UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

PROJECÇÃO DE UMA INSTALAÇÃO DE PROCESSAMENTO DE ARROZ USANDO BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA

Autor:

SADALA, Júlio Natubai Condelaque Sadala

Supervisor:

Prof. Doutor. Engº. Jorge Olívio Penicela Nhambiu

Co-Supervisor:

Engº Dionísio Alfredo Langa

Maputo, Agosto de 2024

Projecção de Uma Instalação de Processamento de Arroz Usando Biomassa como Fonte de Energia

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane – como requisito parcial para obtenção de grau em Licenciatura em Engenharia Mecânica.

Supervisor: _____

Co-Supervisor: _____

Coordenador do Curso: _____

Maputo, Agosto de 2024

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante **Júlio Natubai Condelaque Sadala** entregou no dia ____/____/ 2024 as três cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: _____, intitulado**: Projecção de Uma Instalação de Processamento de Arroz Usando Biomassa como Fonte de Energia.**

Maputo, _____ de _____ de 2024

Chefe da Secretaria

_____

FOLHA DE APROVAÇÃO

Júlio Natubai Condelaque Sadala

Projecção de Uma Instalação de Processamento de Arroz Usando Biomassa como Fonte de Energia

Monografia aprovada em _____ de _____ de 2024 como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, pelos professores:

Prof. _____

(Supervisor)

Prof. _____

(Co-Supervisor)

Prof. _____

(Coordenador do Curso)

Maputo, Agosto de 2024

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Júlio Natubai Condelaque Sadala, declaro, sob palavra de honra, que o presente trabalho de licenciatura com tema, Projecção de Uma Instalação de Processamento de Arroz Usando Biomassa como Fonte de Energia, que apresento para o cumprimento dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Mecânica, foi por mim realizado, com base nos recursos que no mesmo se faz referência.

_____

(Júlio Natubai Condelaque Sadala)

Maputo, Agosto de 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu querido e amado irmão, Frederico Natubai Condelaque, por estar presente em todo o meu percurso académico, disponibilizando os recursos à sua disposição para a minha formação e por me ajudar em todas as áreas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pelas oportunidades concedidas, por proteger a mim e a minha família, guiar meus passos e me conduzir sempre em direcção ao caminho do bem.

Agradeço a Universidade Eduardo Mondlane pelo fornecimento de bolsa de estudos, o que possibilitou minha dedicação exclusiva, e por tornar realidade a minha formação em Engenharia Mecânica.

Aos meus Supervisores, Prof. Doutor. Engº. Jorge Olívio Penicela Nhambiu e Engº Dionísio Alfredo Langa, pelas suas orientações durante o trabalho, pelos materiais, pela disponibilidade, paciência, e pelos ricos ensinamentos.

Agradeço em especial aos meus pais, Natubai Condelaque Sadala e Maria Adolfo, por serem a minha base e referência em todos os sentidos. Por todo o amor, esforço, luta e dedicação para que nada me faltasse em nenhum momento da vida. E a minha primogénita irmã, Joana Condelaque, e aos meus irmãos Frederico, Calton, Afonso, António e aos meus sobrinhos (Francisco Toni, em especial), um obrigado de coração pelo amor que vocês me proporcionam a cada dia neste mundo.

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão a cada um aos meus colegas da vida estudantil, que se tornaram meus amigos marcantes ao longo destes anos. Meu profundo agradecimento a Bernardo Jarro, Josepina Zemba, Celso Elias, Edmilson Lufiande, Juclêncio Massangaie, Raimundo Matsinhe, Belarmino Chaúque, Moisés Dandaua, Américo Donça, Lino Boaventura, André Mafunga e Selsia Guirengana. Agradeço pela amizade genuína e por todas as lições valiosas que aprendemos juntos. Sem vocês, essa caminhada não teria sido a mesma. Levo comigo não apenas o conhecimento académico, mas também as memórias e os vínculos que se construíram ao longo do tempo. E sou imensamente grato pela amizade e parceria que desenvolvemos.

Aos meus amigos desde a infância, imensa gratidão por fazerem parte da minha história, digo eu, que os momentos de cumplicidade ficarão sempre guardados no meu coração.

Por fim, gostaria de expressar minha gratidão a família no geral e a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho e para minha formação académica. Este momento marca não apenas o fim de uma etapa, mas também o início de novos desafios e conquistas.

Com sinceros agradecimentos,

Júlio Natubai Condelaque Sadala

RESUMO

Diante da crescente preocupação com o aumento da produtividade agrícola em Moçambique, devido às técnicas limitadas de processamento e produção, apresenta-se neste trabalho, um projecto de uma instalação de processamento de arroz. Tendo como finalidade um projecto de baixo custo e sustentável para o meio ambiente, propõe-se o uso da biomassa (casca de arroz) como fonte de energia da instalação, visto que a biomassa é abundante nos campos de produção de arroz.

Para executar o projecto, foi dimensionada uma caldeira flamotubular de fornalha inteira que é responsável por alimentar um conjunto turbina-gerador de 150 kW de potência de saída. Potência essa, que é usada para alimentar componentes da instalação industrial.

De modo a proporcionar uma boa secagem do arroz durante o seu processamento, foram dimensionados um secador artificial e um termopermutador do tipo banco de tubos que é alimentado pelos gases de combustão à saída da caldeira.

Após o dimensionamento da instalação, foi também avaliada a viabilidade económica do projecto.

Por fim, foram extraídas as conclusões relativamente aos resultados encontrados do projecto e suas devidas recomendações.

Conceitos-chaves: processamento de arroz, caldeira a biomassa, cascas de arroz.

ABSTRACT

With the pressing need to enhance agricultural productivity in Mozambique, this paper introduces a promising project for a rice processing plant for a factory. Aiming for a low-cost and environmentally sustainable project, it is proposed to use biomass (rice husk) as the energy source for the facility, considering that biomass is abundant in the rice production fields.

To carry out the project, an entire furnace fire tubular boiler was designed, which is responsible for powering a turbine-generator set of 150 kW of output power. This power, which is used to power components of the industrial facility.

In order to provide a good drying of the rice during its processing, an artificial dryer and a tube bank type heat exchanger that is fed by the combustion gases at the exit of the boiler were dimensioned.

After the installation dimensioning, the economic viability of the project was also evaluated.

Finally, the conclusions regarding the results of the project and its recommendations were drawn.

Key concepts: rice processing, biomass boiler, rice husks.

TABELA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_f	Área da fornalha	m^2
A_{tc}	Área de troca de calor nos tubos	m^2
A_{tct}	Área de troca de calor no termopermutador	m^2
$A_{tc,cond}$	Área de transferência de calor no condensador	m^2
B	Consumo de combustível no funcionamento activo	kg/s
B_{vazio}	Consumo de combustível no funcionamento vazio	kg/s
$\dot{B}_v$	Consumo de vapor da turbina	kg/kWh
B_c	Consumo de combustível	kg/s
β	Coeficiente de expansão térmica.	-
C^t	Quantidades em massa trabalho de carbono	%
C_c	Factor de correcção devido à influência da região de entrada	-
$C_{p,ar}$	Calor específico do ar	kJ/kg℃
$c_{p,ag}$	Calor específico da água de condensação	kJ/kg℃
$c_{g,boca}$	Velocidade dos gases na boca da chaminé	m/s
$c_{g,base}$	Velocidade dos gases na base da chaminé	m/s
$c_{médio}$	Velocidade média dos gases na chaminé	m/s
D_f	Diâmetro da fornalha	m
d_{in}	Diâmetro interno dos tubos de convecção	m
d_{leito}	Diâmetro do leito	m
d_{boca}	Diâmetro da boca	m
d_{base}	Diâmetro da base	m
$d_{médio}$	Diâmetro da médio	m
ε_f	Emissividade da fornalha	-
ε_{cinz}	Emissividade das cinzas depositadas na superfície interna dos tubos	-
ε_g	Emissividade do gás de combustão	-
ε	Coeficiente de deposição de cinzas	m^2℃$/kW$
ζ	Coeficiente de resistência local na saída da chaminé	-
G_O	Produtividade da turbina	kg/h

H^t	Quantidades em massa trabalho de hidrogénio	%
h_{conv}	Coeficiente de transferência de calor por convecção	kW/m^2°C
h_{rad}	Coeficiente de transferência de calor por radiação	kW/m^2°C
h_1	Coeficiente combinado de transferência de calor dos gases no interior dos tubos	kW/m^2°C
h_0	Coeficiente médio de transferência de calor por condensação em película na superfície externa do tubo horizontal	kW/m^2°C
H	Altura da chaminé	m
I_g	Entalpia total dos gases	kJ/kg
I_{vg}	Entalpia devido o poder calorífico inferior	kJ/kg
I_{ar}	Entalpia devido o pré-aquecimento do ar	kJ/kg
I_{comb}	Entalpia devido o pré-aquecimento do combustível	kJ/kg
I_v	Entalpia da água no estado de vapor saturado na entrada da turbina	kJ/kg
I_{aa}	Entalpia da água de alimentação	kJ/kg
I_{sai}^f	Entalpia do gás à saída da fornalha	kJ/kg
k_g	Coeficiente de condutibilidade térmica dos produtos de combustão	-
λ	Coeficiente de atrito na parede interior da chaminé	-
L_f	Comprimento padronizado da fornalha	m
L_t	Comprimento dos tubos	m
m_{arroz}	Quantidade de arroz a secar	kg
$m_{ar,(kg/s)}$	Fluxo mássico de ar	kg/s
m_{ar}	Fluxo mássico de ar	$m^3/min \cdot m^3$
$\dot{m}_v$	Taxa de condensação	kg/s
m_{agua}	Vazão mássica da água	kg/s
n_v	Rendimento do gerador	%
N_t	Número de tubos	-
O^t	Quantidades em massa trabalho de oxigénio	%
P_r	Número de Prandtl	-
ρ_{arroz}	Massa específica do arroz	kg/m^3
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	kW/m^2K^4
P_{turb}	Potência da turbina	kW
P_B	Pressão barométrica	Pa

ρ_{ar}	Densidade dos gases de combustão	kg/m^3
$\rho_{gás}$	Densidade do ar	kg/m^3
Q_t^i	Poder calorífico inferior	kJ/kg_{comb}
q_{total}	Perda total	%
q_2	Fracção de perdas de calor com as cinzas	%
q_3	Fracção de perdas com gases efluentes (de escape)	%
q_4	Fracção de perdas por combustão mecânica incompleta	%
q_5	Fracção de perdas por combustão química incompleta	%
q_6	Fracção de perdas para o meio ambiente por convecção e radiação	%
q_7	Fracção de perdas associadas às purgas	%
Q_{disp}	Calor total disponível	kJ/kg
$Q_{fis,comb}$	Calor físico devido o pré-aquecimento do combustível	kJ/kg
$Q_{fis,ar}$	Calor físico devido o pré-aquecimento do ar	kJ/kg
q_v	Calor absorvido pela fornalha	kW
Q_{conv}	Calor transferido por convecção na fornalha	kW
Q_{term}	Calor o calor transferido no termopermutador	kJ/kg°C
Q^{cond}	Calor transferido para a água de condensação	kW
R_e	Número de Reynolds	-
S^t	Quantidades em massa trabalho de enxofre	%
T_g	Temperatura dos gases	°C
T_{ad}	Temperatura adiabática	°C
T_{ch}	Temperatura da chama	°C
T_{pa}	Temperatura da parede da fornalha	°C
T_{vapor}	Temperatura do vapor a entrada da turbina	°C
$T_{água}$	Temperatura da água de alimentação a entrada da caldeira	°C
T_{ent}^{conv}	Temperatura dos gases na entrada dos tubos	°C
T_{sai}^{conv}	Temperatura dos gases a saída da caldeira	°C
$T_{g,ent}^{tem}$	Temperatura de entrada dos gases no termopermutador	°C
$T_{g,sai}^{tem}$	Temperatura de saída dos gases no termopermutador	°C
$T_{ar,ent}^{tem}$	Temperatura de entrada do ar no termopermutador	°C
$T_{ar,ent}^{tem}$	Temperatura de saída do ar no termopermutador	°C

