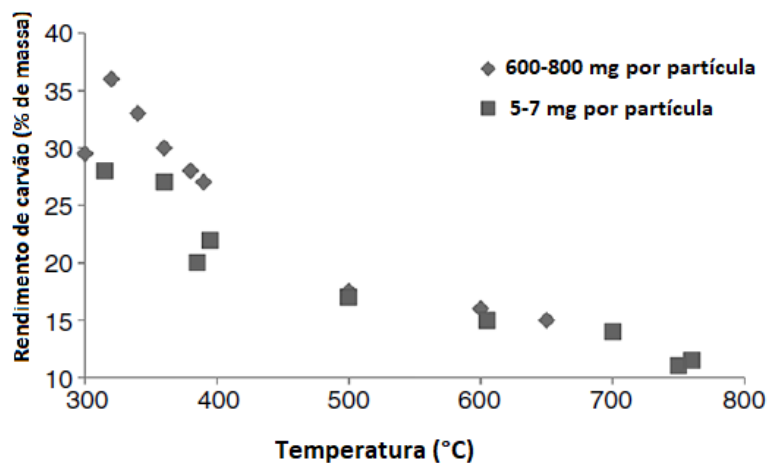


Figura 3 - Rendimento de carvão de pirólise de madeira bétula em função da temperatura [8]

Nota-se que o rendimento de carvão da pirólise diminui à medida que aumenta a temperatura.

2.1.2.7 Influência da Taxa de Aquecimento

A taxa de aquecimento das partículas de biomassa tem influência importante no processo de acordo com Basu [8], onde aquecimento rápido a uma temperatura moderada (400~600°C) produz voláteis mais pesados (mais líquidos) e se a taxa de aquecimento for lenta, propicia a formação de carvão.

Todavia, a taxa de aquecimento sozinha não define o produto, é preciso atentar-se ao *tempo de residência* do produto no reator. Durante o aquecimento lento a remoção lenta dos voláteis propicia uma reação secundária entre as partículas gasosas e o carvão, levando a formação de carvão secundário [8].

2.1.3 Tipo de reator

Existem diversos tipos de reatores utilizados para pirólise de resíduos sólidos urbanos. Chen, D., et al [11] promoveu uma revisão dos principais tipos. Ele afirma que os reatores de pirólise de RSU relatados na literatura são principalmente reatores de leito fixo, fornos rotativos e reatores de leito fluidizado, conforme mostrado na Tabela 2; eles estão em uma sequência em ordem crescente de acordo com taxa de aquecimento.

Os reatores de leito fluidizado são caracterizados com coeficiente de transferência de calor muito alto, mas poucos relatórios estão disponíveis sobre os coeficientes de transferência de calor para pirólise de RSU em fornos rotativos e reatores de leito fixo, pois eles são afetados por muitos fatores, além de que também integram o know-how privado das empresas para projetar e operar reatores de pirólise.

Reatores de leito fixo são caracterizados por possuírem baixa taxa de aquecimento, e, conseqüentemente, baixo coeficiente de transferência de calor. Seu carácter ineficiente não o torna adequado para aplicações industriais porque a temperatura não é uniforme na amostra de RSU [12].

De acordo com Chen, D., et al. [11] o movimento lento de rotação em fornos rotativos propicia uma boa mistura dos resíduos e, conseqüentemente, boa troca de calor, tornando-o mais eficiente que o reator de leito fixo.

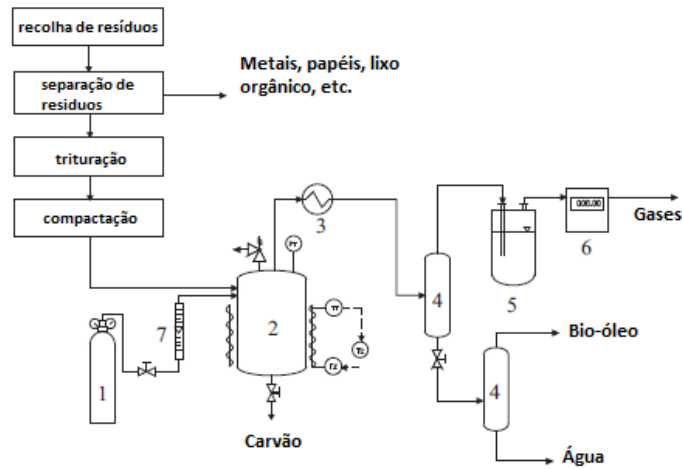
São utilizados para pirólise convencional com taxas de aquecimento lentas, suas vantagens são apresentadas no fato de aceitarem diferenciados tamanhos de partículas o que proporciona a alimentação de resíduos heterogênea, ajuste flexível do tempo de residência e manutenção simples. Devido aos fatores expostos, são utilizados na maioria das tecnologias para tratamento de RSU.

Para o caso do reator de leito-fluidizado, Chen, D., et al. [11] afirmam que são reatores com alta taxa de aquecimento e são utilizados para descrever parâmetros como temperatura e tempo de residência, proporcionando o tratamento via pirólise rápida e instantânea.

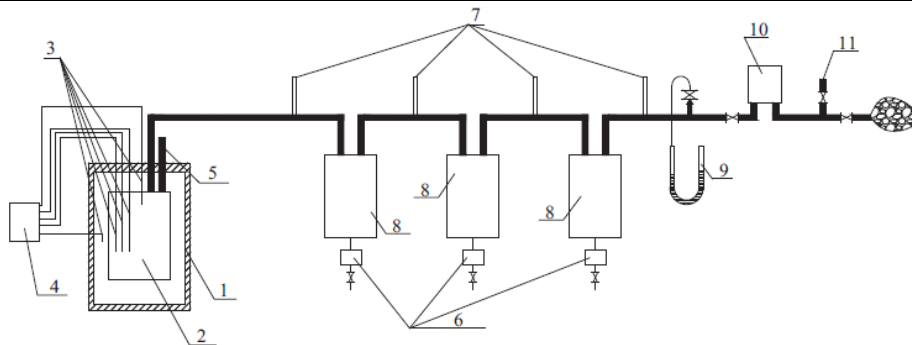
Sua aplicação industrial para pirólise de RSU não é comum devido as complicações e custos advindos da separação do material da cama do carvão, junto com seu aquecimento externo e recirculação. Além das complicações mencionadas, requer alimentação de produto uniforme, sendo, portanto, utilizado para tratamento de resíduos poliméricos.

Tabela 2 - Reatores e sistemas de pirólise de RSU típicos na literatura (Adaptado de [11])

(continua)



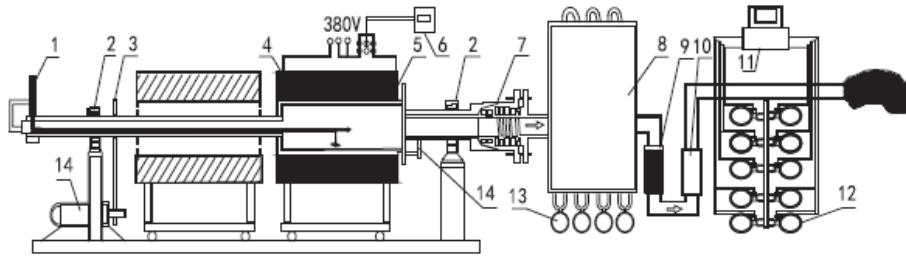
Reator de leito fixo e sistema de pirólise (1- cilindro N₂; 2-reator; 3-trocador de calor; 4-unidade de separação, 5-água-sifão; 6-medidor de fluxo de gás; 7-rotâmetro)



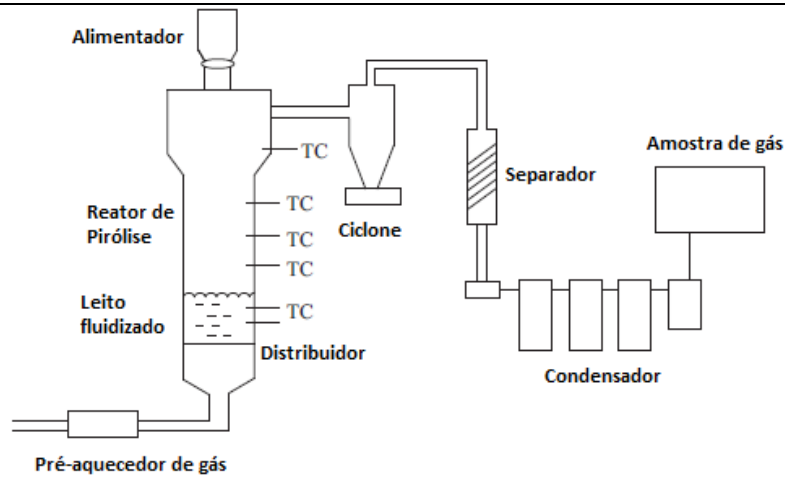
Sistema de pirólise de leito fixo (1-forno; 2- reator de pirólise; 3-termopar; 4-controlador de temperatura; 5- cilindro N₂; 6-tanque de coleta de líquido; 7-termômetro; 8-condensador; 9-manômetro; 10-amostragem ventilação)

Tabela 2 - Reatores e sistemas de pirólise de RSU típicos na literatura (Adaptado de [11])

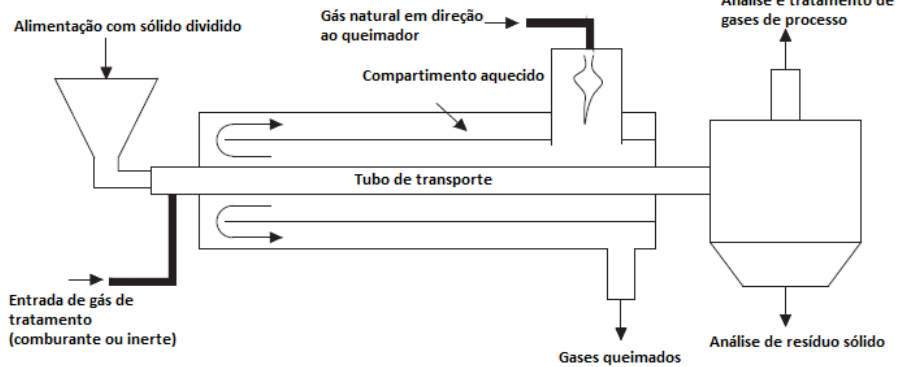
(continuação)



Sistema de pirólise de forno rotativo (1 - termômetro; 2 - rolamentos; 3 - transmissão de engrenagens; 4 - Fornos elétricos; 5 - Forno rotativo; 6 - Controlador de temperatura; 7 - selo; 8 - Condensador de duas etapas; 9 - Filtros; 10 - Medidor de vazão; 11 computadores; 12 - Dispositivo de amostragem de gases; 13 - abertura de alimentação de descarga; 14 - dispositivo de ajuste de velocidades)



Sistema de Pirólise de leito fluidizado



Esquema funcional da conversão termoquímica do tubo de transporte

Capítulo 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PRESSUPOSTOS:

- Forno para processar 10 kg de resíduos sem se preocupar com sua heterogeneidade, com o intuito de fornecer carvão e bio-óleo para trabalhos futuros da StartUp Energie.
- Não está no escopo deste projeto a preocupação com a eficiência térmica e as questões relativas à transferência de calor - forno funcional e de baixo custo é, nesta fase preliminar, preferível a um forno, teóricamente, otimizado.
- Ausência de informações sobre as características dos resíduos. Logo não será realizada análise aprofundada do comportamento termoquímico das partículas.
- O forno desenvolvido e contruído nesta dissertação, foi baseado na patente de invenção número 1001690-2 A2, que consta na base de dados do INPI Brasil, bem como alguns dados advindos do forno rotativo de interesse desta patente que está funcionando na cidade de Unaí – Minas Gerais – Brasil.
- O projeto do sistema de condensação não faz parte do escopo do trabalho.
- O forno opera sob pressão de 20 kPa e temperatura entre 300 a 500 °C.

Para o início do projeto, deve ser estimada a quantidade de calor necessária a ser fornecida na fornalha para pirolisar 10 kg de resíduos. O grau de dificuldade para mensurar este valor está presente no fato de que os resíduos sólidos urbanos são heterogêneos. Sua proporção depende do tipo de comunidade, dos rendimentos e estilos de vida de seus consumidores, e seu grau de industrialização, institucionalismo e comercialismo. Ainda, períodos do ano com maior precipitação acrescentam umidade aos resíduos, o que modifica o balanço energético [10].

Paralelo às informações expostas acima, existem diversas referências que tratam sobre a análise térmica em fornos rotativos. A obra *Rotary Kilns* do autor Akwasi Boateng [13] é um exemplo. Contudo, cobre a transferência de calor com muitos detalhes e, para este trabalho, é necessária apenas uma análise a um nível macroscópico.

A partir das considerações elencadas, o problema de determinação energética passou a ser abordado como um problema de equilíbrio de energia.

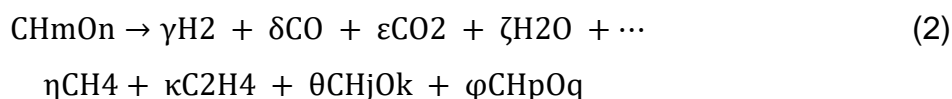
Optou-se, então, por estimar a quantidade de energia necessária para pirolisar uma matéria prima cujas características químicas e físicas eram conhecidas, e comparar com a quantidade de calor fornecida pelo carvão utilizado para o processo de pirólise. Deste modo, quantificar a quantidade de carvão necessária na fornalha para tornar esses números equivalentes.

3.2 BALANÇO ENERGÉTICO E ESTEQUIOMÉTRICO DA PIRÓLISE

O balanço energético foi desenvolvido considerando a pirólise de madeira de carvalho *Mizunara* utilizado na metodologia descrita por Koderá [14], que leva em consideração uma estimativa do calor de pirólise, calor sensível e latente dos produtos, calor para humidade e perda de calor em uma fornalha. Foi utilizado o balanço estequiométrico para escrever as fórmulas composicionais médias.

Para as amostras de madeira descritas por Koderá [14], a fórmula composicional média foi de C: 48,86, H: 5,96, O: 44,85, Cinzas 0,33. A fórmula composicional média foi convertida em razão de número de átomos dividindo a percentagem, em peso, pelo peso atômico do elemento para dar C: 4,068, H: 5,90, O: 2,803. Desta forma, dividindo a razão de número de átomos por 4,068, temos a fórmula química para a madeira $CH_{1.46}O_{0.689}$, com peso atômico de 24,51 g/mol.

Durante a pirólise da madeira são produzidos carvão, bio-óleo, água e vários produtos gasosos. Fixando o átomo de carbono de alimentação como uma mol, a pirólise da madeira pode ser representada de acordo com a Equação 2.



Na Equação 2, as macromoléculas foram expressas por "Fórmula de composição média" com um átomo de carbono, para exemplo, CH_mO_n como alimentação de madeira, CH_jO_k como carvão e CH_pO_q como bio-óleo (alcatrão).

Fórmulas composicionais médias e a fórmula de reação de pirólise, podem ser expressas determinando as composições elementares e quantidades de matéria-prima de alimentação e produtos.

Observada a notação estequiométrica para a análise, foi, então, considerado o balanço energético em torno de um forno de pirólise, de acordo com a Figura 4.

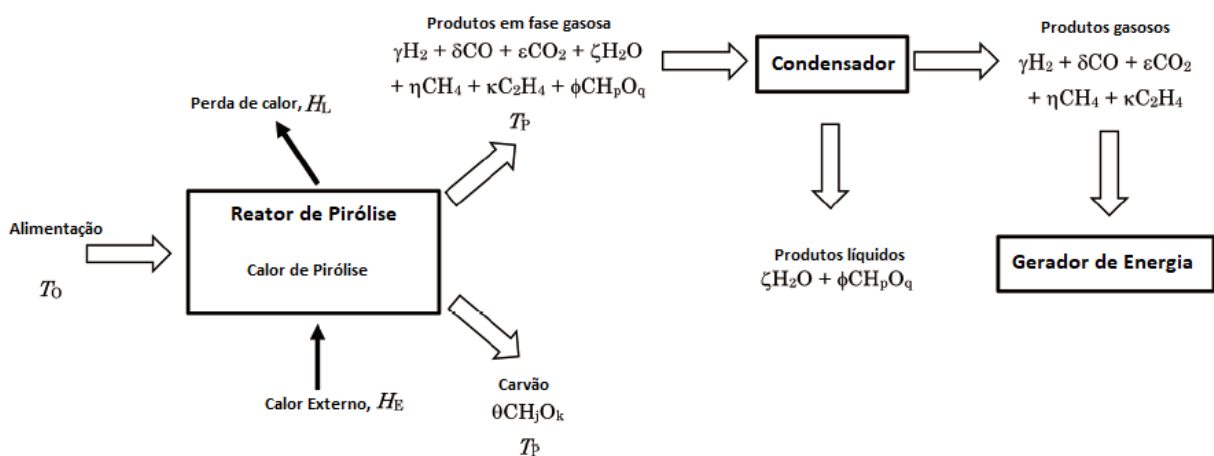


Figura 4 - Diagrama de fluxo esquemático de um sistema de pirólise para geração de energia [14]

Assim, tal como descrito no fluxograma da Figura 4, a alimentação de madeira é carregada no forno a uma temperatura T_0 e é fornecido calor externo (H_E) para iniciar o processo. Depois de determinado tempo de processo, são descarregados do forno os produtos da pirólise com a temperatura de pirólise T_p , e uma parcela do calor externo fornecido é perdida (H_L). Toda a porção sólida do produto da pirólise, em forma de carvão, é armazenada no reator interno do forno. Já os produtos gasosos são condensados em líquidos (mistura de água com bio-óleo). Os gases não condensáveis, por sua vez, são destinados como combustíveis para o gerador de energia.

A Figura 5 mostra o equilíbrio térmico no forno de pirólise. Para o cálculo do modelo, na entrada de calor inclui o poder calorífico superior e calor sensível da madeira seca. Entretanto, para o cálculo considerou-se a alimentação com

temperatura padrão e com calor sensível igual a zero, o que não está descrito na Figura 5.

Para saída de calor, inclui-se o poder calorífico superior, aquecimento sensível e latente da água e do bio-óleo e a perda de calor do forno. O poder calorífico superior é dado nas condições padrão de temperatura e pressão. A temperatura de cada produto na descarga é considerada a mesma temperatura de pirólise T_p .

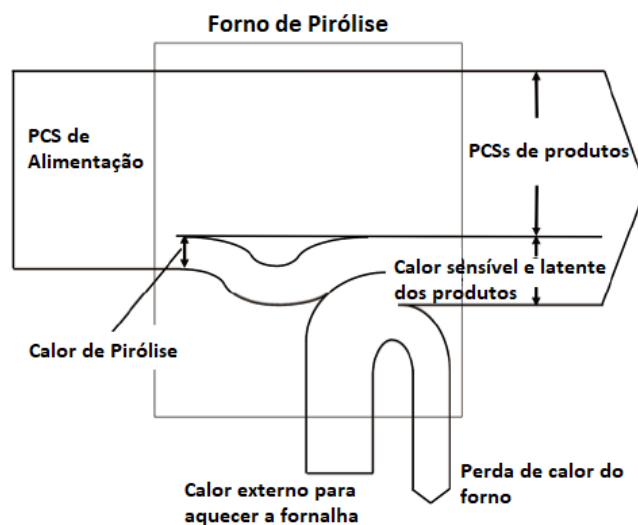


Figura 5 - Diagrama de equilíbrio de calor em torno de um forno de pirólise [14]

Para o cálculo do calor sensível total (H_S) utilizou-se a Equação 3:

$$H_S = \Sigma\{n_i \cdot C_{pmi} \cdot (T_p - T_0)\} \quad (3)$$

onde, n_i , C_{pmi} , T_p e T_0 são a quantidade molar do produto i , capacidade média calor a pressão constante, temperatura do produto i e a temperatura ambiente padrão (298K), respectivamente.

A perda de calor em um forno de pirólise é o calor transmitido pela superfície do forno por convecção e radiação. A fornalha tem uma certa capacidade de queima de combustível. A perda de calor total, em joule por hora, é dividida pela capacidade de queima, dado pela taxa de alimentação molar por hora, para determinar a perda de calor por quantidade molar de alimentação de combustível.

O calor de pirólise é obtido pela diferença entre os poderes caloríficos superiores de alimentação de combustível e dos produtos nas condições normais de temperatura e pressão.

O calor de pirólise é consumido como calor sensível e latente de produtos e perda de calor de um forno. Koderá [14] afirma que, quando o calor de pirólise ($H_{HF} - H_{HP}$) é maior que o consumo de calor ($H_{SP} + H_{LP} + H_L$), a pirólise pode ser auto térmica durante a operação.

Ainda, quando o calor de pirólise é menor que o consumo, é necessária uma fonte de calor externa para manter a temperatura de pirólise e compensar o calor sensível e latente dos produtos, além da perda de calor do forno. Mesmo se a pirólise fosse exotérmica, em determinadas condições, é necessário adicional calor para o aquecimento externo. Esse calor H_E em joule por mol é dado pela Equação 4.

$$H_E = H_{HF} + H_{SF} - (H_{HP} + H_{SP} + H_{LP} + H_L) \quad (4)$$

onde H_{HF} , H_{SF} , H_{HP} , H_{SP} , H_{LP} , H_L são o poder calorífico superior de alimentação, calor sensível de alimentação, poder calorífico superior total dos produtos, calor sensível total dos produtos, calor latente dos produtos líquidos e perda de calor de um forno, respectivamente.

3.2.1 Cálculos Balanço estequiométrico

Com base no relatório descrito por Koderá [14], foram utilizados os dados da Tabela 3. Nota-se que com o aumento da temperatura a fórmula composicional média é alterada, assim como, as proporções de oxigênio e hidrogênio e o poder calorífico do carvão vegetal final diminuem.

Na Tabela 4, encontra-se o resumo da distribuição dos produtos gasosos da pirólise realizada por Koderá [14]. Em seu relatório, outros hidrocarbonetos, além do metano, foram expressos por C_mH_n . Seguindo o raciocínio expostos por Koderá [14], C_mH_n será considerado etileno nos cálculos.

O relatório carece da composição elementar dos produtos líquidos. Como na Tabela 4, os saldos atômicos de C, H e O foram calculados para obter C, H e O no

produto líquido que consiste em alcatrão e água (Tabela 4). Usando os dados do produto de pirólise em 773 K na Tabela 5, o cálculo do equilíbrio de átomos é explicado da seguinte forma.

Tabela 3 - Determinação da fórmula de composição da unidade de madeira e carvão vegetal

Temperatura de pirólise K	Análise última, % C, H, O, Cinzas	Fórmula composicional média	Rendimento de massa de carvão % em peso	Fórmula peso g/mol	Rendimento molar de carvão mol/mol de alimentação	PCS † kJ/mol
378*	48.86, 5.96, 44.85, 0.33	CH _{1.46} O _{0.689}	-	24,51	-	-474.8
773	80.66, 2.92, 15.34, 1.08	CH _{0.431} O _{0.143}	29.5	14.72	0.491**	-461.5

* Temperatura de secagem da madeira original.

** Obtido por $(24,51 \text{ g/mol} \times 0,295 \text{ g/g-alimentação}) / 14,72 \text{ g/mol}$.

† A geração de calor foi expressa como um valor negativo.

Fonte: Adaptado Kodera [14].

Tabela 4 - Fórmula de reação de pirólise de carvalho Mizunara obtida por cálculo estequiométrico [14]

T.* [K]	Fórmula de reação para pirólise de madeira										
	Rendimento em massa dos produtos por 100 g de alimentação, g (rendimento total dos produtos, % entre parênteses)										
773	CH _{1.46} O _{0.689}	→	0.491CH _{0.431} O _{0.143}	+ 0.002H ₂	+ 0.046CO	+ 0.006CH ₄	+ 0.001C ₂ H ₄	+ 0.069CO ₂	+ 0.290H ₂ O	+ 0.386CH _{0.801} O _{0.375}	(98.6)
	100		29.5	0.0	5.3	0.4	0.1	12.4	21.3	29.6	

*Temperatura de pirólise

Tabela 5 - Balanço de átomos de carvão e produtos gasosos [14]

Temperatura de pirólise K	Carvão		Rendimento de gás mol/mol de alimentação					Balanço* Mol/ mol de alimentação		
	Unidade composicional fórmula	Rendimento Mol/ mol de alimentação	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	CO ₂	C	H	O
	773	CH _{0,434} O _{0,143}	0,491	0,002	0,046	0,006	0,001	0,069	0,386	1,217

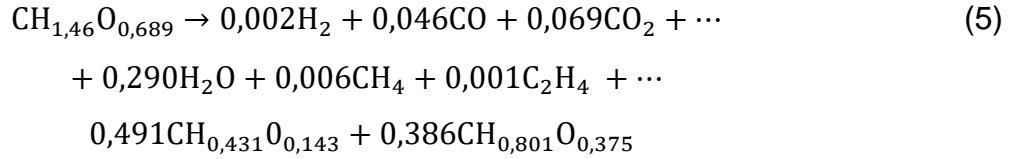
* Balanço de cada átomo em quantidade molar: ex. C de equilíbrio = (C da madeira original) - (C de carvão) - (C de produtos gasosos) a 773 K, $0,386 = 1 - 0,491 - (0,046 + 0,006 + 2 \times 0,001 + 0,069)$. O valor resultante (0,386 mol) corresponde à quantidade de C no alcatrão.

Pirólise de uma mol de madeira seca, resulta em 0,491 moles de carvão (CH_{0,431}O_{0,143}). O montante total de carbono nos átomos de CO, CH₄, C₂H₄, CO₂ é 0,123 mol. Assim, o montante de carbono nos produtos líquidos é 0,386 mol (=1-0,491-0,123).

Seguindo o proposto por Kodera [14], que utiliza os dados de Yasuda et al. [15], o bio-óleo ou alcatrão é um composto orgânico com substâncias hidrofílicas e hidrofóbicas e sua fórmula composicional média é (CH_{0,801}O_{0,375}). O poder calorífico superior estimado para o bio-óleo foi de 21,68 kJ/g. Multiplicando por seu peso molecular de 18,82 g/mol, obtém-se 408 kJ/mol.

Usando a fórmula composicional média do bio-óleo e a quantidade de 0,386 mol de carbono para o equilíbrio químico no produto a 773 K, a quantidade de átomos de hidrogênio e oxigênio no bio-óleo foram determinados como 0,309 (= 0,386 × 0,801) e 0,145 (= 0,386 × 0,375) mol/mol de alimentação respectivamente.

O montante de átomos de hidrogênio e oxigênio na água foram determinados como 0,908 (= 1,217 - 0,309) e 0,290 (= 0,435 - 0,145) mol/mol de alimentação, respectivamente. Na proporção de átomos de água, as quantidades são 0,908 mol de hidrogênio para 0,454 mol de oxigênio da base de hidrogênio ou 0,580 mol de hidrogênio para 0,290 mol de oxigênio da base de oxigênio, Kodera [14] considerou a análise em base de oxigênio por apresentar menor erro. Assim, determinou-se a Equação 5.



3.2.2 Balanço de Calor

O calor padrão de pirólise foi obtido pela diferença entre poder calorífico superior da madeira seca e o total do poder calorífico superior de todos os produtos. Onde o poder calorífico superior e calor de pirólise foram expressos em valores negativos, devido à geração de calor. O valor do poder calorífico superior para o alcatrão foi utilizado com base no valor determinado por Yasuda et al. [15], para todos os valores de temperatura de pirólise da metodologia descrita por Kodera [14].

Durante pirólise, os produtos são descarregados do reator para um forno de pirólise. Os valores do calor sensível daqueles produtos são retirados do reator. O cálculo do balanço de calor deve incluir os calores latentes de H₂O e alcatrão, que são líquidos nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). O calor sensível total dos produtos é a soma dos calores sensíveis do gás e produtos líquidos, calculados na faixa de temperatura como segue:

$$\text{H}_2\text{O (gás)}: C_{\text{pm1}} \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \times n_1 [\text{mol}] \times (T_p - 373) [\text{K}] \quad (6)$$

$$\text{H}_2\text{O (líquido)}: C'_{\text{pm1}} \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \times n_1 [\text{mol}] \times (373 - 298) [\text{K}] \quad (7)$$

$$\text{Alcatrão (gás)}: C_{\text{pm2}} \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \times n_2 [\text{mol}] \times (T_p - 455) [\text{K}] \quad (8)$$

$$\text{Alcatrão (líquido)}: C'_{\text{pm2}} \left[\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \times n_2 [\text{mol}] \times (455 - 298) [\text{K}] \quad (9)$$

onde C_{pm1} , C'_{pm1} , n_1 , C_{pm2} , C'_{pm2} e n_2 são a capacidade calorífica média do vapor de água, capacidade calorífica média da água, quantidade molar de água, capacidade calorífica média de alcatrão gasoso, capacidade calorífica média de alcatrão líquido e quantidade molar de alcatrão, respectivamente. Cabe ressaltar que a capacidade calorífica média do alcatrão foi assumida como igual à do fenol, seja na fase líquida ou gasosa.

Tabela 6 - Valores calculados relacionados ao balanço de calor em torno de um forno em pirólise a 773 K * (Adaptado de [14])

Temperatura de pirólise, K	773
Total de PCS de produtos kJ/mol alimentação	-404,4
Calor de pirólise **, kJ/mol-alimentação	-70,4
Calor sensível total do produto de pirólise †, kJ/mol-alimentação	-47,8
Calor latente de água e alcatrão kJ/mol-alimentação	-29,4
Perda de calor de um forno de pirólise kJ/mol-alimentação††	-85,29
Calor externo necessário para pirólise †††, kJ/mol-alimentação	-92,5

* Os valores de geração de calor, como PCS e calor de pirólise, foram expressos como valores negativos. Para manter a consistência entre os valores calculados, todos os outros valores também foram expressos como valores negativos.

** Um valor negativo significa uma reação exotérmica com base nos PCS de alimentação e produtos: (PCS de alimentação, -474,8 kJ / mol-alimentação) - (PCS total dos produtos).

† Inclui o calor sensível total de produtos gasosos e líquidos.

†† Perda de calor calculada na secção 3.2.3.

††† (Calor necessário para um forno de pirólise do lado de fora do forno) = [(calor sensível total dos produtos) + (calor latente de água e alcatrão) + (perda de calor de um forno de pirólise)] - [(PCS de alimentação, -474,8 kJ / mol-alimentação) - (PCS total de produtos)]. A entrada de calor da pirólise exotérmica e do calor externo fornecido compensará o consumo de calor de calores sensíveis de produtos, calores latentes de água e alcatrão e a perda de calor do forno.

3.2.3 Perda de calor no forno

A perda de calor H_L pode ser descrita como a soma da contribuição da convecção natural h_c e radiação h_r nas paredes do forno. Onde, para fins de estimativa, foi considerada a temperatura de 60 °C ou 333 K na superfície do forno isolado com lã mineral. Conforme descrito nas Equações 10 e 11.

$$H_L = h_c + h_r \quad (10)$$

$$h_c = (5,60 \times A_S + 4,33 \times A_V + 2,27 \times A_I) \times (333 - 298) \quad (11)$$

onde $A_S = 0,560 \text{ m}^2$, $A_V = 0,822 \text{ m}^2$ e $A_I = 0,368 \text{ m}^2$ são as áreas das superfícies superior, vertical e inferior, respectivamente, obtidas do software *SolidWorks* na geometria desenvolvida na secção 3.3.1. E 5,60, 4,33 e 2,27 W/m²K são os coeficientes convectivos fornecidos por Kodera [14] para um forno de pirólise.

Para o cálculo da radiação, Kodera [14] estimou pela equação 12.

$$h_r = 5,67 \times 10^{-8} \times 0,9 \times A_T \times (333^4 - 298^4) \quad (12)$$

onde $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann, 0,9 é o fator de emissividade assumido e A_T é a área total superficial do forno.

Por fim, para a análise de balanço de calor no forno de pirólise, é necessário deixar a unidade de $H_L[W]$ em kJ/mol de alimentação do forno. Para isso, foram feitas as conversões necessárias e considerou-se o peso molecular da madeira seca ($\text{CH}_{1.46}\text{O}_{0.689}$) como 24,51 g/mol.

3.2.4 Efeitos da humidade nos produtos a pirolisar

Conforme descrito por Kodera [14], os cálculos acima consideraram a pirólise de madeira seca, todavia, para tornar os cálculos mais fiáveis é necessário a consideração de um percentual de humidade na madeira a ser pirolisada. Considerando 20% de humidade em base húmida que é 6,13g (0,340 mol) de água por 1 mol de amostra húmida (30,64g), o calor adicional a ser acrescentado ao sistema foi calculado e exposto na Tabela 7.