$T_{v,ent}^{cond}$	Temperatura de entrada do vapor no condensador	℃
$T_{v,sai}^{cond}$	Temperatura de entrada do vapor no condensador	℃
$T_{ag,ent}^{tem}$	Temperatura de entrada da água de alimentação no condensador	℃
$T_{ag,ent}^{tem}$	Temperatura de saída da água de alimentação no condensador	℃
t_{gB}^{ch}	Temperatura dos gases na base da chaminé	℃
t_{boca}	Temperatura dos gases na boca da chaminé	℃
t_{base}	Temperatura dos gases na base da chaminé	℃
$t_{média}$	Temperatura média dos gases na chaminé	℃
t_{ar}	Temperatura do ar ambiente	℃
ψ	Factor de eficiência térmica da fornalha	-
U	Coeficiente global de transferência de calor	kW/m^2℃
V_{leito}	Volume do leito	m^3
$\dot{V_g^{ch}}$	Fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé	m^3/s
$V_{g,Norm}$	Volume dos gases de combustão	m^3/kg
W^t	Quantidades em massa trabalho de humidade	%
ϕ	Coeficiente de retenção de calor	-
Δt_{lm}	Temperatura média logarítmica	℃
Δt	Queda média de temperatura	$℃/m$

TABELA DE SIGLAS

DEMA	Departamento de Engenharia Mecânica
FE	Faculdade de Engenharia
FIPAG	Fundo de Investimento e Património do Abastecimento de Água
HICEP	Presidente de Conselho de Administração da Hidráulica de Chókwé, Empresa Pública
IRR	Internal Rate of Return
LE-MEC	Licenciatura em Engenharia Mecânica
NPV	Net Present Value
TEMA	Tubular Exchanger Manufactures Association
TIR	Taxa Interna de Retorno
TL	Trabalho de Licenciatura
TMA	Taxa Mínima de Atractividade
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
VPL	Valor Presente Líquido

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Considerações Preliminares 1
1.2. Estrutura do Trabalho 1
1.3. Objectivos 2
1.3.1. Objectivo geral 2
1.3.2. Objectivos específicos 2
1.4. Justificativa 2
1.5. Metodologia de Pesquisa 3
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 4
2.1. Fundamentos de Processamento do Arroz 4
2.1.1. Pré-limpeza 5
2.1.2. Secagem 5
2.1.2.1. Classificação do processo de secagem 5
2.1.2.2. Secadores dos produtos agrícolas 6
2.1.3. Limpeza 7
2.1.4. Descascamento 7
2.1.5. Separação pela câmara de palha e de marinheiro 7
2.1.6. Brunimento 8
2.1.7. Homogeneização 8
2.1.8. Classificação 8
2.1.9. Embalagem e expedição 8
2.1.10. Subprodutos do arroz 8
2.2. Caldeiras a Vapor 9
2.2.1. Classificação das caldeiras a vapor 9
2.2.1.1. Caldeiras flamotubulares 10
2.2.1.2. Caldeiras aquatubulares 11
2.2.2. Métodos Tratamento de água para caldeiras 12

2.3. Casca de Arroz como Fonte de Energia 13
2.3.1. Cinzas geradas na queima da casca de arroz 14
2.4. Termopermutadores 15
2.4.1. Termopermutadores do tipo casco e tubos 15
2.4.1.1. Casco e cabeçotes 15
2.4.2. Chicanas (*Buffles*) 17
2.4.3. Arranjo de tubos 18
2.4.4. Materiais de construção 19
2.5. Funcionamento da Instalação do Projecto 20
CAPÍTULO 3. CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO 22
3.1. Escolha da Turbina 22
3.2. Dimensionamento da Caldeira 23
3.2.1. Cálculo de Combustão 23
3.2.1.1. O Poder Calorífico Inferior 23
3.2.1.2. Entalpia total dos gases de combustão 24
3.2.1.3. A temperatura dos gases 24
3.2.2. Cálculo da fornalha 24
3.2.2.1. Rendimento do gerador 24
3.2.2.2. Calor trazido para a fornalha por unidade de combustível 25
3.2.2.3. Consumo de combustível 25
3.2.2.4. Área da fornalha 25
3.2.2.5. Calor absorvido pela fornalha 26
3.2.2.6. Calor transferido por radiação na fornalha 26
3.2.2.7. Calor transferido por convecção na fornalha 27
3.2.3. Dimensionamento dos tubos de convecção 27
3.2.3.1. Temperatura média logarítmica 27
3.2.3.2. Coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do tubo 28
3.2.3.3. Coeficiente da troca de calor por radiação 28

3.2.3.4. Coeficiente global da transferência de calor 28
3.2.3.5. Área de transferência de calor 29
3.2.3.6. Número de tubos 29
3.2.3.7. Material de construção 29
3.3. Dimensionamento do Leito do Secador 30
3.3.1. Características geométricas 30
3.4. Dimensionamento do Termopermutador 30
3.4.1. Temperatura média logarítmica 31
3.4.2. Calor transferido 31
3.4.3. Área de transferência de calor 32
3.4.4. Número de tubos 32
3.4.5. Selecção do casco e dos cabeçotes 32
3.5. Dimensionamento do Condensador 33
3.5.1. Temperatura média logarítmica 33
3.5.2. Taxa de condensação do vapor 33
3.5.3. Calor transferido 34
3.5.4. Vazão mássica de água 34
3.5.5. Coeficiente global de transferência de calor 34
3.5.6. Área de transferência de calor 34
3.5.7. Número de tubos 35
3.6. Dimensionamento da Chaminé 35
3.6.1. Fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé 35
3.6.2. Diâmetros da chaminé 35
3.6.3. Velocidades dos gases 36
3.6.4. Temperatura dos gases 36
3.6.5. Altura corrigida da chaminé 37
CAPÍTULO 4. ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÓMICA 38
4.1. Metodologia 38

4.2. Capital Inicial Investido 38
4.3. Custos Operacionais 39
4.3.1. Custos Fixos 39
4.3.2. Custos Variáveis 39
4.3.3. Depreciação 40
4.4. Levantamento da Estimativa da Receita Anual 40
4.5. Análise do Retorno do Investimento 41
CAPÍTULO 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS 43
5.1. Considerações Gerais 43
5.2. Resultados do Dimensionamento da Caldeira 43
5.3. Resultados do Dimensionamento do Leito do Secador 45
5.4. Resultados do Dimensionamento do Termopermutador 47
5.5. Resultados do Dimensionamento do Condensador 48
5.6. Resultados do Dimensionamento da Chaminé 50
5.7. Escolha de Equipamentos para a Instalação 51
5.7.1. Máquina de peneirar arroz (máquina de pré-limpeza) 52
5.7.2. Máquina combinada de processamento de arroz 52
5.7.3. Queimador de pelotas de biomassa 53
5.8. Análise do Consumo de Combustível 53
5.9. Fontes de Energia 54
5.10. Características da instalação 55
5.10.1. Local de implantação da fábrica 55
5.10.2. Armazenagem 55
5.10.3. Abastecimento de água 56
5.11. Características do Edifício 56
5.11.1. Estrutura 56
5.11.2. Cobertura 56
5.11.3. Revestimentos laterais 56

5.11.4. Pavimento 56
5.11.5. Arquitectura 57
5.12. Condições Ambientais 57
5.12.1. Iluminação 57
5.12.2. Ventilação 57
5.12.3. Climatização 58
5.12.4. Acústica 58
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 59
6.1. Conclusões 59
6.2. Recomendações 59
CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fluxo de processamento de arroz. Fonte: Autor. 4
Figura 2.2. Subprodutos do arroz. Fonte: Velasquez et al. (2010) citado por Costa (2018). 9
Figura 2.3. Caldeira flamotubular vertical. Fonte: Strobel (2015) 10
Figura 2.4. Caldeira de tubo horizontal. Fonte: Nhambiu (2024). 11
Figura 2.5. Caldeira Aquatubular. Fonte: Autor. 12
Figura 2.6. Fluxo orientado pelos *buffles*. Fonte: Autor. 18
Figura 2.7. Arranjos dos tubos. Fonte: Autor. 18
Figura 2.8. Esquema de funcionamento da instalação. Fonte: Autor. 20
Figura 5.1. Ilustração da caldeira. Dimensões dadas em milímetros. Fonte: Autor. 45
Figura 5.2. Ilustração do secador. Dimensões em (mm). Fonte: Autor. 46
Figura 5.3.Ilustração do termopermutador. Fonte: Autor. 48
Figura 5.4. Ilustração do termopermutador dimensionado. Fonte: Autor. 49
Figura 5.5. Ilustração da chaminé. Dimensões em (mm). Fonte: Autor. 51
Figura 7.1. Bomba de água periférica. Fonte: centraleletrica.com.br 26

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Composição elementar da casca de arroz. Fonte: Adaptado de Schneider (2017). 14
Tabela 3.1. Estimativa da potência da turbina. 22
Tabela 4.1. Custo anual da matéria-prima. 39
Tabela 4.2. Estimativa de venda anual. 40
Tabela 4.3. Valores representativos dos indicadores financeiros. 41
Tabela 5.1. Resultados do cálculo térmico da fornalha. 43
Tabela 5.2. Resultados do cálculo de transferência de calor no banco de tubos. 44
Tabela 5.3. Resultados do dimensionamento do leito do secador. 45
Tabela 5.4. Resultados do dimensionamento do termopermutador. 47
Tabela 5.5. Resultados do dimensionamento do condensador. 48
Tabela 5.6. Resultados fundamentais do dimensionamento da chaminé. 50
Tabela 5.7. Descrição técnica da máquina de pré-limpeza. 52
Tabela 5.8. Máquina combinada de processamento de arroz. 52
Tabela 5.9. Características técnicas do queimador 53
Tabela 5.10. Tempo médio de processamento. 54
Tabela 5.11. Iluminação recomendada para diferentes ambientes de trabalho da fábrica. 57

Tabela 7.1. Especificação técnica do ventilador. 25

LISTA DE FIGURA DOS ANEXOS

Figura A 1. Turbina a vapor. Fonte: DTEC (2024). A1
Figura A 2. Tipos de casco e cabeçotes. Fonte: Filho (2023). A5
Figura A 3. Altura da Chaminé A6
Figura A 4. Máquina de limpeza de grãos de arroz. Fonte: alibaba.com. A23
Figura A 5. Máquina combinada de processamento de arroz. Fonte: burtmachinery.com A24
Figura A 6. Ventilador centrífugo. Fonte: Alibaba.com A25
Figura A 7. Queimador de pelotas de biogás. Fonte: Alibaba.com. A27
Figura A 8. Transportador de carga de Parafuso Sem Fim. Fonte: demakine.com.br. A28

LISTA DE TABELA DOS ANEXOS

Tabela A 1. Parâmetros técnicos da turbina. A1
Tabela A 2. Espessura da camada de radiação efectiva para geometrias standard. A2
Tabela A 3. Dimensões usuais de caldeiras flamotubulares (Ata Combustão Técnica S.A.). A2
Tabela A 4. Características termofísicas dos produtos de combustão e do ar. A3
Tabela A 5. Diâmetros padronizados dos tubos para trocadores de calor. Fonte: TEMA (2019). A4
Tabela A 6. Investimento em maquinaria. A7
Tabela A 7. Depreciação das máquinas. A8
Tabela A 8. Levantamento total do capital investido A9
Tabela A 9. Custos Operacionais. A9
Tabela A 10. Fluxos de caixa. A11
Tabela A 11. Resultados do cálculo estequiométrico. A12
Tabela A 12. Resultados do cálculo da caldeira. A14
Tabela A 13. Resultados do cálculo dos tubos de convecção. A16
Tabela A 14. Resultados do cálculo do leito secador. A18
Tabela A 15. Resultados do cálculo do termopermutador. A19
Tabela A 16. Resultados do cálculo do condensador. A20
Tabela A 17. Resultados do cálculo da chaminé. A22
Tabela A 18. Parâmetros técnicos da máquina de pré-limpeza de arroz. A23
Tabela A 19. Dados técnicos da máquina combinada de processamento de arroz. A24
Tabela A 20. Descrição técnica da bomba periférica. Fonte: centraleletrica.com.br A26

Tabela A 21. Parâmetros técnicos do queimador de pelotas de biomassa. A27
Tabela A 22. Parâmetros técnicos do transportador para carga. Adaptado: Demakine (2024) .. A28

ANEXOS DOS DESENHOS

Item	Simbologia	Folha	Designação
Anexos 14	A14	A3 & A4	Caldeira Flamotubular
Anexos 15	A15	A3 & A4	Esquema do Secador
Anexos 16	A16	A3 & A4	Termopermutador
Anexos 17	A17	A3 & A4	Condensador
Anexos 18	A18	A3	Chaminé
Anexos 19	A19	A3	Planta Baixa da Instalação

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Preliminares

O processamento de arroz é uma actividade crucial na cadeia de produção do mesmo, onde o arroz bruto é transformado em arroz pronto para o consumo. Este processo envolve várias etapas, dentre as quais se destacam, limpeza, secagem, descasque e classificação dos grãos de arroz.

Para que o processamento de arroz ocorra, é necessária energia para alimentar uma variedade de equipamentos e processos. Desde a secagem até o polimento e embalagem são usadas várias formas de energia para a alimentação dos mesmos equipamentos.

Em áreas rurais ou regiões onde a electricidade é limitada, a biomassa, como cascas de arroz, pode ser utilizada como fonte de energia para alimentar as caldeiras. A queima desta, também é tida como uma opção sustentável em termos ambientais.

O presente projecto surge na perspectiva do uso da biomassa (casca de arroz) nas indústrias de processamento de arroz, buscando-se uma boa alternativa económica em comparação com o uso da electricidade da rede nacional ou combustíveis fósseis, e contribuindo neste caso, na gestão de resíduos sólidos agrícolas.

1.2. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está subdividido em sete (7) capítulos, no qual:

- O primeiro capítulo refere-se às motivações do tema, aos objectivos do mesmo, à justificativa e à metodologia de pesquisa;
- O segundo capítulo é referente a fundamentação teórica, onde são abordados assuntos relacionados a tecnologia nos sistemas de processamento de arroz, noções gerais sobre caldeiras a vapor e uma descrição sumarizada sobre a casca de arroz como combustível;
- O terceiro capítulo refere-se ao dimensionamento da instalação, que consiste no dimensionamento da caldeira de fornalha interna, do termopermutador do tipo banco de tubos, da chaminé, do secador de arroz e por fim, do condensador do tipo casco tubo.
- O quarto capítulo é referente a avaliação da viabilidade económica do projecto;
- O quinto capítulo consiste na apresentação e análise dos resultados;

- O sexto e o sétimo capítulo são referentes as conclusões e recomendações, e por fim as referências bibliográficas.

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo geral

- Projectar uma instalação de processamento de arroz usando biomassa como fonte de energia.

1.3.2. Objectivos específicos

- Estudar a tecnologia envolvida no processamento do arroz;
- Dimensionar a caldeira que usa a casca de arroz como combustível;
- Dimensionar um sistema de secagem (termopermutador, chaminé e leito secador); e
- Avaliar a viabilidade económica do projecto.

1.4. Justificativa

Em Moçambique, o arroz ocupa o terceiro lugar nos cereais em cultivo e a produção local ainda não satisfaz as necessidades do consumo interno, devido em parte a aplicação limitada de técnicas adequadas de produção (CHIRINDZANE, 2022).

Segundo Xerinda (2012)[1], citado pelo jornal Verdade, uma das alternativas para o aumento da produção em Moçambique, é a disposição de instalações de processamento, as quais, permitem com que os pequenos produtores possam processar a nível local, evitando grandes deslocações para realizar a comercialização.

A energia desempenha um papel crucial nas instalações de processamento do arroz, influenciando todas as etapas da produção, desde o cultivo até a embalagem do produto final.

Analisando a actual situação mundial, cresce cada vez mais a percepção da necessidade de se diminuir a dependência da energia fóssil e se utilizar fontes de energia menos impactantes, promovendo a melhora na qualidade de vida das pessoas em determinadas regiões onde a geração de energia interfere no ecossistema (Nunes, 2017).

[1] Soares Xerinda, Presidente de Conselho de Administração da Hidráulica de Chókwé, EP (HICEP), falava durante a entrega de uma pequena fábrica de processamento de arroz no distrito de Chókwé.

Segundo Nunes (2017), a prática de geração de energia através da queima da casca de arroz pode ser muito vantajosa para as empresas de processamento do mesmo, pois é um subproduto gerado em grandes quantidades, e a queima diminui o despejo da mesma em locais impróprios.

Segundo Hoffmann et al. (2014), a geração de energia através da queima da casca de arroz é uma alternativa praticável, viável e ética do ponto de vista tecnológico, económico e ecológico, já que a matéria-prima é abundante na região, e todo CO_2 produzido na queima volta para o ciclo de carbono da biosfera terrestre.

São por estes motivos que se propõe a projecção de instalações de processamento de arroz usando a casca de arroz como fonte de energia. Procurando-se deste modo, instalações mais económicas e menos poluentes, o que poderá proporcionar:

- O aumento da produção agrícola, através do incentivo aos agricultores para aumentarem a produção de arroz, pois tem-se um mercado garantido para seus produtos;
- A redução de dependência de importações do arroz; e
- O apoio à segurança alimentar, devido ao abastecimento estável de arroz de qualidade para o mercado interno.

1.5. Metodologia de Pesquisa

Para realização deste projecto recorreu-se a revisão bibliográfica, que permitiu a aquisição de informações teóricas e práticas inerentes ao estudo do processamento de arroz e dimensionamento de componentes que se integram na instalação.

CAPÍTULO 2
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Fundamentos de Processamento do Arroz

Nas operações de pós-colheita do arroz, assim como de todos os grãos no geral, um dos principais desafios é a manutenção da qualidade do produto de modo a que chegue ao consumidor final em condições óptimas.

O processamento de arroz compreende um conjunto de operações realizadas após a colheita do mesmo, de modo a transformá-lo de grão bruto em um produto pronto para o consumo, e estão envolvidas sequencialmente nesse processo as seguintes etapas: Pré-limpeza, secagem, limpeza, descasque, separação (pela câmara de palha e de marinheiro), brunimento, homogeneização, classificação, embalagem e expedição.

O diagrama representado pela figura abaixo representa o fluxograma que compõe as etapas de processamento de arroz.

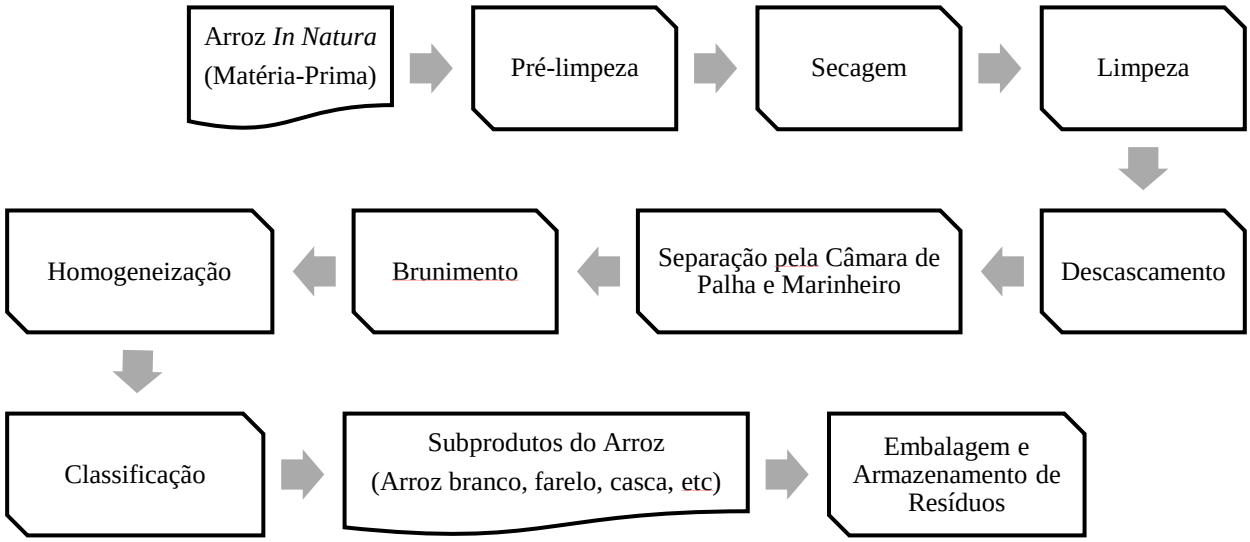


Figura 2.1. Fluxo de processamento de arroz. Fonte: Autor.

Pela figura acima constata-se que o processamento do arroz, tem início logo após o armazenamento da matéria-prima (arroz *in natura*), isto é, com o processo de pré-limpeza. Seguem-se as etapas subsequentes até a classificação, na qual o arroz branco se separa dos demais subprodutos.

Dependendo do tipo de tratamento após a classificação, o arroz branco é embalado e armazenado em paletes ou armazenado nos silos. Os demais subprodutos como as cascas, por exemplo, podem ser usados como combustível, como é o caso deste projecto, ou mesmo, descartados fora das instalações de processamento para outros fins.

2.1.1. Pré-limpeza

A pré-limpeza antecede o processo de secagem. É a fase em que são retiradas dos grãos as impurezas que podem retardar o processo de secagem, acelerar o surgimento e desenvolvimento de microorganismos e facilitar a proliferação de insectos (Eifert, 2009).

2.1.2. Secagem

Em termos gerais, a secagem do produto é entendida como um processo que tem como finalidade reduzir o teor de humidade contida no produto até a faixa considerada ideal para o armazenamento, ou mesmo, uma faixa de humidade que permita com que os processos subsequentes sejam realizados.

Segundo Dos Santos (2020), o ideal é que a colheita seja realizada no intervalo de **18%** a **23%** de humidade.

Dos Santos (2020) ainda avança que, no caso de os grãos serem colhidos acima da faixa ideal de humidade, ocorrerá maior presença de grãos imaturos e malformados na colheita, aumentando assim, o índice de quebra durante o processamento do arroz. No caso de o arroz ser colhido com humidade abaixo da faixa ideal, especialmente se for menor de 15%, ocorrerá maior incidência de perdas pelo desprendimento natural dos grãos e dano mecânico na colheita, o que diminuirá sua qualidade.

Para que os grãos estejam adequados para o armazenamento, segundo Dos Santos (2020), devem ter a sua humidade reduzida para a faixa de **12% a 13%**, o que é fundamental para a preservação da sua qualidade e para evitar o crescimento de fungos.

2.1.2.1. Classificação do processo de secagem

O processo secagem pode ser classificado em dois tipos: secagem artificial e secagem natural.

A secagem natural, que geralmente acontece no próprio campo, consiste na redução da humidade usando a radiação solar e a temperatura do meio ambiente. Enquanto a secagem artificial consiste

no emprego de artifícios ou técnicas para uma secagem rápida e uniforme com a utilização de silos secadores.