A contaminação por humidade aumenta o calor necessário a ser fornecido para um forno para pirolisar a quantidade de madeira seca. O calor adicional consiste em calor sensível e latente de H₂O (líquido) e ao calor sensível de H₂O (gasoso).

Tabela 7 - Calor adicional necessário para pirólise de madeira com 20% em peso de umidade *1
(Adaptado de [14])

Temperatura de pirólise, K	773
Calor sensível de H ₂ O (líquido) *2, kJ	-1.92
O calor latente de H ₂ O *3, kJ	-13.8
C _{pm1} , J / mol·K	-36.2
Calor sensível de H ₂ O (gás) *4, kJ	-4.92
Calor adicional para aquecer a umidade *5, kJ / mol-alimentação	-20.6
Calor externo necessário para pirólise de madeira seca *6, kJ / mol-alimentação	-92,5
Calor externo total necessário para pirólise de madeira úmida *7, kJ / mol-alimentação	-113,2
PCS de carvão vegetal produzido *8, kJ/mol-alimentação	-227
Razão do calor externo necessário para PCS de carvão produzido, kJ / kJ	0,49

*1 PCS de carvão foram expressos como valores negativos. Para manter a consistência entre os valores calculados, todos os outros valores também foram expressos como valores negativos. A quantidade adicional de água como 20% em peso de umidade é 0,340 mol / mol de alimentação em base úmida.

*2 $75,4 \text{ J / mol} \cdot \text{K} \times 0,340 \text{ mol} \times (373 - 298) \text{ K}$.

*3 $40,67 \text{ kJ / mol} \times 0,340 \text{ mol}$.

*4 $C_{pm1} \text{ J / mol} \cdot \text{K} \times 0,340 \text{ mol} \times (T_P - 373) \text{ K}$.

*5 Soma dos calores sensíveis de H₂O (líquido e gás) e calor latente.

*6 Obtido na Tabela 6.

*7 Soma do calor adicional para aquecimento da umidade e do calor externo necessário para a pirólise da madeira seca.

*8 Rendimento molar de carvão [mol / mol-alimentação] multiplicado por PCS de carvão [kJ/mol] na Tabela 3

Importante ressaltar que o calor de pirólise da Tabela 6, mesmo com a característica exotérmica, não é suficiente para fornecer energia para a perda de calor do forno, para compensar o valor do calor sensível e latente dos produtos e o calor da umidade presente na alimentação de madeira.

Sendo assim, determinou-se a estimativa de fornecimento de calor externo na Tabela 7 e, diante da possibilidade de utilizar o carvão produzido da pirólise para a alimentação da fornalha, obteve-se que a razão de, aproximadamente, 49% do carvão produzido seria suficiente para realizar o processo de pirólise.

3.2.5 Balanço estequiométrico de combustão

Para a liberação de energia na fornalha e ocorrer o processo de pirólise faz-se necessário o fornecimento de energia através de uma reação de combustão. Bizzo

[16] explica que as reações de combustão são, em si, reações de oxidação que envolvem liberação de calor, para isso, o combustível deve reagir com o oxigênio presente no ar.

A partir dos dados experimentais fornecidos por Kodera [14] na Tabela 3, pode observar-se que o carvão produzido no processo a 500°C corresponde a 29,5% da madeira seca utilizada no processo para pirolisar. Ainda, de acordo com a Tabela 7, seriam necessários 49% do carvão produzido no processo para fornecer calor para o forno de pirólise.

Para o caso de 10 kg de RSU, pode indicar-se que seria necessário utilizar-se, aproximadamente, 1,5 kg de carvão para o processo de pirólise ocorrer a 500 °C.

Considerando essa premissa, deve-se, então, construir a reação de combustão para o carvão para identificar o volume de ar necessário para ocorrer a reação. O desenvolvimento base do cálculo foi, considerando como reagentes, o carvão exposto na Tabela 3, com 80,66% de carbono 2,92% de hidrogênio e 15,34% de oxigênio. Além da consideração sobre o carvão, foram utilizados os dados da Tabela 8 para o peso atômico e a proporção de oxigênio no ar atmosférico.

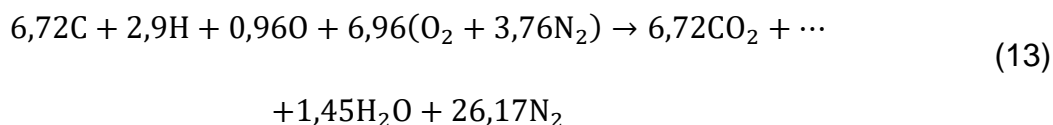
Tabela 8 - Dados para construção da equação estequiométrica (Adaptado de [16])

Elemento	Peso atômico [g/mol]	
C	12,011	
H	1,008	
O	15,999	
N	14,007	

Elemento do ar	% Em massa	% Em volume
O ₂	23,2	21
N ₂	76,8	79

Para a construção da reação, é necessária a transformação da quantidade de massa do combustível reagindo com o ar, em quantidades molares ou de volumes, e determinar os coeficientes estequiométricos utilizando o princípio da conservação de massa. Para isso, utilizou-se a proporção advinda da Tabela 8 de 3,76 volumes de nitrogênio, para cada volume de oxigênio.

Através da reação de combustão, foram encontrados os coeficientes estequiométricos que satisfazem o balanço, conforme a equação 13.



A partir dos coeficientes da equação 13, foi possível determinar a relação ar/combustível, em valores de massa, para a queima estequiométrica do carvão, no caso ~10:1 kg_{ar}/kg_{combustível}. Todavia, Bizzo [16] menciona que proporções abaixo da estequiométrica favorecem a formação de monóxido de carbono nos produtos e, por isso, é normal, no ambiente industrial, trabalhar com um coeficiente de excesso de ar.

Observando a Tabela 9, optou-se por trabalhar com o coeficiente de excesso de ar em 60%, o que nos dá a nova relação de ~16:1 kg_{ar}/kg_{combustível}.

Tabela 9 - Relações de excesso de ar de acordo com combustível [17]

Combustível	Tipo de Queima	Excesso de ar (%)
Gás combustível	Suspensão	5 a 20
Carvão pulverizado	Suspensão	10 a 25
Óleo combustível	Suspensão	10 a 25
Carvão Granulado	Grelha	30 a 60
Lenha	Grelha	30 a 60

Utilizando a densidade do ar a 300K fornecida por Incropera [18] e destacada na Tabela 10, foi possível encontrar a relação ar/combustível com o ar em unidade de volume, no caso ~13 m³_{ar} / kg_{combustível}.

Tabela 10 - Propriedade termofísica do ar a pressão atmosférica [18]

Temperatura (K)	Densidade (kg/m³)
300	1,1614

3.2.5.1 Seleção do soprador

De posse da quantidade, em volume, de ar necessária para a combustão e sabendo que a quantidade de carvão necessária para a fornalha é de 1,5 kg,

selecionou-se um soprador de ar no catálogo da empresa Susil&Pellets [19] que fornecesse o caudal de, no mínimo, $1,5 \times 13 \text{ m}^3$ de ar. A Figura 6 mostra o soprador selecionado.

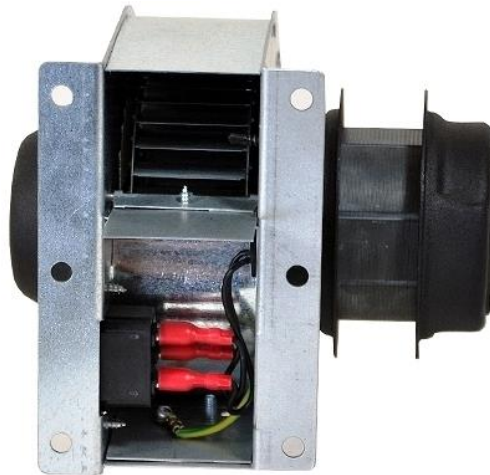


Figura 6 - Soprador de ar selecionado com caudal de $70 \text{ m}^3/\text{h}$ [19]

3.3 DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

A fornalha é um componente do forno de carbonização que, de acordo com Bazzo [17], é destinado a converter a energia química presente no combustível em energia térmica. Ainda, de acordo com o combustível disponível, as fornalhas podem ser projetadas para queima em suspensão, queima em grelha ou queima em leito fluidizado. Para pequenos fornos a queima em grelha fixa é a mais utilizada.

Bazzo [17] afirma que o correto dimensionamento da fornalha (câmara de combustão) deve levar em conta alguns fatores abaixo:

- O volume apropriado ao tipo e à quantidade de combustível que se deseja queimar;
- Tempo, efetivamente, gasto para queimar o combustível no interior da câmara;
- Dimensões apropriada para a câmara, no sentido de favorecer a queima e garantir o fluxo regular dos gases de combustão;
- Temperaturas compatíveis com equipamento e com o próprio combustível que se deseja queimar.

Para a determinação da massa de RSU, para o ser inserida no tambor rotativo, utilizou-se, como base, o forno projetado pelo Eng. Railton, sob a patente de invenção número 1001690-2 A2, por se tratar de aplicação similar ao forno de projeto desta dissertação.

Lima [7] menciona que, aproximadamente, 40% dos resíduos sólidos urbanos que adentram em seu forno são convertidos em carvão e que 10% desse carvão é suficiente para o consumo da fornalha. Ele também relata que os resíduos ocupam 50 a 70% do volume do tambor do forno.

Considerando esses dados, partiu-se da premissa de projeto de produção de 4 kg de carvão por batelada do forno. Os dados de projeto podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados para projecto da fornalha

Objetivo de massa de carvão	4 kg/h
\dot{m}_{comb}^*	1,5 kg/h
m_{RSU}	10kg/h
$\bar{d}_{\text{RSU}}^{**}$	231 kg/m ³
V_{RSU}	0,0433 m ³
V_{reator}	0,087 m ³
D_{reator}	0,388 m
C_{reator}	0,750 m
Tubo para reator	400 mm de diâmetro com 6 mm de espessura
$\text{PCI}_{\text{carvão RSU}}^{***}$	20607,42 kJ/kg

* Considerando os que 49% do carvão produzido será utilizado na fornalha, de acordo com a Tabela 7.

**Densidade média dos resíduos sólidos urbanos extraída de Santos [20].

*** Valor obtido pela média dos valores fornecidos pelo Eng. Railton, disponível em Voloch&Peralta [7].

3.3.1 Geometria da Fornalha

A carga térmica volumétrica (\bar{q}) é uma importante relação que define a energia liberada na câmara de combustão e o volume necessário para combustão eficiente. Pequenos volumes, implicam na combustão parcial e presença de material combustível nos gases de exaustão.

Para garantir a queima adequada do combustível, Bazzo [17] relaciona a quantidade de calor liberada pelo combustível e o volume ocupado pela câmara de combustão, através da Equação 14 que aponta para a carga térmica volumétrica.

$$\bar{q} = \frac{\dot{q}_D}{V_{CC}} \quad (14)$$

De modo a garantir a transferência de calor uniforme do combustível, presente na grelha para o cilindro (reator) que se encontra os RSU, optou-se por utilizar toda a área da base da carcaça que envolve o cilindro como área útil para a grelha e, munidos dessa informação, determina-se a altura da câmara de combustão de acordo com a Equação 15, fornecida por Melo [21].

$$h_{CC} = \frac{V_{CC}}{A_G} \quad (15)$$

A Tabela 12, aponta o valor da carga térmica volumétrica para projeto de fornalha fornecida por Bazzo [17], além de apresentar os valores de projeto para a solução das Equações 13 e 14.

Tabela 12 - Dados para projecto

Símbolo	Designação	Tipo de queima	Valor
\bar{q}	Carga térmica volumétrica	Em grelha	$\sim 312 [\text{kW}/\text{m}^3]^*$
\dot{q}_D	Energia liberada na câmara de combustão		9 [kW]**
V_{CC}	Volume da câmara de combustão		0,0264 [m ³]
A_G	Área da grelha		0,35 [m ²]
h_{CC}	Altura da câmara de combustão		75 [mm]

*Bazzo [17] recomenda valores de 250 a 500 [kW/m³].

** PCI x \dot{m}_{comb} extraídos da Tabela 11.

A Figura 7 apresenta a geometria da capa do forno, onde pode ser observado, a vermelho, o local destinado à câmara de combustão. A circunferência a verde é o local destinado ao tambor rotativo, sendo que C é a localização da grelha.

De forma a minimizar a exposição das paredes da câmara de combustão ao fogo, foram utilizadas duas placas com argamassa refratária (representadas na Figura 7 por A e B). A geometria será construída em chapas do aço estrutural S235JR com 6 mm de espessura, bem como, serão utilizadas cantoneiras para apoiar a estrutura, a grelha e as chapas de argamassa refratária.

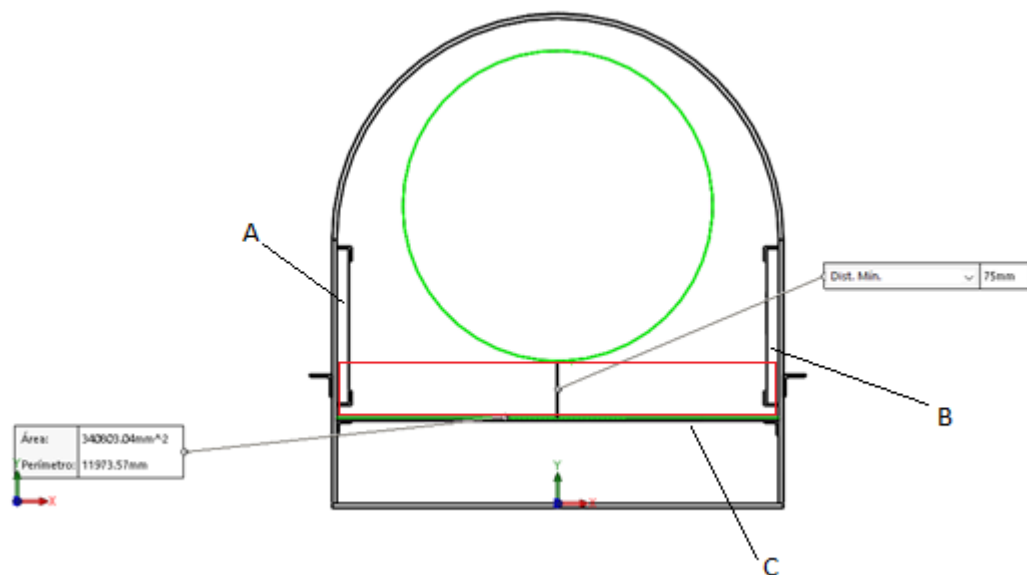


Figura 7 - Geometria da capa do forno com a câmara de combustão

3.4 DETERMINAÇÃO DE ESPESSURA DO TAMBOR ROTATIVO SOB PRESSÃO EXTERNA

O tambor rotativo estará sob vácuo para ocorrer a pirólise. Sendo assim, é necessário o projeto deste item para resistir à pressão externa sob altas temperaturas. Para isso, foi utilizado as diretrizes definidas na norma ASME – Regras para a Construção de Vasos de Pressão VII Divisão 1-Subseção A -Parte UG28 [22].

Para o projeto, analisaram-se fornos de pirólise comerciais para saber qual o material aplicado pelos fabricantes na construção do tambor rotativo. O aço A516 Gr 70 foi o empregado por muitos fabricantes, Brownmac [23] afirma este aço é amplamente aplicado em vasos de pressão na indústria de petróleo, química, caldeiras e, também, pode ser empregado para fazer reatores, entre outros equipamentos ou acessórios.

Diante da dificuldade de obtenção desse aço e o orçamento restrito, optou-se pela utilização do mesmo aço estrutural utilizado para a capa do forno, o aço S235JR, tendo em vista que o forno desta dissertação não será utilizado comercialmente e sim para um número limitado de testes da *StartUp Energie*.

Para a determinação da espessura, foi suposta uma espessura inicial (a mesma da chapa utilizada para a capa do forno) e calculada a pressão externa admissível. Comparou-se com a pressão de trabalho e, se fosse maior que a pressão de trabalho, a espessura estaria adequada. Para essa iteração, utilizou os dados da Tabela 13 para inserção na Equação 17, visto que a condição da Equação 16 era satisfeita:

Tabela 13 - Dados para cálculo da pressão admissível P_a .

Símbolo	Designação	Valor
D_0	Diâmetro externo tambor rotativo	400 [mm]
T	Espessura chapa de aço S235JR utilizada na capa do forno	6 [mm]
L	Comprimento total tubo tambor rotativo	750 [mm]
P	Pressão de trabalho externa	80 [kPa]
E	Módulo de elasticidade sob a temperatura de trabalho*	157,2 [GPa]
A	Fator determinado a partir da Fig. G na Subparte 3 da Seção II, Parte D [24]	0,00105
B	Fator determinado a partir do gráfico de material aplicável na Subparte 3 da Seção II, Parte D para a temperatura máxima do metal de projeto [24]	5800

*Fornecido das tabelas de propriedades físicas para aço com Carbono $\leq 0,30\%$ [25]

$$\frac{D_0}{t} \geq 10 \quad (16)$$

$$P_a = \frac{4 \cdot B}{3 \left(\frac{D_0}{t} \right)} \quad (17)$$

A pressão admissível encontrada foi de 116kPa, que é maior que a pressão de trabalho que foi determinada como 80kPa. Desta forma, o tambor rotativo foi construído em a chapa de aço S235JR com uma espessura de 6 mm.

Cabe ressaltar que as propriedades do aço estrutural S235JR são afetadas criticamente, assim, à temperatura de 550 °C a tensão máxima diminui em 60%, comparativamente com a temperatura ambiente. Dito isto, optou-se por desenvolver os ensaios de pirólise a temperaturas inferiores a 500°C, por questões de segurança [26], [27].

Com o intuito de aumentar a movimentação do RSU dentro do tambor rotativo, e, assim, favorecer a troca térmica, foram instaladas 4 alhetas longitudinais e equidistantes, fabricadas em barra chata de perfil retangular, também em aço S235JR.

3.5 DILATAÇÃO ENTRE TAMBOR ROTATIVO E CAPA DO FORNO

Quando o aço é submetido a uma variação de temperatura, as suas dimensões são alteradas, Sers et al. [28] afirma que a variação da dimensão do material depende unicamente do coeficiente de dilatação linear, da variação de temperatura e da dimensão inicial, de acordo com a Equação 18. Os dados da Tabela 14 foram utilizados para determinar a dilatação do cilindro ΔD .

$$\Delta D = \alpha \cdot D_0 \cdot \Delta T \quad (18)$$

Tabela 14 - Dados para cálculo da dilatação térmica

Símbolo	Designação	Valor
D_0	Diâmetro externo tambor rotativo	400 [mm]
α	Coeficiente de dilatação para o aço S235JR	$\alpha = \frac{12\mu\text{m}}{\text{m}^\circ\text{C}}$
ΔT	Variação de temperatura de 20 para 500°C	500°C
ΔD	Dilatação do diâmetro do tambor	2,5 [mm]

A partir do emprego dos dados da Tabela 14, na Equação 18, identificou-se que o diâmetro do tambor aumentaria, aproximadamente, 2,5 mm.

Com a finalidade de evitar o travamento do tambor rotativo com a capa do forno, devido à elevação da temperatura, foi necessário deixar uma folga de, aproximadamente, 6 mm, para compensar a dilatação na montagem destes itens e evitar problemas com travamento do cilindro.

O motivo da folga ser maior que a dilatação linear foi para deixar uma margem de segurança para eventuais cordões de solda na união do tambor.

3.6 SELEÇÃO DO MOTOR ELÉTRICO E REDUTOR

Uma vez escolhido o aço e desenhada a geometria do tambor, foi possível extrair o valor, em peso, do cilindro rotativo. Os valores, em massa, foram determinados a partir do software *Solidworks*. A metodologia descrita em SEW

Eurodrive [29], exposta abaixo, foi utilizada para o dimensionamento do conjunto motor-redutor.

Basicamente, para a escolha do motor que irá fornecer a potência para a rotação do tambor rotativo deve-se determinar a potência da rotação: que representa a potência necessária para movimentar um corpo partindo do repouso até à rotação n (Equação 19) mais a potência necessária para superar a força de atrito entre os roletes e o cilindro (Equação 20) e, considerar a somatório das duas potências (Equação 21).

O cálculo do momento de inércia do cilindro oco (J_{cil}), de acordo com a rotação no eixo longitudinal, pode ser calculado segundo a Equação 22 e a rotação do rolete pela Equação 23 [30]:

$$P_{Dl} = \frac{J_{cil} \cdot n_{tambor}^2}{91200 \cdot \tau_{ac} \cdot \eta} \quad (19)$$

$$P_s = \frac{m_{conj.tambor} \cdot g \cdot \mu_L \cdot d_{rolete} \cdot n_{rolete}}{2.1000.9550 \cdot \eta_{reductor}} \quad (20)$$

$$P_T = P_{Dl} + P_s \quad (21)$$

$$J_{cil} = \frac{1}{2} \cdot m_{conj.tambor} \cdot (r_1^2 + r_2^2) \quad (22)$$

$$n_{rolete} = \frac{n_{tambor} \cdot 2 \cdot r_1}{d_{rolete}} \quad (23)$$

Tabela 15 - Dados para dimensionamento do motor

Símbolo	Designação	Valor
r_1	Raio externo	0,2 [m]
r_2	Raio interno	0,194 [m]
$m_{conj.tambor}$	Massa tubo tambor rotativo com tampas, carga de resíduos e hastes para mistura	80 [kg]
n_{tambor}	Máxima rotação do tambor	16,55 [rpm]
t_{ac}	Tempo de acionamento*	1 [s]
η	Eficiência do motor	0,9 [29]
g	Gravidade	9,81[m/s ²]
μ_L	Coeficiente de atrito estático entre o aço do tambor e o aço dos roletes	0,6 [31]
d_{rolete}	Diâmetro do rolete	0,035[m]
$\eta_{reductor}$	Eficiência do reductor	0,62
n_{rolete}	Rotação do rolete	189,1 [rpm]
P_{DI}	Potência de giro	0,01 [kW]
P_s	Potência para superar força de atrito	0,002 [kW]
P_T	Potência total	0,012 [kW]

Pelo catálogo da fabricante Universal Motors [32], foi selecionado o primeiro motor que atendesse ao requisito de potência de, no mínimo, 0,012 [kW] disponível em estoque, como pode ser observado na Figura 8.



3~400 V, 50Hz

MOTOR TIPO MOTOR TYPE MOTEUR TYPE	POTÊNCIA POTENCIA OUTPUT PUISSANCE		rpm	In	RENDIMENTO 4/4 RENDIMENTO 4/4 EFFICIENCY 4/4 RENDIMENT 4/4	Cos φ	ARRANQUE ARRANQUE STARTING DÉMARRAGE		T _{in} T _n	T _n	RUIÍDO RUIDO NOISE BRUIT	PESO PESO WEIGHT MASSE
	kW	Cv					min ⁻¹	A				
IV Pólos 1 500 rpm												
BF31 56 M1 4	0,06	0,08	1320	0,30	48,5	0,59	2,3	6,0	2,4	0,43	50	3,0
BF31 56 M2 4	0,09	0,12	1320	0,43	50,0	0,61	2,3	6,0	2,4	0,65	50	3,3
BF31 63 M1 4	0,12	0,16	1350	0,47	57,0	0,64	2,2	6,0	2,4	0,85	52	3,9
BF31 63 M1 4	0,18	0,25	1350	0,68	58,0	0,65	2,2	6,0	2,4	1,2	52	4,3
BF31 71 M1 4	0,25	0,33	1350	0,84	60,0	0,72	2,2	6,0	2,4	1,7	55	5,4
BF31 71 M2 4	0,37	0,5	1370	1,11	65,0	0,75	2,2	6,0	2,4	2,5	55	6,2
BF31 80 M1 4	0,55	0,75	1370	1,58	67,0	0,75	2,2	6,0	2,4	3,8	58	9,0
BF31 80 M2 4	0,75	1	1380	1,93	72,0	0,78	2,2	6,0	2,4	5,1	58	10,0
BF31 90 S1 4	1,1	1,5	1400	2,64	76,2	0,79	2,2	6,0	2,4	7,5	61	12,1
BF31 90 L1 4	1,5	2	1400	3,45	78,5	0,80	2,2	6,0	2,4	10	61	14,6

Figura 8 - Catálogo de motores trifásicos IV pólos com rotação até 1500 rpm [32]

Selecionado o motor, optou-se pela aquisição do redutor disponível em estoque na mesma loja onde foi adquirido o motor. Desta forma, reduziram-se os custos de transporte. O modelo adquirido pode ser observado na Figura 9 e fornece a rotação de 47 rpm na saída, cabe agora, a seleção dos pinhões para atingir a rotação definida no projeto.



Flange motores disponíveis Available motor flanges
 B) Supplied with Reduction Bushing Fornecido com casquilho redutor
 B) Available on Request without reduction bushing Disponível sob pedido sem casquilho redutor
 C) Motor flange holes position Posição dos furos da flange do motor

input speed (n1)=1400 min⁻¹
velocidade de entrada (n1)=1400 min⁻¹

n ₂ [min ⁻¹]	i	P _{in} [kW]	M _{in} [Nm]	f _s	P _{in} [kW]	M _{in} [Nm]	56 B5	63 B5	71 B5	80 B5	90 B5	100/112 B5	132 B5	56 B14	63 B14	71 B14	80 B14	90 B14	100/112 B14	132 B14	Dynamic efficiency RD	Tooth module [mm]	Ratios code
							B						B-C										
21 Nm	280	5	0,18	5	3,3	0,60	17							B							82	1,26	09
	200	7	0,18	7	2,4	0,44	17							B							80	1,44	01
	140	10	0,18	10	1,8	0,32	17							B							78	1,44	02
	93	15	0,18	13	1,4	0,25	19							B							73	1,44	03
030	70	20	0,18	17	1,1	0,20	19							B							70	1,09	04
	47	30	0,12	15	1,4	0,17	21							B							62	1,44	05
	35	40	0,12	19	1,1	0,13	20							B							57	1,09	06
	23	61	0,09	19	1,1	0,10	20							B							50	0,72	07
	17,5	80	0,09	16	1,0	0,06	16							B							48	0,56	08

Figura 9 - Catálogo de redutores [33]

3.7 CONTROLADOR DE VELOCIDADE

Com o objetivo de variar a rotação do tambor rotativo foi acoplado ao sistema motor-redutor um inversor de frequência. Foi selecionado um inversor de baixo custo

que trabalhasse sob a mesma classe de tensão do motor elétrico (380V). O inversor selecionado foi o modelo J7 da fabricante Yaskawa, conforme Figura 10.



Figura 10 - Inversor de frequência J7 [34]

Com o intuito de parametrizar o inversor e descobrir as faixas de rotação, em função da frequência, procedeu-se a um ensaio com o tacômetro digital Minipa MDT-2238-B e realizaram-se as leituras, por meio do contato com o eixo do redutor (Tabela 16). De posse destes dados de rotação, foi possível adequar a rotação mencionada por Lima [6] que deveria ocorrer na faixa de 2 a 5 rpm (frequências de 12 a 15 Hz).

Tabela 16 - Dados ensaios com tacômetro

Frequência [Hz]	Rotação tambor [rpm]
12	3,8
15	4,8
20	6,5
25	8,5
30	10,2
35	12
40	13,6
45	15,5
50	16,9

3.8 SELEÇÃO DA CORRENTE E DOS PINHÕES PARA CORRENTE

3.8.1 Seleção da corrente

De posse da rotação e potência de saída do redutor, optou-se pela aquisição de uma corrente simples, disponível em estoque e que atendesse aos requisitos de força atuante no acionamento ($F_{TC} < \text{Carga de ruptura}$).

Então, calcularam-se as forças atuantes na corrente 05B-1 e, caso o requisito de força atuante na corrente fosse menor que a carga de ruptura mínima, então a corrente seria empregada. Caso contrário, seria encomendado um modelo alternativo que atendesse ao critério mencionado. As equações utilizadas foram expostas por Shigley [35] e são elencadas abaixo.

$$d_{\text{primitivo}} = p \cdot \frac{z_{\text{motora}}}{\Pi} \quad (24)$$

$$v_{\text{corrente}} = \Pi \cdot d_{\text{primitivo}} \cdot \frac{n_{\text{redutor}}}{60000} \quad (25)$$

$$F_C = q_{\text{corrente}} \cdot \frac{v_{\text{corrente}}^2}{9,81} \quad (26)$$

$$F_T = 75 \cdot \frac{N}{v_{\text{corrente}}} \quad (27)$$

$$F_{TC} = F_T + F_C \quad (28)$$

Para os cálculos, utilizou-se os dados da Tabela 17.

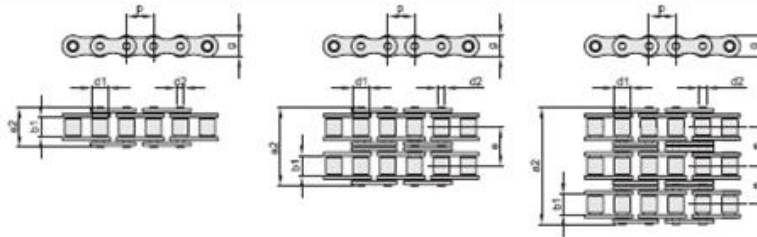
Tabela 17 - Dados para seleção da corrente

Símbolo	Designação	Valor
P	Passo da corrente	8 [mm]
z_{motora}	Número de dentes da engrenagem motora	20
$d_{primitivo}$	Diâmetro primitivo da engrenagem motora	51,14 [mm]
$n_{reductor}$	Rotação máxima na saída do reductor	47 [rpm]
$v_{tcorrente}$	Velocidade tangencial da corrente	0,12585 [m/s]
$q_{corrente}$	Massa da corrente por comprimento	0,18 [kg/m]
F_C	Força centrípeta da corrente	$2,91 \times 10^{-4}$ [kgf]
N	Potência do reductor	0,22 [CV]
F_T	Força de transmissão	131,10822[kgf]
F_{TC}	Força total na corrente	131,10851[kgf] ou 1285,74[N]

Tendo em vista que a primeira corrente satisfazia a relação, optou-se por adquirir a corrente que existia a pronta entrega na loja, no caso a corrente 05B-1 (Figura 11).



CORRENTE DE ROLOS SERIE EUROPEIA - DIN 8187 - ISO 606
ROLLER CHAINS EUROPEAN STANDARD - DIN 8187 - ISO 606



CORRENTE PRODUZIDA POR EMPRESAS CERTIFICADAS PELAS NORMAS ISO 9001/2000 - ISO 14001 E API 7F
 CHAIN PRODUCED BY ISO 9001/2000 - ISO 14001 AND API 7F CERTIFIED COMPANY
 CORRENTE PRE-TENSIONADA / PRE-STRETCHED CHAINS

SIMPLES

ISO	p		b ₁ mm min.	d ₁ mm	d ₂ mm max.	a ₀ mm max.	g mm max.	Carga de rotura		q kg/m
	mm	inch						minimo KN	medio KN	
04-1	6	-	2,80	1,85	4,00	7,4	5,00	3,0	3,3	0,12
05B-1 ▲	8	-	3,00	2,31	5,00	8,6	7,11	5,0	5,9	0,18

Figura 11 - Catálogo corrente simples padrão DIN8187 [36]

Com o auxílio do software *Solidworks*, determinou-se o comprimento de 651,78 mm necessários para a corrente.