Por sua vez, a secagem artificial subdivide-se em: **secagem a baixa temperatura e a alta temperatura.**

Segundo Da Silva (2005), na secagem a baixa temperatura**,** o ar de secagem é aquecido no máximo 10 ^{o}C acima da temperatura ambiente, diferentemente da secagem a altas temperaturas, onde o ar é aquecido a mais de 10 ^{o}C da temperatura ambiente.

2.1.2.2. Secadores dos produtos agrícolas

Secadores são estruturas projectadas com finalidade de secar grãos, e podem classificar-se em secadores de baixas temperaturas e altas temperaturas.

Quanto às características de operação, segundo Da Silva (2005), os secadores de baixas temperaturas estruturalmente configuram-se como silos secadores, com fluxo de ar na faixa de 1,0 e 10 m^3/min por tonelada de produto e tempos longos de secagem que podem durar de 15 a 30 dias.

Para este projecto, os secadores de interesse são os de altas temperaturas, nos quais classificam-se:

1. Quanto ao fluxo dos gases envolvidos e a massa de grãos:

a) Secadores de fluxos concorrentes: os fluxos de ar de secagem e grãos têm o mesmo sentido de deslocamento.

b) Secadores de fluxos contracorrentes: Nestes secadores os fluxos de grãos e ar de secagem ocorrem em sentidos contrários. Sendo que o fluxo de grãos ocorre no sentido da gravidade e o fluxo de ar em sentido ascendente.

c) Secadores de fluxos cruzados: Conforme a denominação, os fluxos de grãos e ar de secagem cruzam sob um ângulo de 90^{o} na câmara de secagem.

d) Secadores de leito fixo: A camada de grãos nestes secadores permanece estática durante a secagem. Pelo facto do produto permanecer estático, é recomendado o revolvimento para que a secagem seja uniforme. Alguns fabricantes comercializam estes secadores com sistemas mecânicos para o revolvimento. Assim é dispensada a interrupção do processo de secagem.

2. Quanto ao funcionamento:

a) Secadores contínuos: O processo é constante e interrupto, o que significa que os grãos são alimentados e secos em um fluxo contínuo. São ideais para operações em grandes escalas.
b) Secadores intermitentes: Ao contrário dos secadores contínuos, os grãos são secos em lotes. Os grãos passam pelo processo várias vezes até atingirem o nível desejado de humidade.

2.1.3. Limpeza

Depois do arroz ter passado pelo processo pré-limpeza e secagem, segue-se a limpeza, no qual é responsável por eliminar as impurezas que ainda estejam contidos no arroz, como pedras, caules de plantas, palhas de arroz, entre outras.

2.1.4. Descascamento

Nesta etapa de processamento, o arroz é descascado por dois roletes de borracha que funcionam em direcções opostas e com velocidades diferentes, retirando o grão de arroz do interior da casca. O arroz, ao passar através de um pequeno espaço existente entre os roletes, sofre um movimento de torção que possibilita a separação da casca do grão (Eifert, 2009).

2.1.5. Separação pela câmara de palha e de marinheiro

A separação pela câmara de palha e de marinheiro[2] são técnicas utilizadas na indústria do arroz para separar os grãos de arroz dos resíduos, como palha, cascas e impurezas gerados durante o descascamento.

Segundo Eifert (2009), a separação pela câmara de palha, utiliza-se uma máquina (câmara de palha) que, por meio de sistema pneumático, separa o arroz inteiro do arroz mal granado ou verde, da casca e dos seus derivados. Na separação de marinheiro, utiliza-se uma máquina para separar o arroz descascado do arroz que deixou de ser descascado pela câmara de palha.

A utilização dessas máquinas visa aumentar o rendimento dos equipamentos subsequentes e melhorar a qualidade do produto final.

[2] Marinheiro é um termo brasileiro referente ao arroz não descascado que passou pela etapa de descasque.

2.1.6. Brunimento

Nesta etapa, são usadas máquinas (brunidores) compostas por pedras abrasivas, que lixam o arroz já descascado, tornando-o mais branco.

2.1.7. Homogeneização

Complementado o processo de brunimento do arroz, faz-se a homogeneização, momento em que uma máquina retira o farelo de arroz que ainda permanece aderido ao grão. A máquina que realiza esta operação utiliza a pulverização de água e ar (Eifert, 2009).

2.1.8. Classificação

Nessa etapa, Segundo Eifert et al. (2021), o arroz passa por máquinas que separam os grãos inteiros dos quebrados de diferentes tamanhos (¾ e ½ de grãos) e dos demais subprodutos que são utilizados pela indústria cervejeira e de ração animal.

Outros equipamentos podem ser usados na indústria com o objectivo de obter um produto final de melhor qualidade, dependendo do grau de investimento da indústria.

2.1.9. Embalagem e expedição

Os grãos de arroz são embalados em sacos ou outros recipientes adequados para o transporte, armazenamento ou venda.

2.1.10. Subprodutos do arroz

A figura abaixo representa o rendimento médio de uma agro-indústria de processamento de arroz para cada 100 kg de arroz *in natura*[3], segundo Velasquez et al. (2010) citado por Costa (2018).

Como se pode observar no esquema da figura acima, por cada 100 kg de arroz, tem-se pelo menos 22 kg de biomassa, 64 kg de arroz inteiro e 6 kg de arroz partido (quirera).

[3] Arroz em casca que ainda não passou por nenhuma etapa de processamento

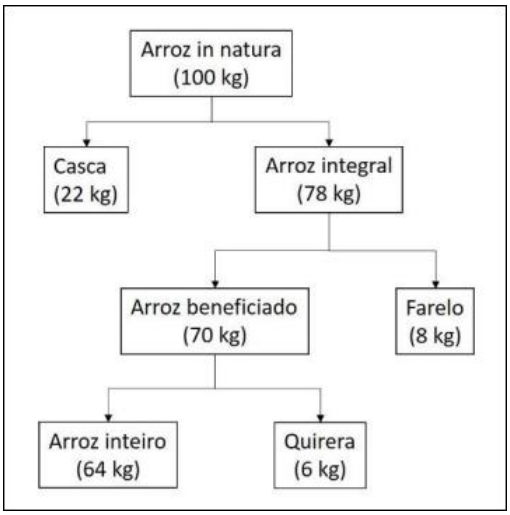


Figura 2.2. Subprodutos do arroz. Fonte: Velasquez et al. (2010) citado por Costa (2018).

2.2. Caldeiras a Vapor

Segundo Strobel (2015), as caldeiras a vapor são equipamentos projectados com a finalidade de produzir e acumular vapor sob pressão superior a atmosférica, através da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer.

2.2.1. Classificação das caldeiras a vapor

Existem diversas formas para se classificar as caldeiras. Mas, segundo Martinelli (2003), as caldeiras são classificadas da seguinte maneira:

1. Quanto à posição dos gases quentes e da água: Aquatubulares e flamotubulares;

2. Quanto à posição dos tubos: Verticais, horizontais e inclinados;

3. Quanto à forma dos tubos: Rectos e curvos; e

4. Quanto à natureza da aplicação: Fixas, portáteis, locomóveis (geração de força e energia) e marítima.

2.2.1.1. Caldeiras flamotubulares

Nessas caldeiras, os produtos de combustão circulam pelo interior dos tubos, que ficam imersos na água a ser vaporizada.

As caldeiras flamotubulares apresentam características como o baixo rendimento térmico, maior espaço ocupado, ideal para pequenas instalações, simples construção, baixo custo e dificuldades para instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor.

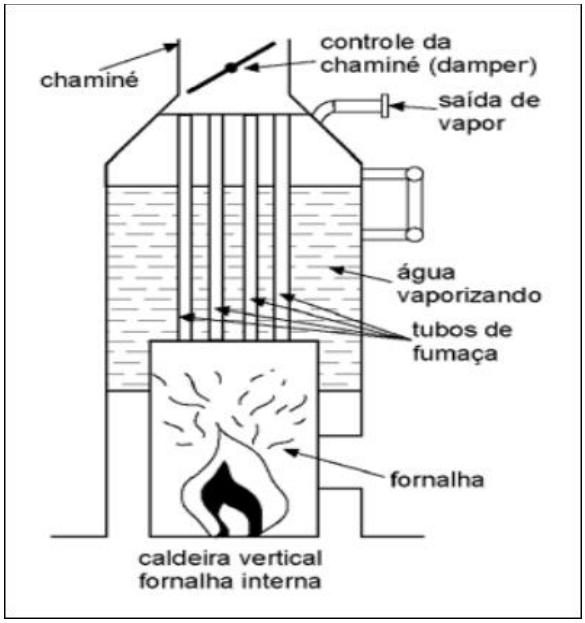


Figura 2.3. Caldeira flamotubular vertical. Fonte: Strobel (2015)

As caldeiras flamotubulares também podem ser classificadas quanto à distribuição dos tubos, que podem ser verticais ou horizontais.

Nas caldeiras flamotubulares verticais, os tubos são colocados verticalmente num corpo cilíndrico fechado nas extremidades por placas, chamadas espelhos. A fornalha interna fica no corpo cilíndrico logo abaixo do espelho inferior. Os gases de combustão sobem através dos tubos, aquecendo e vaporizando a água que está em volta deles.

Nas caldeiras flamotubulares horizontais (Figura 2.4) diferentemente das verticais, as tubulações que transportam os gases de combustão, estão dispostas horizontalmente. Podem ter de 1 a 4 tubulões por fornalha.

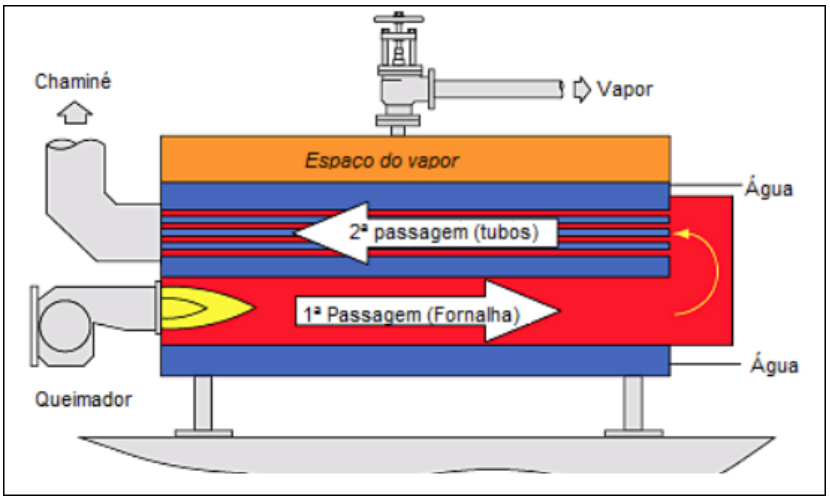


Figura 2.4. Caldeira de tubo horizontal. Fonte: Nhambiu (2024).

As caldeiras de tubos horizontais abrangem vários tipos, nos quais destacam-se: Cornuália, lancaster, multitubular, locomóvel e escocesa.

2.2.1.2. Caldeiras aquatubulares

Nestes tipos de caldeiras, os gases quentes circulam pela parte externa dos tubos e a água se encontra na parte interna dos mesmos, dispostos na forma de paredes de água ou de feixes tubulares.

As caldeiras aquatubulares apresentam as seguintes características:

- Difíceis de serem construídas e necessitam de maior controle na operação;
- Maior rendimento;
- Maior produção de vapor, chegando a 750 t/h;
- Maior superfície de aquecimento e;
- Alta pressão de operação, normalmente entre 90 kgf/cm² e 100 kgf/cm².