3.8.2 Seleção do pinhão para corrente

Com o modelo 05B-1 de corrente e de posse do número de dentes $z_{motora} = 20$ (por escolha de projeto), seleccionou-se pinhão com $z_{movida} = 57$, na Figura 12, por ser o primeiro z_{movido} a satisfazer a relação da Equação 29 com diâmetro de cubo $d_m > 70 \text{ mm}$ (o motivo da restrição do diâmetro do cubo é devido ao facto do pinhão ter seu diâmetro interno aumentado para ser instalado em um tubo de 2").

$$z_{movida} = z_{motora} \cdot \frac{n_{motora}}{n_{movida}} \quad (29)$$

Onde:

$$n_{motora} = 47 \text{ [rpm]}$$

$$n_{movida} = 20 \text{ [rpm]}$$

Mas, devido à restrição do diâmetro do cubo, passou a ser adotado um novo valor para a rotação do pinhão movido, baseado na escolha do pinhão de $z_{movida} = 57$:

$$n_{movida} = 16,55 [rpm]$$

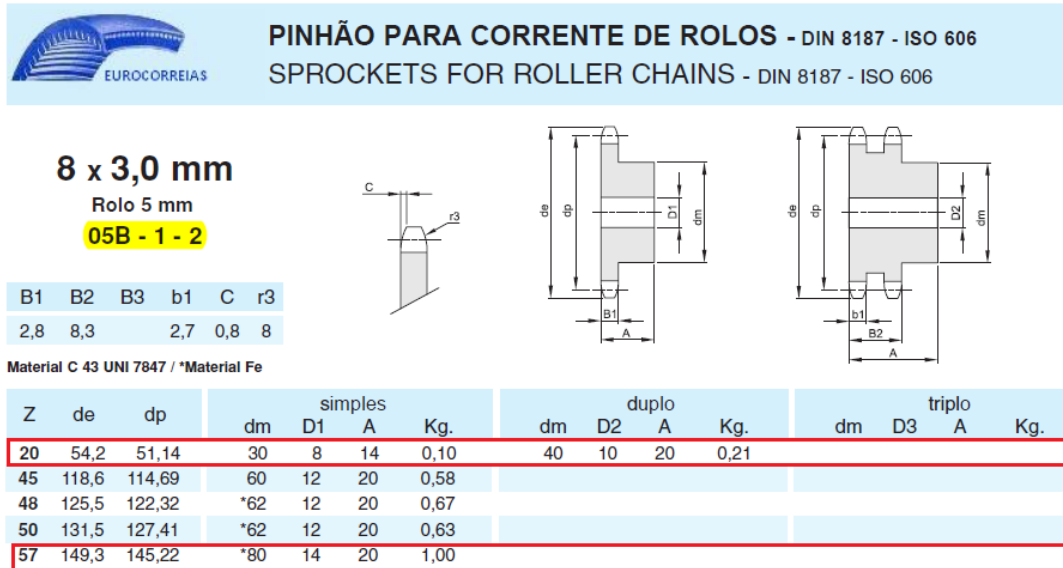


Figura 12 - Catálogo pinhão para corrente de rolos padrão DIN8187 [37]

3.9 EIXO PARA ACOPLAR PINHÃO MOVIDO

A partir da seleção do pinhão a ser acoplado no tambor, é necessário realizar esse acoplamento por meio de um eixo que estará assentado sob dois roletes de apoio.

Para o eixo, foi selecionado o tubo comercial de 2" com schedule 40 em aço S235JR. Com o auxílio das Equações 30 a 32, mencionadas por Hibbeler [38], verificou-se sua tensão de corte máxima devido ao binário.

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (30)$$

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (31)$$

$$J = \frac{\pi \cdot (c_e^4 - c_i^4)}{2} \quad (32)$$

A Tabela 18 evidencia os valores utilizados nas equações acima, bem como as unidades.

Tabela 18 - Dados para cálculo tensão de cisalhamento no eixo com o pinhão movido

Símbolo	Designação	Valor
τ_{\max}	Tensão de corte máxima	0,559[MPa]
P	Potência fornecida pelo redutor	170[W]
T	Binário atuante no pinhão	10,28 [N. m]
ω	Rotação máxima no eixo	16,55[rpm]
c	Raio externo do tubo	0,03016 [m]
c_e	Raio externo do tubo	0,03016 [m]
c_i	Raio interno do tubo	0,02625 [m]

De acordo com a ASME [39] a resistência ao corte do aço estrutural corresponde a 70% da sua resistência à cedência. Logo, para o aço S235 JR (onde a tensão de cedência é de 235 MPa) esse valor é de 165 MPa e, dessa forma, o eixo pode ser empregado para situação projetada porque a tensão de corte máxima é menor do que o limite do material [40].

3.10 DIMENSIONAMENTO DAS CARGAS NO ROLAMENTO DE APOIO DO TAMBOR

Escolhido o aço e desenhada a geometria do tambor, foi possível extrair o valor da massa do conjunto com tubo através do software *Solidworks* para determinar o peso atuante na estrutura que será suportado pelos rolamentos, de acordo com a Equação 33.

$$P_{\text{peso}} = m_{\text{conj.tambor}} \cdot g \quad (33)$$

Além disso, através da escolha do grupo motor-redutor foi possível calcular a carga atuante para acionamento por corrente através das equações 34 e 35 exposta

em NSK [41]. Desta forma, somando as cargas na estrutura, é possível construir um diagrama de corpo livre e dimensionar o rolamento a ser empregado para resistir a essas cargas. A Tabela 19 apresenta os valores utilizados para cálculo.

$$M = 9550000 \cdot \frac{H}{n} \quad (34)$$

$$P_k = \frac{M}{r} \quad (35)$$

Tabela 19 - Dados para cálculo das forças

Símbolo	Designação	Valor
$m_{conj.tambor}$	Massa tubo tambor rotativo com tampas, carga de resíduos e hastes para mistura	80 [kg]
g	Gravidade	9,81[m/s ²]
P_{peso}	Força peso	785 [N]
H	Potência de acionamento do redutor	0,17[kW]
N	Velocidade de rotação do pinhão movido	16,55[rpm]
M	Binário atuante no pinhão	98096 [N.mm]
R	Raio efetivo do pinhão	74,65 [mm]
P_k	Força efetiva de acionamento do pinhão	1314 [N]

O conjunto foi analisado como uma viga apoiada por roletes conforme o diagrama de corpo livre, presente na Figura 13.

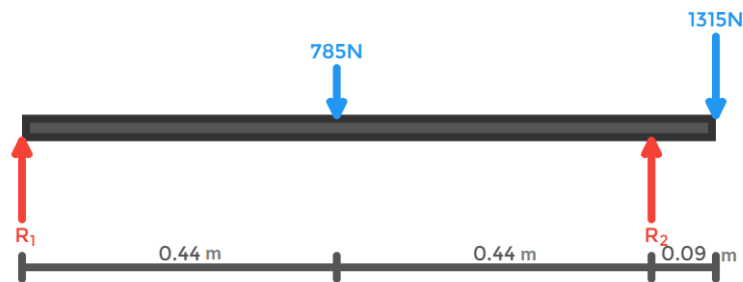


Figura 13 - Viga representando o conjunto: tambor rotativo com suas tampas carga de resíduos dentro do tambor e a carga de acionamento

Resolvendo o diagrama de corpo livre, encontra-se o valor $R_1 = 258 \text{ [N]}$ e $R_2 = 1841 \text{ [N]}$. Para a seleção do rolamento, deve-se, primeiro, levar em conta como ele será aplicado. Para isso, optou-se por apoiar o conjunto tambor representado pela viga em quatro roletes, em que cada dupla (A e B na Figura 14) de rolete seria responsável por sustentar cada carga R_1 e R_2 .

Todavia, cada rolete iria dispor de dois rolamentos para dividir sua carga (Figura 15) e servir de apoio ao eixo, de forma que a carga em R_1 ou a carga em R_2 seria dividida por quatro.

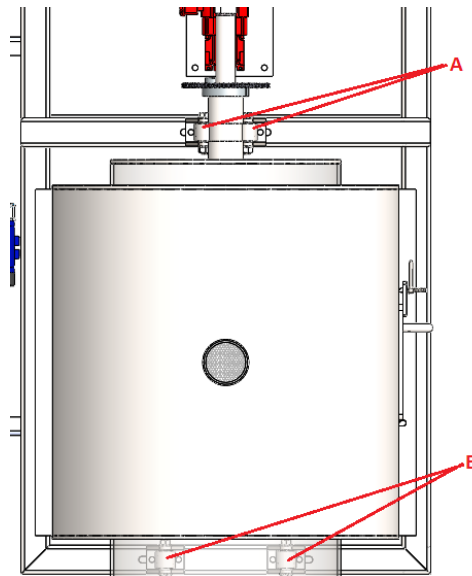


Figura 14 - Os 4 roletes que sustentam o tambor rotativo

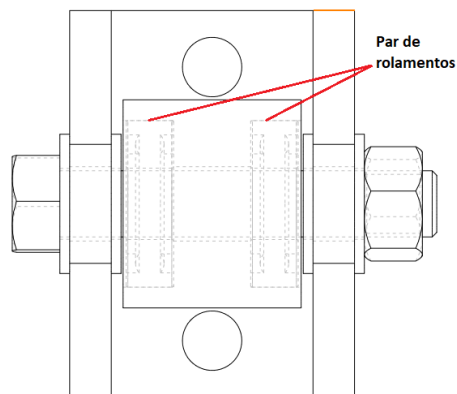


Figura 15 - Par de rolamento em um rolete

Como os rolamentos não serão expostos a altas rotações, optou-se pela seleção do rolamento de acordo com sua capacidade de carga dinâmica de catálogo (C_{10}).

A metodologia exposta por Shigley [35] foi utilizada para o cálculo da carga dinâmica, conforme as Equações 36 e 37. Ainda, levou-se em considerações que os rolamentos sofreriam apenas cargas radiais, mas algum pequeno desalinhamento vindo do processo construtivo gerando carga axial seria tolerado a partir da escolha de rolamentos de esferas.

$$C_{10} = a_f F_D \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0) \cdot (1 - R_D)^{\frac{1}{b}}} \right]^{1/a} \quad (36)$$

$$x_D = \frac{60 \cdot L_D \cdot n_D}{60 \cdot L_R \cdot n_R} \quad (37)$$

Os dados utilizados para encontrar a carga C_{10} e a vida característica x_D estão expostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Dados para cálculo da carga dinâmica no rolamento

Símbolo	Designação	Valor
a_f	Fator de aplicação de carga	1,5 para aplicações de impacto leve
F_D	Carga radial	$\frac{R_2}{4} = 460,25$ [N]
x_0	Parâmetro de confiabilidade de Weibull	0,02
$(\theta - x_0)$	Parâmetro de confiabilidade de Weibull	4,439
R_D	Confiabilidade	0,99
b	Parâmetro de confiabilidade de Weibull	1,483
a	Constante curva log-log relacionando carga x vida de rolamento	3 (para rolamentos de esferas)
L_D	Vida desejada em horas	8000[h] para máquinas de operações curtas em que a interrupção de serviço é de menor importância [35]
n_D	Velocidade desejada em dos rolamentos rpm	43,4* [rpm]
$60 \cdot L_R \cdot n_R$	Vida do rolamento de acordo com o fabricante	10^6 para a SKF [35]

*Velocidade do rolamento para rotação de trabalho do tambor rotativo em 4 rpm.

O valor da carga dinâmica de catálogo encontrada foi de $C_{10} = 3,62$ kN. Para selecionar o rolamento, foi necessário encontrar no catálogo da SKF o rolamento popular que possui diâmetro interno de 12 mm para que um parafuso M12 pudesse

ser utilizado como eixo. Foi selecionado o rolamento SKF 6001, sua carga dinâmica de catálogo é designada na coluna C na Figura 16.

Insira dimensões exatas ou faixa em mm filtrar (e.g. 23-27, -40)

d	D	B	C	C ₀	Designação
mm			kN		
12	30	8	5.07	2.35	16101
12	30	8	5.07	2.35	16101-2RS1
12	30	8	5.07	2.35	16101-2Z
12	32	14	10.5	6.2	4201 ATN9
12	37	17	13	7.8	4301 ATN9
12	28	8	5.4	2.35	▶ 6001
12	28	8	5.4	2.35	▶ 6001-2RSH

Figura 16 - Catálogo iterativo de rolamento de esferas SKF [42]

3.11 SELEÇÃO JUNTA ROTATIVA

A saída dos gases do tambor rotativo para o sistema de condensação requer um elemento que forneça um selo mecânico, de forma, a permitir o fluxo de gases pelo tubo da junção rotativa para o tubo da junção estacionária. Esse elemento mecânico é denominado de junta rotativa.

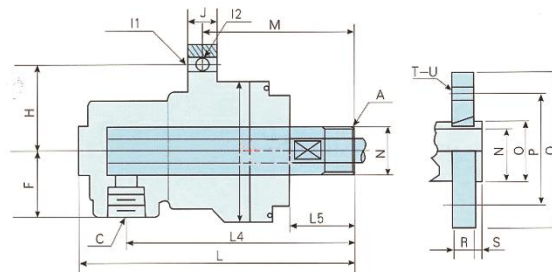
Para a seleção da junta em catálogo é necessário saber a velocidade de rotação à qual ela estará exposta, a pressão e temperatura empregada, o fluido utilizado e as dimensões da tubulação de entrada e saída.

Realizada uma pesquisa de mercado para comparar o preço, optou-se pela aquisição da junta da fabricante Crane Seal [43]. Utilizando o catálogo de junta rotativa para alta temperatura, com óleo quente ou vapor como fluido de trabalho selecionou-

se a junta de simples passagem com entrada e saída de 1" de acordo com a Figura 17.



Condições de uso
 Fluido: Óleo quente sob alta temperatura e vapor superaquecido.
 Pressão máxima: 20 bar.
 Temperatura máxima: 343°C
 Rotação máxima: 200 rpm
 Nota: A especificação de tamanho, a pressão de uso e velocidade também podem ser diferentes.



QRS-G QRS-P

规格	型号	A	C	E	F	H	I1	I2	J	L	L4	L5	M	Q	P	N	O	R	S	T	U
20	QRD20	R3/4	Rc3/4	96	42	55	10	10	25	182	152	40	104	105	75	18	27	16	12	4	14
25	QRD25	R1"	Rc1"	96	46	60	10	10	25	202	158	48	112	115	85	23	33.5	16	12	4	14

Figura 17 - Catálogo junta rotativa para altas temperaturas (Adaptado de [44])

3.12 JUNTA DE EMPANQUE PARA TAMPA DO TAMBOR ROTATIVO

Para garantir a vedação e, assim, evitar que os gases produzidos no processo de pirólise saiam do tambor rotativo pela tampa de entrada de resíduos, foi necessário a utilização de um cordão de empanque. Como o cordão seria estático, para a seleção do cordão optou-se pela escolha em função da temperatura empregada, no caso de 500°C. O cordão escolhido é um exemplo da sua montagem e podem ser observados na Figura 18 e Figura 19.




			
T (°C)		550	
P (Bar)	200	100	50
V (m/sg)	1,5	1,5	20
pH		0-14	



Figura 18 - Seleção de cordão de empanque do catálogo da Vamiel [45]



Figura 19 - Exemplo de montagem [46]

3.13 SEGURANÇA NO TAMBOR ROTATIVO

Com a finalidade de evitar o surgimento de pressões positivas dentro do tambor rotativo, ocasionadas por alguma avaria nas tubulações, optou-se pela inserção na tampa de um sistema de medição de pressão com uma válvula manual de alívio.

3.14 GEOMETRIA DA BANCADA DE SUSTENTAÇÃO DO FORNO

Com o objetivo de armazenar todos os componentes do forno de carbonização e facilitar o seu deslocamento, foi desenvolvida uma bancada de sustentação.

Para a sua concepção, foi designado que suas dimensões deveriam ser menores que 1,5 x 1 m para que, se necessário, o forno pudesse ser transportado em um atrelado/reboque. Ainda, para sua construção seria utilizada uma barra de 6 m de

tubo quadrado de 50 x 50 mm com 3 mm de espessura, fabricado em aço estrutural S235JR.

A Figura 20 apresenta a geometria da bancada.

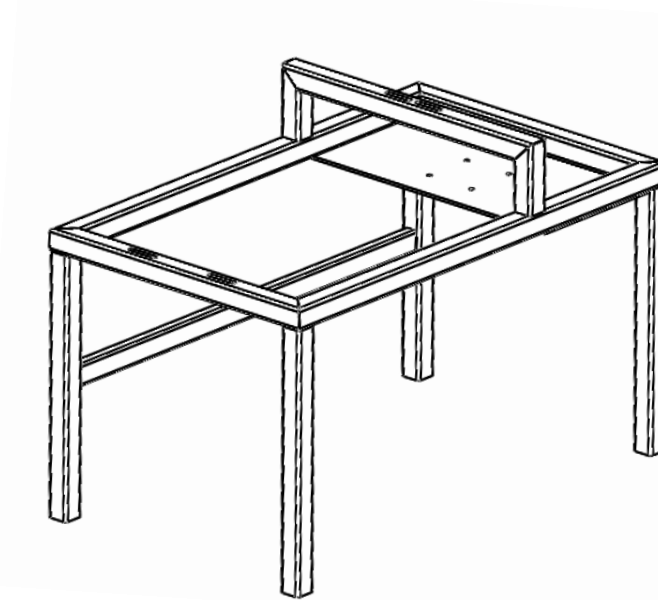


Figura 20 - Geometria da bancada

A partir da obtenção da massa total do conjunto do forno (aproximadamente, 110 kg), optou-se por realizar uma simulação no software *Ansys AIM* para determinar a carga máxima atuante na estrutura e perceber se era possível a utilização do tubo quadrado.

A malha foi calculada pelo software com adaptação de curvatura e não foi realizado refino (Figura 21). Para a simulação, estimou-se o peso do conjunto forno mais acionamento e, então, trabalhou-se com a força peso distribuída em forma de pressão sob as longarinas laterais da bancada (Figura 23) e sobre os locais onde seriam posicionados os roletes (Figura 22).

A condição de contorno de apoio fixo (Figura 24), deformação máxima (Figura 25) e tensão máxima (Figura 26) também são evidenciadas. Nota-se que o ponto de união entre a “perna” da bancada com o quadro é o ponto com maior tensão.

Mesmo considerando que será acrescentado cordão de solda neste ponto durante a construção, fica demonstrado que a bancada resiste às cargas aplicadas visto que a tensão de escoamento do aço S235JR é de 235 MPa.

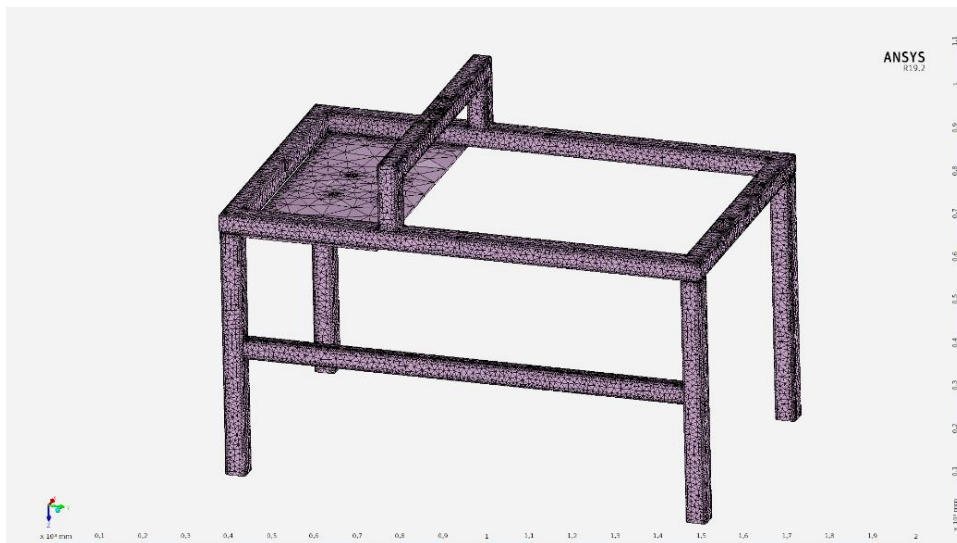


Figura 21 - Malha da estrutura

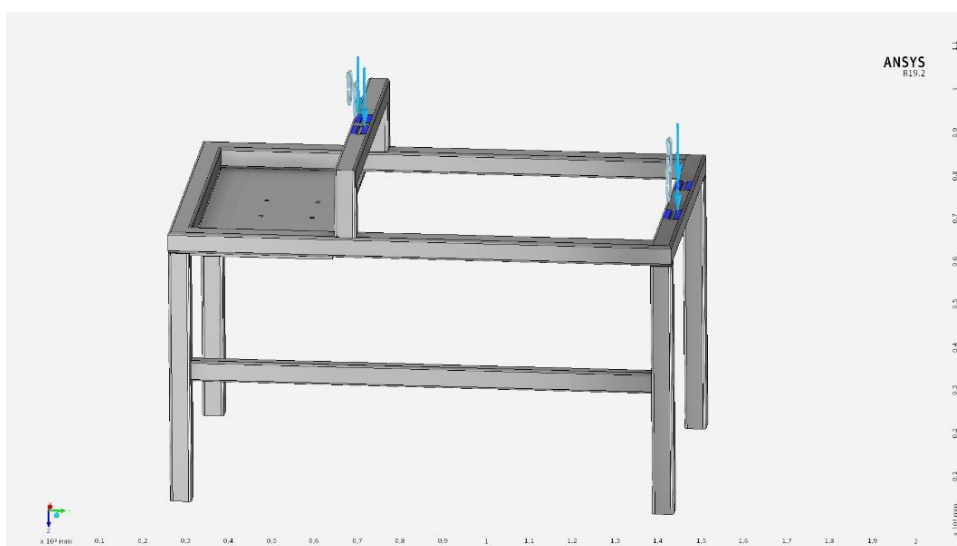


Figura 22 - Força dividida nos roletes encontradas em 3.10.

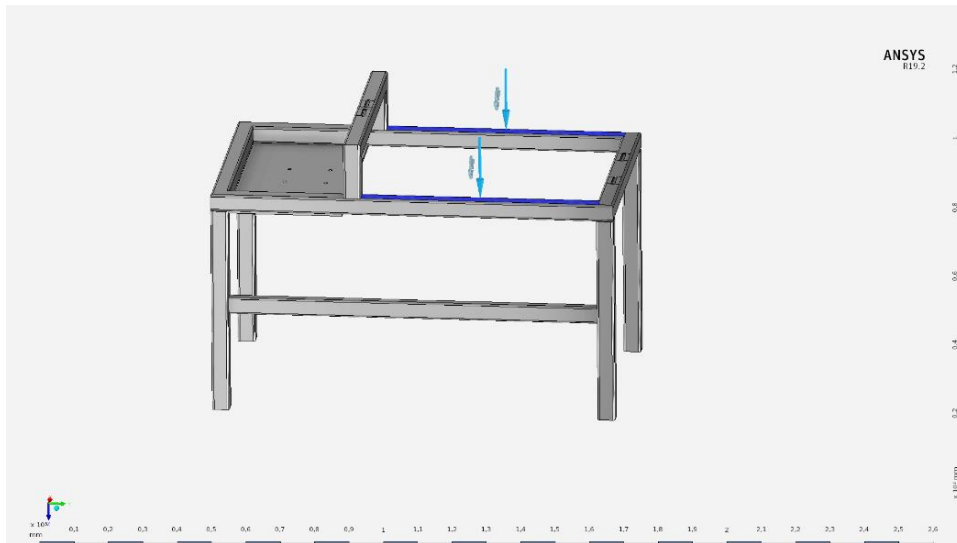


Figura 23 - Pressão devido a força peso da capa do forno sob as laterais da mesa

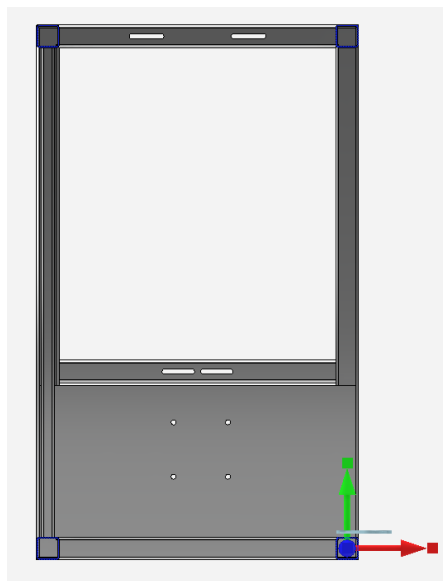


Figura 24 - Apoio fixo (em azul) sob os 4 pés da bancada

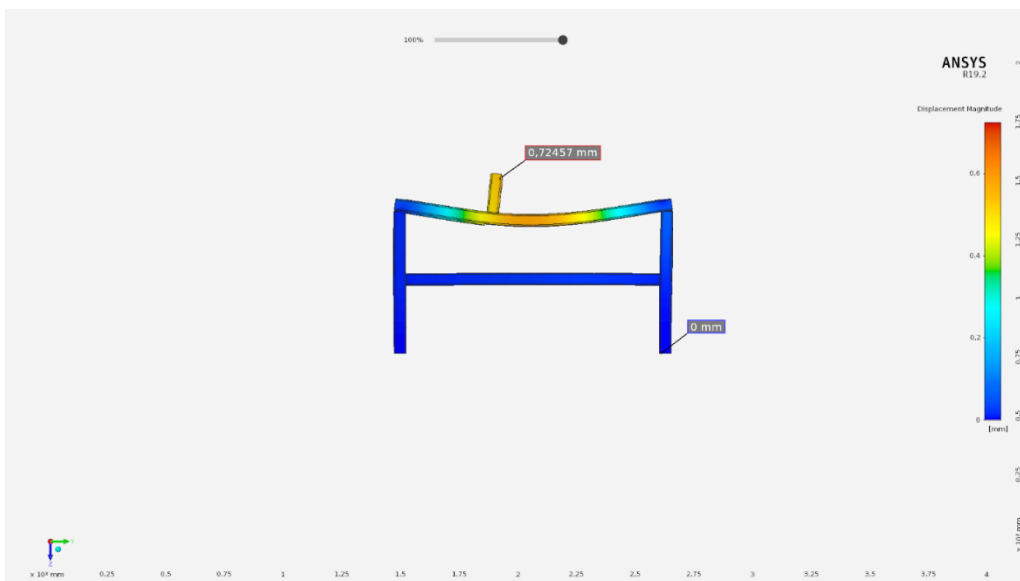


Figura 25 - Deslocamento máximo na bancada



Figura 26 - Tensão máxima equivalente de von-Mises na bancada.

3.15 CONSTRUÇÃO

Os materiais para a construção do forno foram adquiridos com bolsa oferecida pelo IAPMEI ao autor e seu sócio para financiar a *StartUP Energie*. A descrição dos custos totais pode ser encontrada nos Anexos.

Os materiais adquiridos foram comprados na região de Bragança e alguns importados ou realizado o serviço em outra localidade que dispunha de melhores preços (serviços como maquinagem, calandragem e corte a laser).

A construção do forno carbonizador de resíduos sólidos urbanos foi realizada do mês de maio até agosto de 2020 nas dependências do Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) do Instituto Politécnico de Bragança, onde se utilizaram: máquina de solda *MIG 453* modular (Figura 27), furadora de bancada EFI Portugal modelo FJR N° 2 (Figura 28), serrote de fita *Optimum* modelo S181 (Figura 29), guilhotina Guifil modelo mini 320 (Figura 30), máquina de corte a plasma *Air Cutter LG-60* (Figura 31), e utilizou-se também uma rebarbadora (Figura 32) para tratamento das superfícies cortantes resultantes dos cortes dos materiais.



Figura 27 - Máquina de solda MIG 453 modular



Figura 28 - Furadora de bancada EFI Portugal modelo FJR N° 2



Figura 29 - Serrote de fita Optimum modelo S181



Figura 30 - Guilhotina Guifil modelo mini 320



Figura 31 - Máquina de corte a plasma Air Cutter LG-60



Figura 32 - Rebarbadora

Capítulo 4

4 RESULTADOS

Após o dimensionamento e seleção dos componentes críticos do forno carbonizador procedeu-se o seu desenho no software *Solidworks* e a partir do desenho das peças, pode-se dar início a sua construção.

4.1 MONTAGEM NO *SOLIDWORKS*

O conjunto de Figuras Figura **33** até Figura **41** apresentam a montagem do forno carbonizador e evidenciam as submontagens no software *Solidworks*.

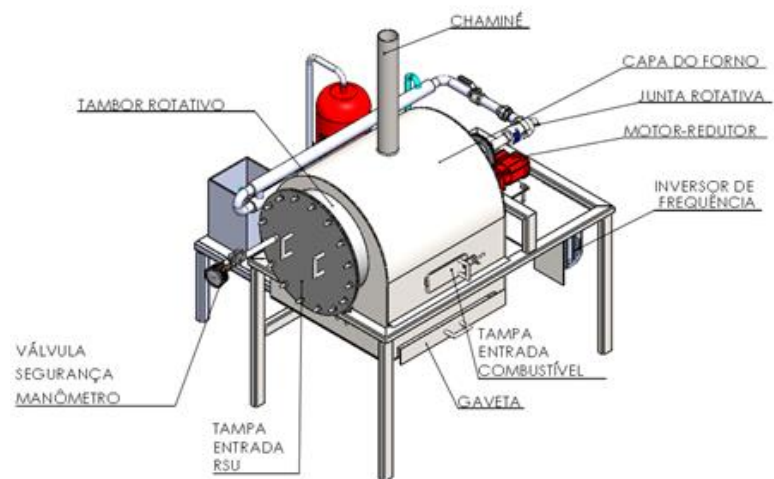


Figura 33 - Forno carbonizador com seus componentes principais

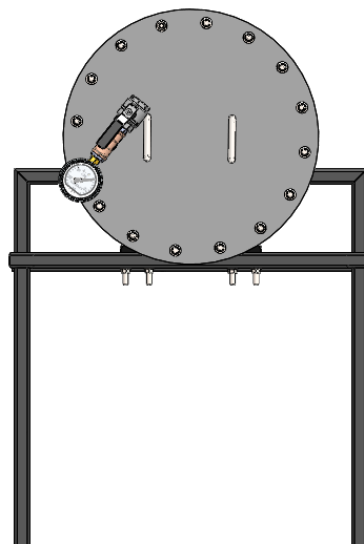


Figura 34 - Tampa de entrada de RSU com sistema de segurança composto por manômetro e válvula de alívio de pressão manual, conforme descrito no item 3.12.

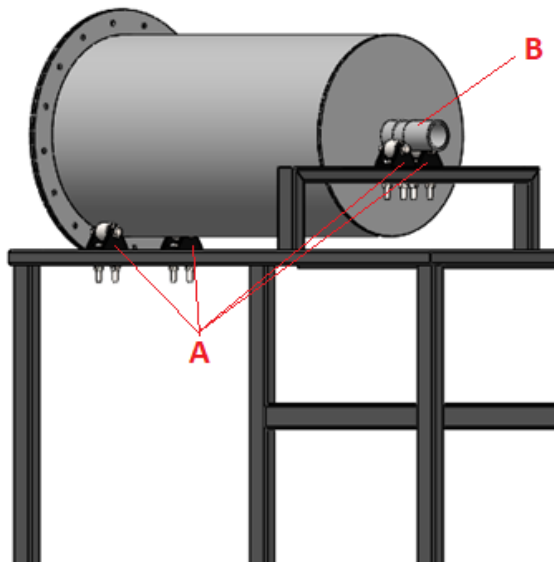


Figura 35 - Tambor rotativo apoiado sobre 4 roletes (A) e o eixo de transmissão (B), conforme itens 3.10 e 3.9 respectivamente

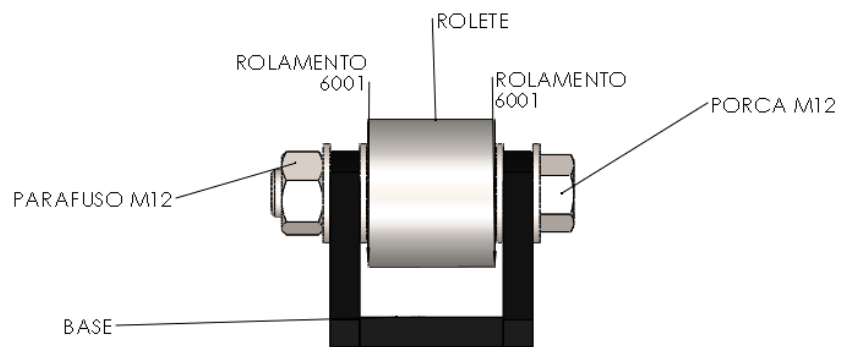


Figura 36 - Montagem do conjunto rolete.