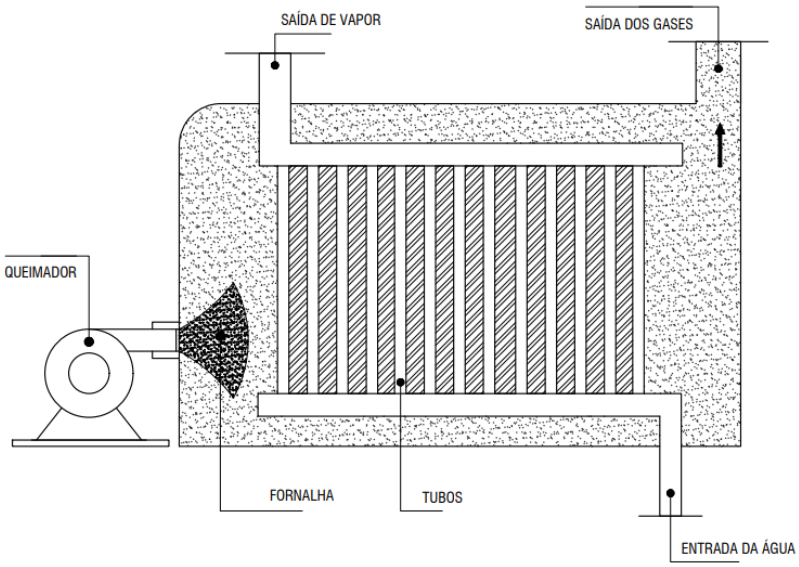


Figura 2.5. Caldeira Aquatubular. Fonte: Autor.

.

Existem diferentes tipos de caldeiras aquatubulares, a saber:

- Caldeiras de tubos rectos;
- Caldeiras de tubos curvos; e
- Caldeiras de circulação forçada ou positiva.

2.2.2. Métodos Tratamento de água para caldeiras

A água para caldeiras deve receber tratamento que permita: remoção total ou parcial de sais de cálcio e magnésio, os quais produzem incrustações e levam à ruptura dos tubos (Nhambiu, 2024).

A dureza total e o potencial de hidrogénio (PH) são as principais grandezas de controle da qualidade da água.

Existem vários métodos de tratamento de água para caldeiras, mas destacam-se os métodos:

- Clarificação;
- Abrandamento;
- Desgaseificação;
- Desmineralização ou troca iónica; e
- Remoção de sílica.

O processo de clarificação consiste na previa floculação, decantação e filtração da água com vista a reduzir a presença de sólidos em suspensão.

O processo, designado por abrandamento da água pela cal soldada, consiste na injecção de soluções de CaO (cal) e $NaCO_3$ (carbonato de sódio ou soda) para precipitar o carbonato de cálcio e formar hidróxido de magnésio floculado, de modo a serem removidos antes de a água ser bombeada para a caldeira.

No processo de desgaseificação são empregados equipamentos especiais que aquecem a água e desta forma, são eliminados os gases dissolvidos.

Desmineralização ou troca iónica Sais dissolvidos na água são dissociados, ou seja, eles são separados em catiões e aniões carregados positivamente e negativamente respectivamente. Por exemplo, quando dissolvido em água, hidrocarbonato de cálcio ($Ca(HCO_3)_2$) é dissociada no catião cálcio (Ca_2^+) e o carbonato de hidrogénio de aniões (HCO_3).

As caldeiras de alta pressão requerem a remoção de ácido silícico. A sílica produz uma incrustação muito dura e muito perigosa. Os tratamentos normalmente empregues no interior da caldeira não eliminam a sílica. Os métodos mais usados para essa finalidade são a troca e tratamento com óxido de magnésio calcinado.

Os outros métodos de tratamento são: eliminação da dureza, precipitação com fosfatos, tratamento com quelatos, controle do pH e da alcalinidade, eliminação do oxigénio dissolvido e o método de controle do teor de cloretos e sólidos totais.

Para o projecto, aplica-se o método de abrandamento da água. Este método tem como propósito evitar as incrustações, o que previne a formação de depósitos nos tubos, proporcionando dessa forma, menos desgaste nos componentes.

2.3. Casca de Arroz como Fonte de Energia

A casca de arroz é um subproduto proveniente da etapa de beneficiamento do arroz, que corresponde a 22 % do peso dos grãos[4].

Segundo Mane e Deo (2007) e Della (2001) citado por Schneider (2017), a casca de arroz possui uma baixa densidade e peso específico, alto teor de silício, lenta biodegradação, difícil decomposição por bactérias, elevada dureza e fibrosidade. Características estas, que levam a obtenção de produtos de boa resistência ao desgaste e de baixa propriedade nutritiva, não indicando

[4] Velasquez et al. (2010) citado por Costa (2018).

assim, a sua aplicação em rações animais. Com isso, é reaproveitada na própria indústria de processamento de arroz, como biomassa para geração de calor a partir da combustão directa.

Apresentam-se na Tabela 2.1, os principais constituintes elementares da casca de arroz em massa seca, segundo Soltani et al. citado por Schneider (2017).

Tabela 2.1. Composição elementar da casca de arroz. Fonte: Adaptado de Schneider (2017).

Elemento	C	H	O	N	Si
Composição (%)	37.05	8.80	35.03	11.06	9.01

De acordo com Chakraborty et al. (2011) citado por Schneider (2017), a composição da casca de arroz corresponde, aproximadamente, a 32 % de celulose, principal constituinte do material, 21 % de hemicelulose, 21 % de lignina, 20 % de sílica e 3 % de proteínas, sendo que há variação destes percentuais conforme a safra, condições climáticas, diversificação de solo e localização.

2.3.1. Cinzas geradas na queima da casca de arroz

As cinzas, são resíduos sólidos resultantes da combustão, que geralmente são descartados na saída da chaminé.

O processo de utilização da casca do arroz para geração de energia resulta em cinzas, que segundo Hoffmann et al. (2014), o destino é variável, algumas empresas descartam no solo, outras vendem como isolante, na indústria do cimento, como substituto da areia, devido o seu alto valor de sílica.

Segundo Ludwig, Araujo e Putti (2012) citado por Nunes (2017), as cinzas representam aproximadamente 16% do peso da casca, com formas variadas que dependem tanto do equipamento utilizado para a queima, assim como do tempo e temperatura da queima. A casca de arroz queimada em condições controladas (temperatura máxima de 1000°C), ao atingir 800°C, gera cinza residual constituída de sílica em forma cristalina de quartzo. Para temperaturas no intervalo de 450 a 700°C, gera sílica no estado amorfo.

2.4. Termopermutadores

Termopermutadores são equipamentos em que dois fluidos com temperaturas diferentes trocam calor entre si, através de uma interface metálica.

Quanto a finalidade, podem ser:

- Termopermutadores para aquecimento (aquecedor ou preaquecedor, refervedor, gerador de vapor); e
- Termopermutadores para resfriamento (resfriador, condensador).

Quanto a construção podem ser:

- Casco e tubos;
- Trocadores tipo tubo duplo ou bitubulares;
- Resfriadores a ar;
- Trocadores de placas; e
- Permutadores espirais.

Os termopermutadores do tipo casco e tubos são os mais usados nas indústrias, e neste projecto serão tratados com mais detalhes. Entretanto, os outros tipos são convenientemente usados em aplicações específicas.

2.4.1. Termopermutadores do tipo casco e tubos

Os termopermutadores do tipo casco e tubos, consistem em um casco cilíndrico constituído no seu interior por um conjunto de tubos. Sendo que a troca de calor acontece entre o fluido contido nos tubos e o fluido da parte externa dos mesmos (do lado do casco).

2.4.1.1. Casco e cabeçotes

A norma TEMA (*Tubular Exchanger Manufactures Association*) é uma das principais referências para construção de trocadores de calor no mundo. Aplicada a trocadores do tipo casco-e-tubos não expostos à chama, ela especifica o tamanho e a espessura dos componentes, tolerâncias de fabricação, folgas, arranjos geométricos, práticas de manutenção, instalação e outras directrizes essenciais para projectos de trocadores de calor (Filho, 2023).

Os tipos de cascos, assim como os cabeçotes estão apresentadas nos Anexos 3, que que segundo Filho (2023):

- O casco do tipo E é largamente o mais utilizado na indústria. Ele é adequado para processos sem mudança de fase. Além disso, é mais barato e de fácil fabricação;
- O tipo F é um casco de dois passes, que é consequência da chicana longitudinal localizado no centro de feixe de tubo. É utilizado em recuperadores de calor, onde a aplicação exige maior comprimento térmico para uma transferência de calor geral eficaz;
- Os tipos G e H também possuem chicanas longitudinais, mas nenhuma das extremidades dessas chicanas coincidem com as extremidades do casco. Isso torna o fluxo partido e mais bem distribuído. São geralmente usados em caso de mudança de fase como em refervedores e condensadores;
- O tipo J configura um fluxo dividido e tem perda de carga mais baixa, já que o fluido percorre uma distância menor no casco quando comparado aos tipos E e F. É frequentemente usado em condensadores com dois bocais de entrada para o gás e um bocal de saída para o condensado;
- O tipo K é usado especificamente em casos de geração de vapor seco no lado do casco, por isso possui uma variação no diâmetro e consequente aumento de volume que é ocupado pela fase vapor;
- O tipo X promove um fluxo cruzado ortogonal entre os fluidos do casco e dos tubos. Esse modelo tem a menor perda de carga em relação ao demais, excepto o tipo K, e é usado em aplicações de baixas pressões como condensadores à vácuo e para aquecimento ou resfriamento de gases.

Os cabeçotes tipo A, C e N possuem um tampo plano com flange para fixação no carretel. Isso facilita a limpeza e inspecção internas dos tubos e do feixe, pois não é necessário remover todo o cabeçote. Nos tipos C e N o espelho é soldado ao cabeçote, o que se torna vantajoso quando é muito necessário evitar vazamento entre os fluidos do casco e dos tubos. A diferença entre os dois é que o tipo N não permite a remoção do feixe de tubos, uma vez que o casco é soldado ao cabeçote e geralmente é empregado quando se opera com fluidos tóxicos. Em caso de reparo das juntas entre os tubos e o espelho, o cabeçote A é mais vantajoso em relação ao tipo C por causa da facilidade de acesso (Filho, 2023).

Diferentemente dos tipos A, C e N, os cabeçotes dianteiros B e D não possuem tampos removíveis, e neste caso, o seu uso recomenda-se nos casos em que o fluido no interior dos tubos é limpo. Já que no caso de limpeza dos tubos, seria necessário desmontar o cabeçote inteiro.

Os cabeçotes usados em trocadores de espelho fixo são os dos tipos L, M e N que correspondem aos cabeçotes dianteiros A, B e N, respectivamente. São baratos e de fácil construção. Porém esses modelos não permitem a remoção do feixe de tubos para limpeza mecânica no lado do casco (Filho, 2023).

O cabeçote do tipo S faz uso de um anel bipartido aparafusado ao tampo interno do cabeçote. Para sacar o feixe de tubos durante manutenção é necessário remover antes o tampo do casco, o tampo interno e anel bipartido. O cabeçote do tipo T permite que o feixe de tubos seja mais facilmente removido, sem precisar de remoção do casco ou do tampo do próprio cabeçote traseiro.

Os cabeçotes traseiros S, T e W são de espelhos flutuantes. Segundo Filho (2023), para se retirar o feixe de tubos durante manutenção é necessário remover antes o tampo do casco, o tampo interno e anel bipartido, no caso de cabeçote S. O cabeçote do tipo T permite que o feixe de tubos seja mais facilmente removido, sem precisar de remoção do casco ou do tampo do próprio cabeçote traseiro. O tipo W possui um anel de selagem ao redor do espelho que evita o vazamento entre os flanges do lado do casco e dos tubos. O cabeçote do tipo P tem uma caixa de gaxetas que faz a selagem do fluido do casco evitando seu vazamento para fora do trocador.

Trocadores com feixe em U permitem a expansão e contracção dos tubos em relação ao casco, o que resolve o problema das tensões térmicas. Entretanto deve ser evitado quando há necessidade de limpeza mecânica no lado interno dos tubos, os trechos curvos dificultam esse tipo de procedimento (Filho, 2023).