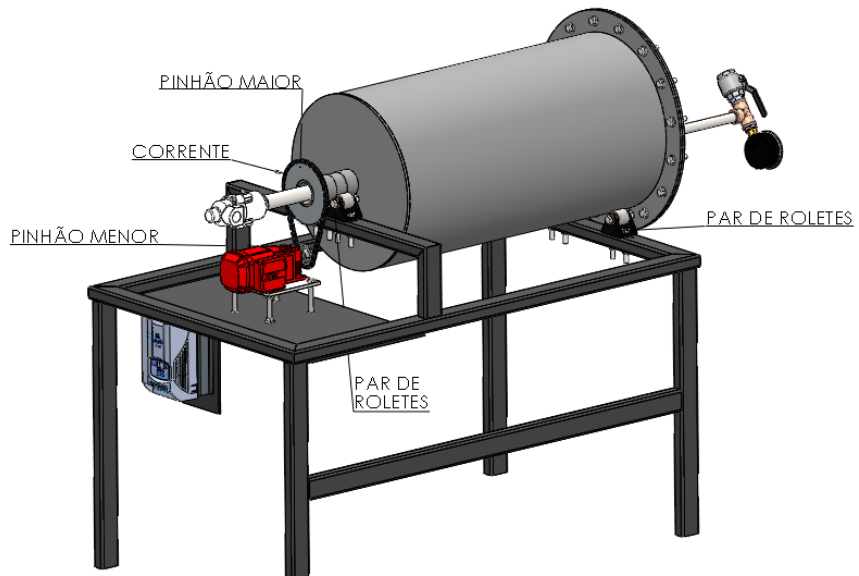


Figura 37 - Conjunto de acionamento conforme itens 3.6 e 3.7



Figura 38 - Aletas para movimentação do RSU dentro do tambor rotativo, conforme item 3.4

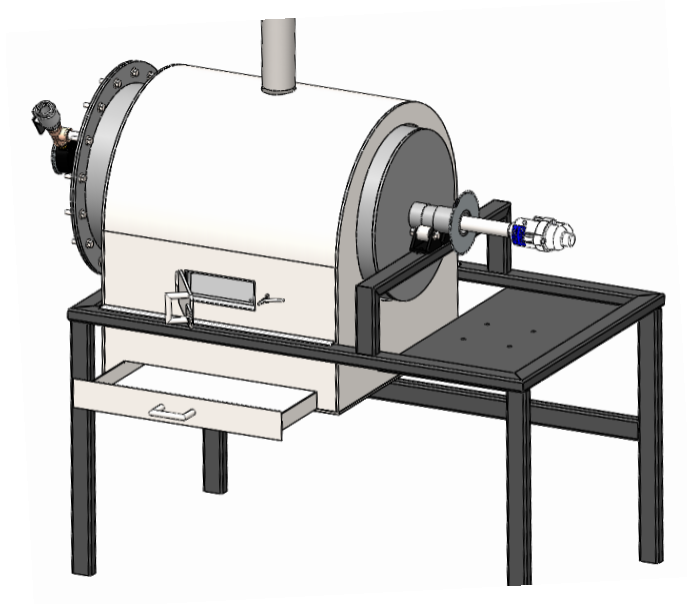


Figura 39 - Capa do forno com a abertura da porta de entrada de combustível e sua gaveta de cinzas

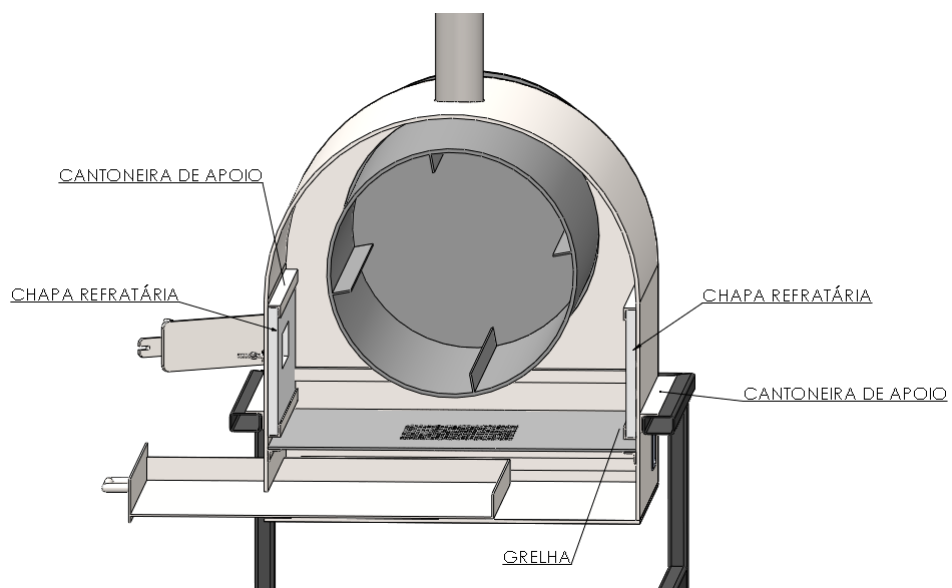


Figura 40 - Vista em corte da capa do forno

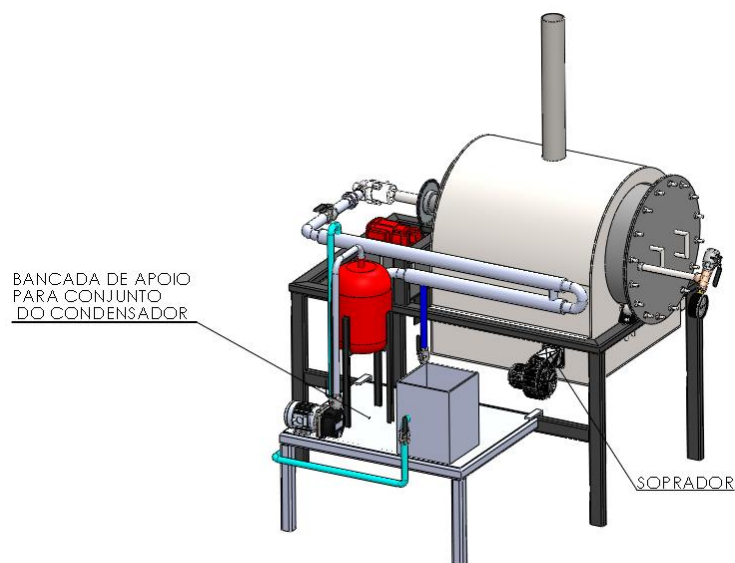


Figura 41 - Vista traseira do forno evidenciando a localização do soprador, conforme item 3.2.5.1

4.2 CONSTRUÇÃO

Os itens necessários para a construção foram fabricados no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), com exceção dos serviços de fabricação como a corte a laser, calandragem e maquinagem e itens normalizados como, por exemplo, os pinhões, correntes, válvulas, motor etc. As Figuras Figura 42 até Figura 46 apresentam as etapas da construção.



Figura 42 - Fabricação da capa do Forno



a)



b)



c)



d)

Figura 43 - Pós soldadura das alhetas no tambor rotativo a), soldadura da bancada b), posicionamento da capa do forno sobre a bancada c), pós soldadura da capa do forno com posicionamento do tambor d).

Como pode ser observado na Figura 43 (d), a porta de entrada do RSU é um modelo diferente do mostrado na Figura 33. O modelo em (d) foi utilizado de início, porém, devido aos vazamentos que ele proporcionava, optou-se pela construção de uma nova tampa.



a)



b)



c)



d)

Figura 44 - Bancada montada a), montagem conjunto de acionamento b), inserção da chaminé c), inserção do soprador d).



a)



b)



c)



d)



e)

Figura 45 - Etapas de construção, em a) nota-se as chapas refratárias, os roletes posicionados e a grelha, em b) evidencia o mecanismo fabricado pelo autor e seu parceiro Lucas para corte circular no plasma disponibilizado pelo LTM, c) mostra as soldadura das flanges para fixar a nova tampa, d) nova tampa e e) sistema de segurança da nova tampa



Figura 46 - Ensaio com RSU do forno Carbonizador, nota-se a utilização de lã mineral para reter calor dentro da capa da fornalha (conforme descrito em 3.2.3)

4.3 PRODUTOS DO FORNO CARBONIZADOR

A *startup Energie* utilizou o forno carbonizador para tratar dois tipos de resíduo que ocasionam impactos ambientais no distrito de Bragança – Portugal, são eles o bagaço da azeitona e os resíduos destinado ao aterro sanitário de Urjais (operado pela empresa intermunicipal Resíduos do Nordeste). Esses resíduos são constituídos por 30 a 35% de bio-resíduos, 14 a 17% de plásticos, 11 a 13% de têxteis/fraldas e até 10% de papel cartão. Os ensaios foram realizados entre as temperaturas de 300 a 350°C com elevação gradual da temperatura através de alimentação da fornalha com lenha. Após atingir a temperatura de pirólise, a amostra era mantida nesta temperatura por 30 minutos até 1 hora. Por fim, a amostra era deixada a arrefecer dentro do tambor rotativo e depois colhido o carvão e o bio-óleo do processo.

A Figura 47 mostra o tambor com esses resíduos.



a)



b)

Figura 47 - Tambor rotativo em a) com o bagaço seco da azeitona e em b) com os resíduos indiferenciados do aterro de Urjais

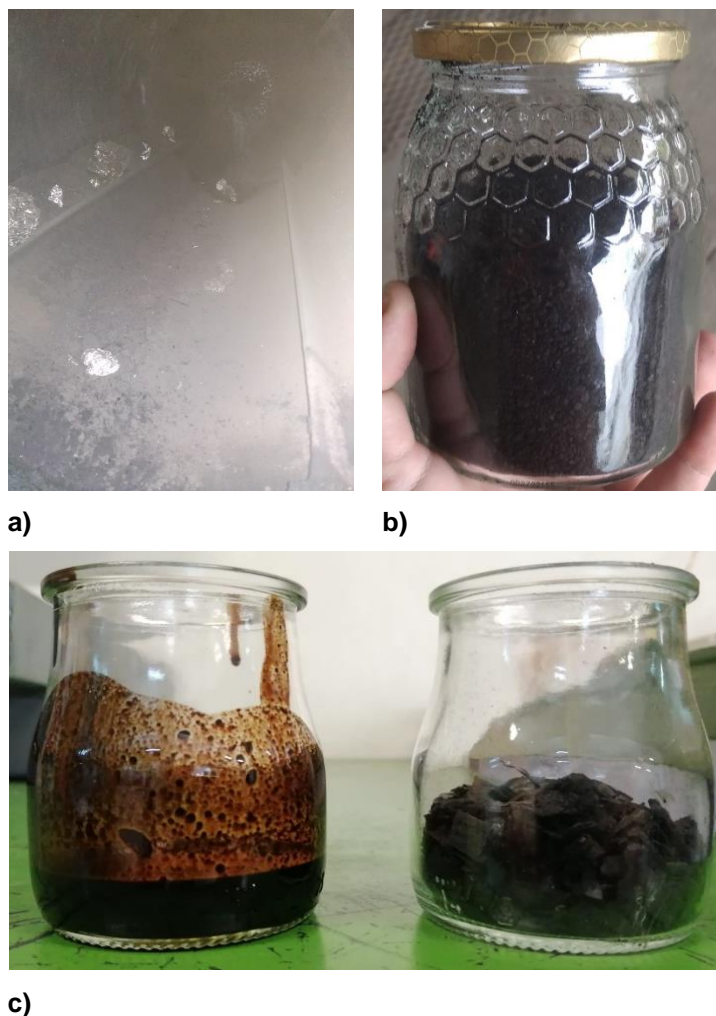


Figura 48 - Produtos do ensaio no forno carbonizador, em a) nota-se o acúmulo de pó de carvão de RSU sobre as aletas do tambor e nota-se pedaços metálicos de alumínio derivados de caixa de leite padrão *Tetra Pak*, em b) apresenta o carvão obtido do bagaço da azeite, em c) apresenta a amostra de bio-óleo e carvão de coletada de um ensaio com RSU

A realização dos ensaios com bagaço de azeitona e RSU evidenciaram a utilização de 2 a 3 vezes mais combustível para alimentar a fornalha do que a estimada no balanço energético.

4.4 ENSAIOS QUÍMICOS

Para a caracterização do carvão, é necessário ensaios segundo normas como a ASTM D5868/D5865-19, EN ISO 1716, ISO 1928, AS1038.5 referenciados por Fallavena [47].

A importância da caracterização do carvão dá-se pelo fato da determinação da sua utilização na indústria. Basicamente, os ensaios para caracterização são a determinação de humidade, cinzas, materiais voláteis, poder calorífico superior e inferior, teor de carbono, hidrogênio, azoto e enxofre.

Devido ao elevado custo para a realização dos ensaios indicados acima, bem como na aquisição das normas mencionadas, procedeu-se, nas dependências dos laboratórios de Engenharia Química do Instituto politécnico de Bragança, à realização de dois ensaios no carvão: determinação de humidade e cinzas. Os ensaios utilizados foram baseados nas normas ABNT NBR 16508 [48], ABNT NBR 16586 [49], para a determinação de humidade e cinzas, respectivamente. As normas utilizadas são brasileiras, pela facilidade de acesso pelo autor, pois encontram-se na base de dados da biblioteca da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Os equipamentos utilizados estão expostos na Figura 49.



a)

b)



c)

Figura 49 - Equipamentos utilizados nos ensaios no laboratório de química do IPB, a) balança de precisão, b) estufa para determinação de humidade com secagem a 105°C, c) mufla para determinação de cinzas com temperatura de 500°C.

Os percentuais de humidade do carvão tanto de bagaço seco de azeitona quando de resíduos sólidos urbanos produzidos pelo forno carbonizador ficaram com valores na faixa de 1,5 a 2%. Os percentuais de cinza de ambas as amostras ficaram, em torno, de 7 a 8%. O percentual elevado de cinzas limita a utilização do carvão em aplicações domésticas, uma vez que os pellets convencionais de madeira possuem no máximo 2% de cinzas [50].

4.5 PELETIZAÇÃO DO PÓ DE CARVÃO

O pó do carvão extraído do bagaço da azeitona e dos resíduos sólidos urbanos foi processado em uma peletizadora, pois esse era o intuito da *StarUP Energie*. Contudo, devido à baixa humidade não ocorreu aglomeração do carvão para formar os pellets.

O problema foi solucionado adicionando uma substância aglutinante, no caso pó de madeira. A amostra de pellets pode ser observada na Figura 50, nota-se ao fundo o pó de carvão não aglomerado.



Figura 50 - Pellets confeccionados a partir do carvão obtido no forno carbonizador

Capítulo 5

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho consistiu no projeto mecânico de um forno robusto e com baixo custo para a carbonização, por pirólise, de resíduos sólidos urbanos, com capacidade para 10 kg. Além do projeto, foi realizada a sua construção, testes e extraído os produtos do processo de carbonização.

O forno é composto, basicamente, pelo sistema de acionamento, fornalha, reator e bancada. Foi projetado no modelo de tambor rotativo. A escolha deste modelo se deu, pelo facto, de proporcionar maior troca térmica e mistura entre os resíduos, comparado a um reator de leito fixo e baixa complexidade comparada ao reator de leito fluidizado. Ainda, o modelo a tambor rotativo proporcionou alimentação com diferentes tamanhos de resíduos, com o objetivo de extração de carvão por pirólise convencional.

Foi utilizada a patente de invenção número 1001690-2 A2 [6] com o intuito de extrair dados para projeto, funcionamento e design de um forno rotativo. Baseado na metodologia exposta por Kodera [14], foi realizada a estimativa de calor necessária para a pirólise e, a partir de dados extraídos dessa estimativa, deu-se início ao projeto do forno e seleção de componentes em catálogo.

O tambor rotativo foi construído com aço S235JR (aço inadequado para temperaturas elevadas segundo a norma ASME), contudo, foi utilizado por questões orçamentais e por se tratar de um protótipo onde serão realizados um número limitado de ensaios.

Para minimizar o problema, os ensaios no forno foram realizados com temperatura que não ultrapasse o valor limite de 350°C. Por fim, foi desenhado uma bancada para agrupar todos os componentes do forno e facilitar seu deslocamento. Para o dimensionamento da bancada, recorreu-se à simulação numérica com um software de elementos finitos, para avaliar sua resistência estrutural.

Após o término do projeto e com o auxílio do investimento disponibilizado pela *Startup Energie*, foi construído o forno e realizados alguns testes de cada subconjunto para verificar seu funcionamento. Ajustes mecânicos foram realizados (como a troca do modelo de tampa para o tambor rotativo devido a problemas de estanqueidade) e então, foram realizados ensaios no bagaço da azeitona e nos resíduos sólidos urbanos coletados do aterro sanitário de Urjais.

Como era de se esperar, a quantidade de combustível para a realização da carbonização por pirólise foi maior do que as estimativas iniciais, uma vez que a eficiência térmica não foi o foco deste trabalho. Todavia, os ensaios mostraram-se importantes para validar a hipótese de que é possível realizar a pirólise de RSU com baixas temperaturas e obter carvão homogêneo, sem resquícios de matéria não degradada.