2.4.2. Chicanas (*Buffles*)

Segundo a Heaslip (2007), os *buffles* possuem duas funções principais. A primeira é apoiar os tubos na posição adequada durante a montagem e operação do trocador de calor. Esse suporte é necessário para evitar vibrações induzidas pelo fluxo nos tubos, que podem rapidamente levar à falha dos tubos.

A segunda função é guiar o fluxo do lado do casco de um lado para o outro através dos tubos, aumentando a velocidade e, portanto, o coeficiente de transferência de calor.

Mostra-se na figura abaixo, um fluxo orientado de um fluido num termopermutador constituído por quatro chicanas verticais.

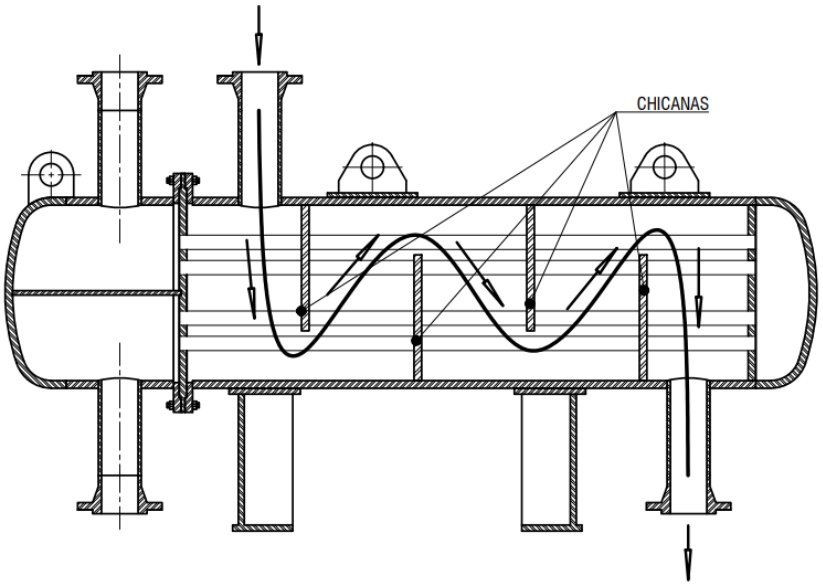


Figura 2.6. Fluxo orientado pelos *buffles*. Fonte: Autor.

2.4.3. Arranjo de tubos

O arranjo dos tubos diz respeito ao padrão enfileiramento destes no feixe e como o escoamento no casco incide sobre eles (Filho, 2023). Mostram-se abaixo os tipos de arranjos dos tubos, segundo a TEMA (2019).

Segundo TEMA (2007) citado por Filho (2023), quando é necessário realizar limpeza mecânica na parte externa dos tubos, recomenda-se o uso de padrão quadrangular 45° ou 90°, associado a uma folga adequada entre tubos. Portanto, para este projecto será usado o arranjo de 45°, por apresentar maior desempenho transferência de calor em relação ao de 90°, que apresenta menor perda de carga e baixa efectividade, segundo Filho (2023).

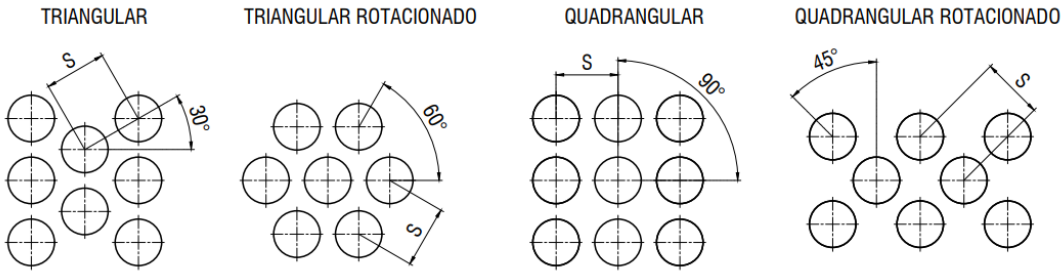


Figura 2.7. Arranjos dos tubos. Fonte: Autor.

Segundo TEMA (2019), os tubos devem ser espaçados (S) com uma distância mínima de centro a centro de 1,25 vezes o diâmetro externo do tubo. Mas quando a limpeza mecânica é prevista, deve haver um espaçamento (S) mínimo de 1/4'' (6.4 mm) entre os diâmetros externos dos tubos.

Para o projecto, é prevista a realização de limpeza mecânica na parte externa dos tubos, não só no termopermutador, mas também, em qualquer outo componente que envolve feixe de tubo.

2.4.4. Materiais de construção

A selecção de materiais para trocadores de calor deve envolver um equilíbrio entre propriedades do material, como resistência à corrosão, temperatura máxima de operação, condutividade térmica, resistência à tracção, disponibilidade e o custo. A escolha de um material não adequado pode levar longos tempos de produção e custos mais altos de operação (Axsom, 2023).

Os materiais mais comuns utilizados na construção de termopermutadores segundo Axsom (2023) e Wang (2021) incluem, aço carbono, aço inoxidável, cobre, alumínio, titânio e outras ligas especiais.

Segundo Shah (2003, pp.678) citado por Saari (2010), o alumínio é um material comum em trocadores de calor compactos, mas não pode ser usado ou em aplicações com temperaturas extremas (a temperatura máxima é de aproximadamente 200 ºC), e nos casos em que o fluido é altamente corrosivo. O alumínio é, no entanto, útil até temperaturas muito baixas (criogénicas).

Na mesma linhagem, o autor avança que, o aço carbono comum pode ser utilizado dentro de uma faixa de temperatura de 0 a 500 °C com fluidos não corrosivos ou levemente corrosivos. O revestimento refractário em superfícies permite temperaturas superiores a 500 °C, visando protegê-las do calor extremo e de possíveis danos térmicos.

As temperaturas de até aproximadamente 650 °C são alcançáveis com construções de trocadores de calor de placas de aço inoxidável soldadas, mais comummente do tipo aço inoxidável 347. As superligas, como o Inconel, podem aumentar ainda mais a faixa de temperatura alcançável até 750 á 800 °C, mas somente a um custo consideravelmente mais elevado, segundo Aquaro e Pieve (2007) e McDonald (2003) citado por Saari (2010).

2.5. Funcionamento da Instalação do Projecto

A figura abaixo representa o esquema de funcionamento geral da instalação. Nele são representados os equipamentos ligados a geração de energia, e os principais dispostitos de carga que fazem parte da instalação de processamento de arroz.

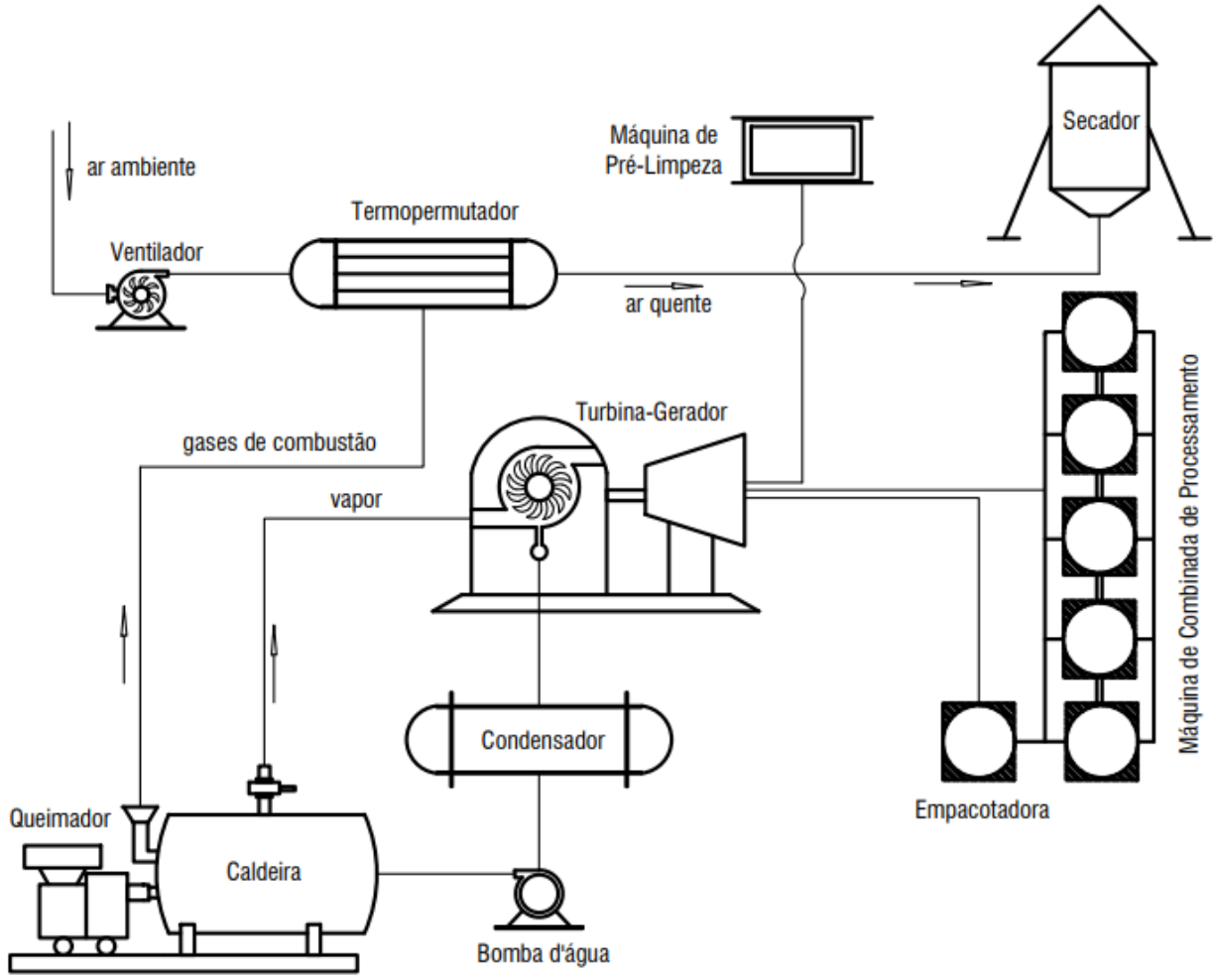


Figura 2.8. Esquema de funcionamento da instalação. Fonte: Autor.

Segundo o esquema acima, a caldeira (flamotubular) de fornalha interna, produz vapor e gases de combustão. O vapor gerado é usado para accionar o cunjunto turbina-gerador, cuja energia gerada é usada para alimentar componentes como o ventilador (insuflador), máquina combinada de processamento de arroz, empacotadora, bomba de água, queimador e dispositivos de baixa potência.

Os gases de combustão produzidos na fornalha também são usados para aquecer, através do termopermutador, o ar ambiente insuflado pelo ventilador, produzindo assim, gases quentes que são direccionados para o secador.

O ar quente direccionado para o secador transporta o calor para o arroz, permitindo assim, a redução da humidade do mesmo, como resultado da absorção da humidade do arroz pelo ar quente.

CAPÍTULO 3
CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTO

3.1. Escolha da Turbina

A escolha da turbina foi feita com base no consumo de energia dos principais equipamentos previstos para instalação, como mostra a tabela a seguir.

Tabela 3.1. Estimativa da potência da turbina.

Item	Equipamento	Potência (kW)	Capacidade	Fabricante
1	Máquina de pré-limpeza	1.5	4-6 t/h	Wuhan Qing Hao Yun Fei Technology Co., Ltd.
2	Máquina combinada de processamento de arroz	79.07	30-40 t/dia	Burt Machinery
3	Ventilador centrífugo	15	770-6050 m^3/h	Shandong Hanqi Industrial Co., Ltd
4	Bomba d'água periférica	2.1	3 m^3/h	FOXLUX
	Balança eléctrica industrial	0.85	1-10 t	Taixing Aida Import And Export Co., Ltd.
5	Queimador de pelotas de biomassa	1.9	156 kg/h	Green Vinci
6	Equipamentos administrativos	1.5		
7	Iluminação	2		
8	Outros equipamentos	2		
Potência Total		**105.92**		

Estimou-se uma potência de 105.92 kW, portanto, escolhe-se a Microturbina a Vapor com uma capacidade 150 kW. Os parâmetros básicos da turbina estão descritos na tabela abaixo, a sua ilustração e os seus parâmetros bem detalhados encontram-se nos Anexos 1.

Tabela 3.2. Parâmetros da turbina. Fonte: Adaptada de DTEC.

Parâmetro	Valor	Unidade
Modelo	NO.15-1.27	
Capacidade	150	kW
Pressão de entrada do vapor	1.27	Mpa
Velocidade	1500	rpm
Temperatura de entrada do vapor	300	℃
Produtividade	1	t/h
Consumo de vapor	6.35	$kg/kW \cdot h$

A microturbina acima é usada em instalações nas quais se necessita de pequenas potências. Para o funcionamento adequado da mesma, é necessário que a caldeira seja dimensionada de acordo com os parâmetros descritos acima.

3.2. Dimensionamento da Caldeira

O dimensionamento da caldeira consiste em gerar uma geometria para a caldeira, a partir das condições do processo, que fornece a área de troca necessária para produzir vapor nas condições pré-estabelecidas.

3.2.1. Cálculo de Combustão

No cálculo de combustão procura-se avaliar os parâmetros fundamentais da queima do combustível.

3.2.1.1. O Poder Calorífico Inferior

O poder calorífico inferior determina-se pela fórmula abaixo.

$$Q_t^i = 4.187[81C^t + 300H^t - 26(O^t - S^t) - 6(W^t + H^t)] \quad [\frac{\text{kJ}}{kg_{comb}}] \tag{3.1}$$

Em que C^t, H^t, O^t, S^t e W^t são as quantidades em massa trabalho de carbono, hidrogénio, oxigénio, enxofre e humidade, [%].

3.2.1.2. Entalpia total dos gases de combustão

A entalpia total dos gases é dada pela fórmula abaixo:

$$I_g = I_{vg} + I_{ar} + I_{comb} \qquad [\text{kJ/kg}] \tag{3.2}$$

Em que $I_{vg,}$ I_{ar} e I_{comb} são as entalpias devido, o poder calorífico inferior, o pré-aquecimento do ar e do combustível respectivamente (kJ/kg).

3.2.1.3. A temperatura dos gases

Pelo método iterativo, acha-se a temperatura dos gases T_g.

3.2.2. Cálculo da fornalha

No dimensionamento de uma fornalha, vários factores e parâmetros são considerados para garantir que ela funcione de maneira eficiente, segura e conforme as necessidades específicas da aplicação. O objectivo principal é determinar as dimensões dos componentes, a capacidade térmica e outros aspectos técnicos que garantam o desempenho desejado.

3.2.2.1. Rendimento do gerador

O rendimento do gerador é calculado pela equação abaixo.

$$n_v = 100 - q_{total} \tag{3.3}$$

$$q_{total} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7 \tag{3.4}$$

Onde:

n_v - É o rendimento do gerador e q_{total} é a perda total;
q_2 – É a fracção de perdas de calor com as cinzas (%);
q_3 - É a fracção de perdas com gases efluentes (de escape) (%);
q_4 - É a fracção de perdas por combustão mecânica incompleta (%);
q_5 - É a fracção de perdas por combustão química incompleta (%);

q_6 - É a fracção de perdas para o meio ambiente por convecção e radiação (%); e

q_7 – É a fracção de perdas associadas às purgas (%).

3.2.2.2. Calor trazido para a fornalha por unidade de combustível

O calor total disponível é dado pela equação abaixo:

$$Q_{disp} = Q_i + Q_{fis,ar} + Q_{fis,comb} \quad [kJ/kg] \tag{3.5}$$

Em que $Q_i, Q_{fis,comb}$ e $Q_{fis,ar}$ são respectivamente o calor devido o poder calorífico inferior do combustível, calor introduzido na caldeira com o ar pré-aquecido fora da caldeira e calor introduzido na caldeira devido ao aquecimento do combustível.

3.2.2.3. Consumo de combustível

O consumo de combustível na caldeira durante o funcionamento activo, é determinado pela expressão:

$$B = \frac{G_O(I_v - I_{aa})}{n_v \cdot Q_i} \qquad \left[\frac{kg}{s}\right] \tag{3.6}$$

Para caso do funcionamento em vazio, o consumo é dado pela expressão abaixo:

$$B_{vazio} = \frac{G_O(I_v - I_{aa})}{\cdot Q_i}(1 - n_v) + 0.1 \cdot B \qquad \left[\frac{kg}{s}\right]$$

Onde I_v é a entalpia da água no estado de vapor saturado na entrada da turbina, em kJ/kg; I_{aa} é a entalpia da água de alimentação em kJ/kg e G_O é a produtividade da turbina em kg/h e Q_i é o poder calorífico inferior em kJ/kg e q_6 é a fracção de perdas para o meio ambiente por convecção e radiação (%); n_v é o rendimento do gerador, em %.

3.2.2.4. Área da fornalha

A área da fornalha é determinada pela expressão abaixo:

$$A_f = \frac{\phi \cdot B \cdot (Q_{disp} - T_{sai}^f)}{\varepsilon_f \cdot \psi \cdot \sigma \cdot \left(T_{ad} \cdot T_{sai}^f\right)^2} \qquad [m^2] \tag{3.7}$$

Em que ϕ é o coeficiente de retenção de calor; ε_f é a emissividade da fornalha; ψ é o factor de eficiência térmica da fornalha que varia de 0.45-0.55 para antracite, carvão de pedra, lenhite e turfa; σ constante de Stefan-Boltzmann em kW/m^2K^4; T_{ad} é a temperatura adiabática da chama em ℃.

Com a área da fornalha calculada, dentro dos comprimentos de fornalhas padronizados, calcula-se o diâmetro da fornalha de:

$$D_f = \frac{A}{\pi \cdot L_f} \quad [m] \tag{3.8}$$

Onde L_f é o comprimento padronizado da fornalha em metro (m), retirado dos Anexos (2).

3.2.2.5. Calor absorvido pela fornalha

O calor absorvido pela fornalha, pela queima do combustível, pode ser determinado pela expressão abaixo:

$$q_v = B \cdot \phi \cdot \left(Q_{disp} - I_{sai}^f\right) \qquad [kW] \tag{3.9}$$

Onde I_{sai}^f é a entalpia do gás à saída da fornalha em kJ/kg; B é o consumo de combustível em kg/s; ϕ é o coeficiente de conservação de calor na fornalha e Q_{disp} é o calor disponível em kJ/kg.

3.2.2.6. Calor transferido por radiação na fornalha

O calor transferido por radiação na fornalha pode ser determinado pela expressão:

$$Q_{rad} = \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot A_f \cdot \left(T_{ch}^4 - T_{pa}^4\right) \qquad [kW] \tag{3.10}$$

Em que ε_f é a emissividade da fornalha; σ constante de Stefan-Boltzmann em kW/m^2K^4; A_g é a área da fornalha em m^2; T_{ch} é a temperatura da chama em ℃; T_{pa} é a temperatura da parede da fornalha, a qual é a soma da temperatura de saturação do vapor (T_{vs}) e a temperatura de excesso (Δt_{excess}) que varia de 20-25℃.

3.2.2.7. Calor transferido por convecção na fornalha

O calor transferido por convecção na fornalha pode ser determinado pela expressão:

$$Q_{conv} = h_{conv} \cdot A_g \cdot \left(T_{ch} - T_{pa}\right) \qquad [kW] \tag{3.11}$$

$$h_{conv} = \frac{0.0668 \cdot (D_f/L_f) \cdot R_e \cdot P_r}{1 + 0.04 \cdot [(D_f/L_f) \cdot R_e \cdot P_r]^{\frac{2}{3}}} \qquad \left[\frac{kW}{m^2 °C}\right] \tag{3.12}$$

Em que A_g é a área da fornalha em m^2; D_f e L_f são respectivamente o diâmetro e o comprimento da fornalha, (m); R_e é o número de Reynolds e P_r é o número de Prandtl; T_{ch} e T_{pa} são as temperaturas da chama e da parede da fornalha em ℃; h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $kW/m^2°C$.

3.2.3. Dimensionamento dos tubos de convecção

No dimensionamento dos tubos de convecção para uma caldeira, pretende-se alcançar vários objectivos essenciais para garantir a eficiência, segurança e bom funcionamento da caldeira. Com isso, pretende-se encontrar a área adequada de transferência de calor, diâmetro e o número de tubos necessários, a disposição e os arranjos dos tubos, entre outros.

3.2.3.1. Temperatura média logarítmica

A temperatura média na caldeira, considerando-se um fluxo contracorrente é dada pela expressão:

$$\Delta t_{lm} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln(\Delta t_{max}/\Delta t_{min})} \qquad [°C] \tag{3.13}$$

$$\Delta t_{max} = T_{ent}^{conv} - T_{vapor} \qquad [°C] \tag{3.14}$$

$$\Delta t_{min} = T_{sai}^{conv} - T_{água} \qquad [°C] \tag{3.15}$$

Em que T_{vapor} é a temperatura do vapor a entrada da turbina, em ℃; $T_{água}$ é a temperatura da água de alimentação a entrada da caldeira, em ℃; T_{ent}^{conv} é a temperatura dos gases na entrada dos tubos, em ℃; T_{sai}^{conv} é a temperatura dos gases a saída da caldeira, que é 50 ℃ acima da T_{vapor}.

3.2.3.2. Coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do tubo

O coeficiente de transferência de calor por convecção, determina-se pela expressão abaixo.

$$h_{conv} = 0.023 \cdot C_c \cdot \frac{k_g}{d_{in}} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.8} \quad [kW/m^2℃] \tag{3.16}$$

Em que d_{in} é o diâmetro interno dos tubos de convecção, em m, retirado dos Anexos (3); k_g é o coeficiente de condutibilidade térmica dos produtos de combustão retirados dos Anexos (2), em $kW/m℃$; C_c é o factor de correcção devido à influência da região de entrada.

3.2.3.3. Coeficiente da troca de calor por radiação

Este coeficiente determina-se pela fórmula abaixo.

$$h_{rad} = \sigma \frac{\varepsilon_{cinz} + 1}{2} \varepsilon_g T_g^3 \frac{1 - (T_{pa}/T_g)^{3.6}}{1 - (T_{pa}/T_g)} \quad [kW/m^2℃] \tag{3.17}$$

Onde ε_{cinz} é a emissividade das cinzas depositadas na superfície interna dos tubos; $(\varepsilon_{cinz} + 1)/2$ é o valor médio entre a emissividade das cinzas e a emissividade absoluta que é usado para compensar a reflexão e a absorção múltiplas nos tubos ($\varepsilon_{cinz} = 0.8$); ε_g é a emissividade do gás de combustão à temperatura dos gases T_g; T_{pa} é a temperatura da parede da fornalha em ℃.

3.2.3.4. Coeficiente global da transferência de calor

Pela equação abaixo, determina-se o coeficiente global de transferência de calor.

$$U = \frac{h_1}{1 + \varepsilon \cdot h_1} \quad [kW/m^2℃] \tag{3.18}$$

$$h_1 = h_{conv} + h_{rad} \quad [kW/m^2℃] \tag{3.19}$$

Em que h_1 é o coeficiente combinado de transferência de calor dos gases no interior dos tubos; ε é o coeficiente de deposição de cinzas em $m^2°C/kW$; $h_{conv}\ e\ h_{rad}$ são coeficientes de troca de calor por convecção e radiação em $kW/m^2°C$.