Com os ensaios foi possível obter os produtos desejados da pirólise e realizar análises iniciais do carvão. A constatação da baixa humidade e o do teor elevado de cinzas das amostras levaram à necessidade de um tratamento do carvão, antes de ser realizada sua peletização e a não recomendação para aplicações em caldeiras residenciais.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

- Elaborar análise de troca térmica e eficiência do forno para então construir a sua análise de viabilidade econômica, caso seja de interesse tornar esse modelo comercial.
- Realizar análise termoquímica aprofundada da pirólise de resíduos sólidos urbanos com o intuito de trabalhar com os dados destes resíduos para estimativa de calor e caudais mássicas.
- Redimensionar o forno com a análise termoquímica aprofundada descrita no item anterior.
- Realizar a análise completa da caracterização do carvão, bem como, caracterizar o bio-óleo e os gás de síntese.

- Verificar a estanqueidade da capa do forno no que concerne aos fumos ejetados pela queima de lenha na fornalha.
- Realizar a automação do forno, com a introdução de sensores para controlar os parâmetros do processo como rotação, tempo de permanência, gradiente de temperatura no tambor, taxa de alimentação da fornalha e de ar, controle de humidade dos gases de pirólise e controle de emissões.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Irena, “International Renewable Energy Agency,” *Rethink. Energy 2017*, 2017.
- [2] L. Losekann and M. Hallack, “Novas energias renováveis no Brasil: Desafios e Oportunidades,” *RCIpea*, vol. Volume 2, p. 678, 2018.
- [3] Empresa de Pesquisa Energética, “Matriz Energética e Elétrica.” <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> (accessed Mar. 20, 2020).
- [4] Abrelpe, “Parorama dos Resíduos Sólidos no Brasil,” p. 73, 2018, [Online]. Available: http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf.
- [5] Presidência da República Federativa do Brasil, “Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010,” 2010. <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>.
- [6] J. R. S. de Lima, “Forno Para Carbonização De Resíduos E Processo De Produção De Briquetes De Carvão,” 2013.
- [7] L. Voloch and L. Peralta, “O Uso Da Carbonização Como Alternativa De Tratamento E Destinação De Resíduos Sólidos,” *Geogr. Opportuno Tempore*, vol. 1, pp. 364–379, 2014, [Online]. Available: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/Geographia/article/view/20301>.
- [8] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design*. Burlington: Elsevier, 2010.
- [9] P. T. Williams, “Other Waste Treatment Technologies: Pyrolysis, Gasification, Combined Pyrolysis–Gasification, Composting, Anaerobic Digestion,” in *John Wiley & Sons*, Segunda Ed., 2005, pp. 325–366.
- [10] D. Czajczyńska *et al.*, “Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector,” *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 387–394, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.275.
- [11] D. Chen, L. Yin, H. Wang, and P. He, “Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review,” *Waste Manag.*, vol. 34, no. 12, pp. 2466–2486, 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2014.08.004.
- [12] L. N. Wang, L.H., Zhang, Y., Song, “Experimental research on pyrolysis process of waste rubber,” *Liaoning Gongcheng Jishu Daxue Xuebao (Ziran Kexue*

- Ban)/J. Liaoning Tech. Univ. (Natural Sci. Ed., vol. 25, pp. 336–338, 2006.
- [13] A. A. Boateng, *Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes*, Second Edi. Waltham, 2016.
- [14] Y. Koderá and M. Kaiho, “Model Calculation of Heat Balance of Wood Pyrolysis,” *J. Japan Inst. Energy*, vol. 95, no. 10, pp. 881–889, 2016, doi: 10.3775/jie.95.881.
- [15] H. Yasuda, S. Y., S. Sakai, S. Wajima, and J. Nakagome, H, “Jpn. Inst. Energy,” vol. 95, no. 4, pp. 296–302.
- [16] W. A. Bizzo, “Apostila de Curso - Geração, Distribuição e Utilização de Vapor.” Campinas, pp. 1–17, 2003.
- [17] E. Bazzo, *Geração de Vapor (2a edição).pdf*, Segunda Ed. Florianópolis: Editora UFSC, 1995.
- [18] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, Sexta Edic. Rio de Janeiro, 2008.
- [19] Susil&Pallets, “Motoredutores/Ventiladores.” http://www.susil.pt/epages/960840106.sf/pt_PT/?ObjectPath=/Shops/960840106/Categories/Category2.
- [20] M. C. da Silva and G. O. dos Santos, “Densidade Aparente De Resíduos Sólidos Recém Coletados,” *V Connepi*, no. 1, p. 5, 2010, [Online]. Available: <http://connepi.ifal.edu.br/ocs/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/167/157%5Cnpapers3://publication/uuid/48AF6545-7908-49DA-A141-D6C65D571BA5>.
- [21] F. A. D. O. Melo, J. N. Da Silva, J. S. e Silva, C. P. Sampaio, and D. F. Silva, “Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar,” *Acta Sci. - Technol.*, vol. 32, no. 2, pp. 129–136, 2010, doi: 10.4025/actascitechnol.v32i2.1575.
- [22] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, “Rules For Construction Of Pressure Vessels: Part UG,” *ASME Boil. Press. Vessel Code an Int. Code*, vol. 8, p. 110, 2001.
- [23] Brown McFarlane, “Chapas de Aço para Vasos de Pressão (ASME SA516 Grau 70 e ASTM A516 Grau 70).” <https://www.brownmac.com/pt/produtos/chapas-de-aco-para-vasos-de-pressao/asme-sa516-astm-a516-gr-70> (accessed Mar. 20,

- 2020).
- [24] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, "Rules For Construction Of Pressure Vessels: Subpart 3," *ASME Boil. Press. Vessel Code an Int. Code*, vol. 8, pp. 682–759, 2001.
 - [25] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, "Rules For Construction Of Pressure Vessels: Subpart 2," *ASME Boil. Press. Vessel Code an Int. Code*, vol. 8, pp. 665–704, 2001.
 - [26] L. M. R. Mesquita, P. A. G. Piloto, M. A. P. Vaz, and P. M. M. Vila Real, "Ensaio De Resistência Ao Fogo De Vigas Em Aço Protegidas Com Tinta Intumescente," *6º Congr. Nac. Mecânica Exp.*, p. 10, 2006.
 - [27] N. Lopes, P. M. . Vila Real, P. Piloto, L. Mesquita, and L. Simões da Silva, "Modelação Numérica Do Comportamento Ao Fogo De Uma Estrutura Em Aço Inoxidável Em Situação De Incêndio," *V Congr. Construção Metálica e Mista*, 2005.
 - [28] F. W. Sears, M. Zemansky, H. D. Young, and R. A. Freedman, "Física 2: Termodinâmica e Ondas." São Paulo, p. 310, 2004.
 - [29] SEW Eurodrive, "Seleção de Acionamentos Métodos de Cálculos e Exemplos," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 1, no. 9, p. 224, 2013.
 - [30] J. L. Fevereiro, "Como Calcular A Potência Do Motor E Selecionar O Redutor No Acionamento De Máquinas E Equipamentos." p. 122.
 - [31] C. Paladini, *Projeto de Máquinas*. Santo André.
 - [32] Universal Motors, "Catálogo de Motores Elétricos." p. 48, 2009.
 - [33] Universal Motors, "Catalogo Redutores." p. 60, 2020.
 - [34] Yaskawa, "J7 Drive Technical Manual." p. 96, 2007.
 - [35] J. E. Shigley, C. R. Mischke, and R. G. Budynas, *Projeto de Engenharia Mecânica*, 7th ed. New York, 2005.
 - [36] Eurocorreias, "Corrente De Rolos Serie Europeia - DIN 8187 - ISO 606." p. 2, 2020.
 - [37] Eurocorreias, "Catálogo Eurocorreias." p. 62.
 - [38] R. C. Hibbeler, *Resistência dos Materiais*, 5th ed. 2006.
 - [39] ASME Boiler and Pressure Vessel Committee, "Rules For Construction Of Pressure Vessels: Appendix L," *ASME Boil. Press. Vessel Code an Int. Code*, vol. 8, pp. 512–568, 2001.

- [40] Material Property Data, “EN S235JR High Manganese, Structural, Hot Rolled, Base Steel,” *MatWeb*. <http://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck> (accessed Mar. 20, 2020).
- [41] NSK, “Catálogo Geral NSK.” http://www.nsk.com.br/upload/file/flipbook/Catalogo_Geral_NSK/Catalogo_Geral_NSK/mobile/index.html#p=28.
- [42] SKF, “SKF Plain Bearing Calculator.” <https://www.skfbearingselect.com/#/type-arrangement/single-bearing>.
- [43] L. Qingdao Crane Sealing Technology CO., “Qingdao Crane Sealing Technology CO., Ltd.,” 2020. https://craneseal.en.alibaba.com/pt_PT/?spm=a2700.icbuShop.88.16.4b3879920EIUXB (accessed Mar. 20, 2020).
- [44] QRS, “QRS Series Duoflow rotary joint hot oil rotary joint high temperature rotary joint.” https://www.alibaba.com/product-detail/QRS-Series-Duoflow-rotary-joint-hot_1600051551266.html?spm=a2700.md_pt_PT.pronpeci14.5.17457b91ty2RqB.
- [45] Vamiel, “Catálogo Geral Vamiel: Materiais Para a Indústria e Navegação.” Matozinhos, p. 35.
- [46] H. Chem, “Plastic Waste to Gasoline Pyrolytic Recycling,” 2019. <https://www.youtube.com/watch?v=f8-u32PGGKA&t=121s> (accessed Mar. 20, 2020).
- [47] V. L. V Fallavena, C. S. De Abreu, T. D. Inacio, and M. N. Carla, “Caracterização Detalhada e Relato do Uso Do Material De Referência Certificado De Carvão Brasileiro,” *Quim. Nova*, vol. 36, no. 6, pp. 1–20, 2013.
- [48] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR: 16508.” p. 6, 2016.
- [49] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR: 16586.” p. 4, 2017.
- [50] European Biomass Association, “ENplus: Sistema de Certificação de Qualidade para Pellets de Madeira.” p. 7, 2015.

7 ANEXOS

Anexo I: Gastos com o forno carbonizador.

CONTROLE DE CUSTOS			
DATA	FORNECEDOR	VALOR	PRODUTO
26/02/20	Reconco	€ 4,00	Tela Aço
26/02/20	Reconco	€ 12,92	Argamassa Refrataria
11/03/20	O Feliz Metalomecânica	€ 317,89	Corte das peças + chapa aço
11/03/20	Ferpronor	€ 84,00	Perfis Aço Carbono
11/03/20	Bricofel (* Sem Fatura)	€ 13,00	EPI's
11/05/20	Bricofel (* Sem Fatura)	€ 98,00	Inversor, 2 rodas dentadas, corrente, cabo, tomada, fita isolante, 6 eletrodos, 2 discos de corte
11/05/20	Bricofel	€ 150,00	Motor e redutor
13/05/20	Bricofel (* Sem Fatura)	€ 10,75	1/2 Caixa Eletrodo
14/05/20	Bricofel (* Sem Fatura)	€ 10,75	1/2 Caixa Eletrodo
15/05/20	Metalomecânica Rolgranjo (*Sem fatura)	€ 160,00	Calandragem tampa forno, tubo para lixo
15/05/20	Metalomecânica Farboque (*Sem fatura)	€ 45,00	Chapa perfurada 1m², 6m barra chata 3mm, 4 rodinhas para bancada.
19/05/20	Aki	€ 6,41	Madeira, fita métrica, alicate e prego para gabarito do isolamento.
20/05/20	Crane Sealing Technology	€ 93,05	Junta rotativa
21/05/20	Jomarco ferragens	€ 11,30	Gonzo e Parafusos M10
21/05/20	Farboque (*sem fatura)	€ 50,00	1,5 m² Chapa 3mm
26/05/20	Conductaclim	€ 31,01	Curvas, Válvula, União para Condensador
29/05/20	Aki	€ 24,98	Junta plana e redonda isolante
01/06/20	Conductaclim	€ 3,97	2 luvas
02/06/20	Agrirol	€ 39,40	8 rolamentos e 2 barras roscadas
03/06/20	Bricofel (*sem fatura)	€ 38,00	tanque bióleo
03/06/20	Pinto e Cruz	€ 47,64	acessórios para tubulações
04/06/20	Sanitop	€ 9,44	acessórios para tubulações bomba de vácuo
04/06/20	Bricofel (*sem fatura)	€ 19,80	Serra copo, cobre, vacuômetro, redução 1" para 1/2"
09/06/20	Gara.Autocant.Lda(*sem fatura)	€ 80,00	Usinagem peças
15/06/20	Brigantia	€ 70,00	Taxas Alfandega
16/06/20	Bricofel/ AKI	€ 12,45	Espigão, Redução, Abraçadeiras e Mangueira
13/06/20	AKI	€ 3,87	Reduções para vacuometro e Abraçadeira
16/06/20	AKI	€ 1,99	Veda Rosca
19/06/20	Agrozinos	€ 9,50	Borracha para vedação
22/06/20	Aliexpress	€ 18,17	Arduino uno r3, sensor temperatura max6675 e capa acrílico arduino
22/06/20	Electrofun	€ 22,06	Display lcd, protoboar e jumpers
22/06/20	Distrelec	€ 43,44	sensor de umidade mk33-w
23/06/20	Davi Nuno	€ 4,00	Lã de rocha 1x0,6m
25/06/20	Aliexpress	€ 11,12	Potenciômetro, cabos fêmea, capa acrílico LCD
01/07/20	Bricofel	€ 17,84	Nipel 1/2" broca pra serra copo, 2 reduções 1" para 1/2"
01/07/20	Minfo Informática	€ 5,43	Alimentador de energia 9V 1A
01/07/20	Agrijoia	€ 49,99	Bomba de água
03/07/20	Susil&Pellets	€ 57,81	Ventilador
07/07/20	Bricofel	€ 26,50	Mandril furadeira, redução 1/2' para 3/8"
10/07/20	Eletrônica	€ 70,00	Serviço de consultoria eletrônica
13/07/20	AKI	€ 6,99	Tinta alta temperatura
14/07/20	AKI	€ 10,15	Caixa elétrica, cabo, conduíte, tomada macho, tomada fêmea.
14/07/20	Bricofel	€ 10,52	3 interruptores
17/07/20	AKI	€ 3,88	Caixa para Arduino e Cola
20/07/20	DaviNuno (*sem fatura)	€ 2,46	Fita Helermã
22/07/20	Gara.Autocant.Lda(*sem fatura)	€ 10,00	Usinagem haste sensor temperatura
28/07/20	Minipreço	€ 3,63	Carvão e fósforo
11/08/20	AKI	€ 7,35	Acessórios para subs. Mangueira
12/08/20	Bricofel(*sem fatura)	€ 3,08	Mangueira e veda rosca
12/08/20	Aki	€ 4,38	Redução 3/4" 1/2"
12/08/20	Gasolina pro aterro de urjais	€ 31,22	Considerando a distância de 71,5 km e a gasolina q comprei por 1,18 na Espanha e depois na segunda Visita a gasolina q comprei em Bragança
13/08/20	Brigantia	€ 18,00	Termômetro
17/08/20	Bricofel	€ 9,45	Macho
24/08/20	Bricofel (*sem fatura)	€ 10,00	Oleo para lubrificar compressor
24/08/20	DavidNuno	€ 2,09	Lã de rocha
25/08/20	Sittio	€ 3,06	Luvas nitrílicas
31/08/20	Bricofel	€ 12,63	Mangueiras extras, vacuometro e adaptador
04/09/20	Acifer	€ 35,00	Chapa aço 5mm 1200x600mm
10/09/20	Centrauto	€ 2,16	Filtro
14/09/20	Repsol (*sem fatura, sem data)	€ 6,00	Diesel para limpeza do cilindro
14/09/20	Bricofel (*sem fatura)	€ 8,00	Bico e eletrodo para plasma
14/09/20	Conductaclim	€ 7,20	Válvula de retenção e casquilhos
14/09/20	Sittio	€ 1,30	3 potes de vidro
14/09/20	Aki	€ 4,99	Manômetro
14/09/20	TemTudo	€ 4,41	Tubo Inox e casquilho
14/09/20	Aki	€ 6,56	Redução 1/2 para 1/4, abraçadeira, válvula...
16/09/20	Aki	€ 1,96	Veda rosca
16/09/20	Assisfluxo	€ 9,50	Borracha vedação
17/09/20	Sittio	€ 2,90	Potes de vidro
21/09/20	Sittio	€ 2,30	Potes de vidro
21/09/20	DavidNuno	€ 4,18	Lã de rocha
22/09/20	Assisfluxo	€ 9,50	Borracha
25/09/20	Bricofel	€ 10,50	Junta Alta temp. Bricofel
01/10/20	Assisfluxo	€ 24,80	Gaxeta Grafitada
TOTAL A PAGAR		€	2.068,28