3.2.3.5. Área de transferência de calor

A área de troca de calor determina-se do calor transferido no na fornalha:

$$Q_{disp} = U \cdot A_{tc} \cdot \Delta t_{lm} \implies A_{tc} = \frac{Q_{disp}}{U \cdot \Delta t_{lm}} \qquad [m^2] \tag{3.20}$$

Em que A_{tc} é a área de troca de calor nos tubos em m^2; Q_{disp} é o calor disponível em kJ/kg; U é o coeficiente global de transferência de calor em $kW/m^2°C$; Δt_{lm} é a temperatura logarítmica ℃.

3.2.3.6. Número de tubos

O número de tubos necessários para a caldeira, determina-se pela expressão abaixo.

$$N_t = \frac{A_{tc}}{\pi d_{in} L_t} \tag{3.21}$$

Em que N_t é o número de tubos; d_{in} é o diâmetro interno do tubo retirado dos Anexos (3), em m, e L_t é o comprimento dos tubos em m, e é igual ao comprimento da fornalha L_f.

3.2.3.7. Material de construção

Selecciona-se Aço Inoxidável 347 como material de a maioria dos componentes da caldeira.

O aço inoxidável austenítico multiúso AISI 347 tem excelente resistência ao calor e à corrosão. As propriedades dessa liga são aprimoradas através do trabalho a frio e, portanto, oferecem melhores propriedades mecânicas do que o aço inoxidável 304. O AISI 347 é adequado para o uso numa variedade de ambientes corrosivos devido à sua excelente resistência à corrosão intergranular. Além disso, essa liga é resistente a altas temperaturas de até 1050°C e combina estabilidade com

excelentes propriedades mecânicas, tornando o AISI 347 uma escolha adequada para aplicações em altas temperaturas (SD Metals, 2024)[5].

3.3. Dimensionamento do Leito do Secador

Numa primeira fase, antes do dimensionamento do leito do secador, será necessário conhecer a quantidade de arroz necessária a secar em cada leito. Para este projecto, é necessário secar 15 toneladas por dia, ou seja, são necessárias 3 cargas de 5 toneladas com o tempo máximo possível de secagem de 2 horas e 10 minutos, segundo Dos Santos (2011), de maneira a perfazer um total máximo de 16 horas de laboração diária.

3.3.1. Características geométricas

O volume do leito é dado pela expressão:

$$V_{leito} = \frac{m_{arroz}}{\rho_{arroz}} \qquad [m^3] \tag{3.22}$$

E a altura do leito é dada pela expressão abaixo:

$$h_{leito} = \frac{V_{leito}}{\pi * {d_{leito}}^2} \tag{3.23}$$

Onde V_{leito} Volume do leito, em m^3; m_{arroz} é a quantidade de arroz a secar, em kg; ρ_{arroz} é a massa específica do arroz, em kg/m^3; e d_{leito} é o diâmetro do leito, em m.

3.4. Dimensionamento do Termopermutador

Dimensionar o termopermutador, implica determinar a área necessária para a troca de calor. Considera-se aqui um banco de tubos em que os gases de combustão passam pelo banco e o ar pelos tubos (internamente).

[5] SD Metals. (2024). Special Stainless Steel.

3.4.1. Temperatura média logarítmica

A temperatura média dentro do termopermutador de fluxo contracorrente é dada pela expressão:

$$\Delta t_{lm} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln(\Delta t_{max}/\Delta t_{min})} \qquad [°C] \tag{3.24}$$

$$\Delta t_{max} = T_{g,ent}^{\ tem} - T_{ar,sai}^{\ tem} \quad [°C] \tag{3.25}$$

$$\Delta t_{min} = T_{g,sai}^{\ tem} - T_{ar,ent}^{\ tem} \quad [°C] \tag{3.26}$$

Em que:

Δt_{lm} é a temperatura média logarítmica em °C;

$T_{g,ent}^{\ tem}$ e $T_{g,sai}^{\ tem}$ – são respectivamente as temperaturas de entrada e saída dos gases de combustão no termopermutador, em °C.

$T_{ar,ent}^{\ tem}$ e $T_{ar,ent}^{\ tem}$ – são respectivamente as temperaturas de entrada e saída do ar no termopermutador, em °C.

A temperatura dos gases na entrada do termopermutador é igual a temperatura de saída dos gases na fornalha.

A temperatura de saída do ar no termopermutador é a temperatura recomendada para a secagem dos grãos de arroz, e a temperatura ambiente é a da entrada do ar.

3.4.2. Calor transferido

Para um trocador de calor o calor transferido por cada elemento de área para um fluído frio na base da Primeira Lei da Termodinâmica escreve-se:

$$\dot{Q}_{term} = m_{ar,(kg/s)} * C_{p,ar} * \left(T_{ar,sai}^{\ tem} - T_{ar,ent}^{\ tem}\right) \qquad [kJ/kg°C] \tag{3.27}$$

Onde, $m_{ar,(kg/s)}$ é o fluxo mássico de ar em kg/s; $C_{p,ar}$ é o calor específico do ar em $kJ/kg°C$; $T_{ar,ent}^{\ tem}$ e $T_{ar,ent}^{\ tem}$ são respectivamente as temperaturas de entrada e saída do ar no termopermutador, em °C.

O fluxo mássico de ar recomendado segundo Da Silva et al. (2005) é de 1.5 m^3/min por m^3 do arroz. Que em kg/s pode ser dado pela fórmula abaixo:

$$m_{ar,(kg/s)} = \frac{m_{ar} * V_{leito} * \rho_{ar}}{60} \qquad [\frac{kg}{s}] \tag{3.28}$$

Onde:

m_{ar}- Fluxo mássico do ar em m^3/min por m^3 do produto;

ρ_{ar}- Massa especifica do ar da a entrada do termopermutador kg/m^3.

3.4.3. Área de transferência de calor

A área de troca de calor determina-se do calor transferido no termopermutador:

$$\dot{Q}_{term} = UA_i\Delta t_{lm} \rightarrow A_{tct} = \frac{\dot{Q}_{term}}{U\Delta t_{lm}} \tag{3.29}$$

Onde A_i é a área de transferência de calor, em m^2 ; U é o coeficiente global de transferência de calor, que varia de 10-40 $kW/m^2°C$ para trocadores do tipo gás-gás.

3.4.4. Número de tubos

O número de tubos necessário para o funcionamento do termopermutador é dado pela seguinte expressão:

$$N_{tubos} = \frac{A_{tct}}{\pi d_t l_t} \tag{3.30}$$

Em que N_{tubos} é o número de tubos; $d_t \; e \; l_t$ são respectivamente o diâmetro e comprimento do tubo, em m.

3.4.5. Selecção do casco e dos cabeçotes

Para o projecto, escolhe-se o casco comummente usado nas indústrias, casco do Tipo E, que segundo Filho (2023), é barato, fácil de fabricação e adequado para processos sem mudança de fase.

O cabeçote dianteiro previsto para o projecto, deve facilitar a limpeza e a inspecção interna dos tubos sem a remoção do cabeçote na sua totalidade. Então, pode adoptar-se o cabeçote do Tipo A.

Escolhe-se o cabeçote traseiro do tipo M, que é um cabeçote de espelho fixo, de fácil desmontagem quando se necessita da limpeza e é comummente usado nos cabeçotes dianteiros A, B e N. Vide Anexos 3.

3.5. Dimensionamento do Condensador

Pretende-se neste dimensionamento, encontrar parâmetros que visam o funcionamento adequando do condensador, como a capacidade de condensação, as dimensões físicas do condensador, assim como outros parâmetros mostrados na marcha a seguir.

3.5.1. Temperatura média logarítmica

A temperatura média dentro do condensador de fluxo contracorrente é dada pela expressão:

$$\Delta t_{lm} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln(\Delta t_{max}/\Delta t_{min})} \quad [°C] \tag{3.31}$$

$$\Delta t_{max} = T_{v,ent}^{\ cond} - T_{ag,sai}^{\ cond} \quad [°C] \tag{3.32}$$

$$\Delta t_{min} = T_{v,sai}^{\ cond} - T_{ag,ent}^{\ cond} \quad [°C] \tag{3.33}$$

Em que:

Δt_{lm} é a temperatura média logarítmica em ℃;

$T_{v,ent}^{\ cond}$ e $T_{v,sai}^{\ cond}$ – São respectivamente as temperaturas de entrada e saída do vapor no condensador, em ℃.

$T_{ag,ent}^{\ tem}$ e $T_{ag,ent}^{\ tem}$ – São respectivamente as temperaturas de entrada e saída d'água no condensador, em ℃.

A temperatura $T_{v,ent}^{\ cond}$ É encontrada a partir da pressão de exaustão do vapor a saída da turbina.

3.5.2. Taxa de condensação do vapor

A taxa de condensação do vapor pode ser determinada pela expressão abaixo:

$$\dot{m}_v = \frac{G_O}{3600} - \frac{\dot{B}_v \cdot P_{turb}}{3600} \qquad [kg/s] \tag{3.34}$$

Em que $\dot{m}_v$ é a taxa de condensação em kg/s; G_o é a produtividade da turbina em kg/h; $\dot{B}_v$ é o consumo de vapor da turbina em kg/kWh; P_{turb} é a potência da turbina em kW.

3.5.3. Calor transferido

O calor transferido para a água de condensação é calculado usando a expressão abaixo:

$$Q^{cond} = \dot{m}_v \cdot h_{fg} \qquad [kW] \tag{3.35}$$

Em que $\dot{m}_v$ é a taxa de condensação em kg/s; h_{fg} é o calor latente de vaporização a temperatura da entrada do vapor no condensador, em kJ/kg.

3.5.4. Vazão mássica de água

A vazão mássica de água no interior dos tubos é obtida do calor transferido.

$$m_{agua} = \frac{Q^{cond}}{c_{p,ag} \cdot (T_{ag,sai}^{\ \ cond} - T_{ag,ent}^{\ \ cond})} \qquad [kg/s] \tag{3.36}$$

Em que m_{agua} é a vazão mássica da água, em kg/s; $c_{p,ag}$ é o calor específico da água á temperatura média da água, em kJ/kg°C; $T_{ag,ent}^{\ \ tem}$ e $T_{ag,ent}^{\ \ tem}$ são respectivamente as temperaturas de entrada e saída d'água no condensador, em °C; Q^{cond} é o calor transferido para a água em kW.

3.5.5. Coeficiente global de transferência de calor

Este coeficiente é determinado por meio da fórmula apresentada abaixo:

$$U = \frac{1}{(1/h_i) + (1/h_0)} \quad [kW/m^2°C] \tag{3.37}$$

Onde h_i é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície interna do tubo, em kW/m^2°C; h_0 é o coeficiente médio de transferência de calor por condensação em película na superfície externa do tubo horizontal kW/m^2°C.

3.5.6. Área de transferência de calor

A área de transferência de calor no condensador é dada pela expressão abaixo.

$$A_{tc,cond} = \frac{Q^{cond}}{U \cdot \Delta t_{lm}} \qquad [m^2] \tag{3.38}$$

Onde $A_{tc,cond}$ é a área de transferência de calor no condensador, em m^2.

3.5.7. Número de tubos

O número de tubos necessário para o funcionamento do condensador é dado pela seguinte expressão:

$$N_{tubos} = \frac{A_{tc,cond}}{\pi d_t l_t} \tag{3.39}$$

Onde $A_{tc,cond}$ é a área de transferência de calor no condensador, em m^2; d_t *e* l_t são respectivamente o diâmetro e comprimento do tubo em metros (m).

3.6. Dimensionamento da Chaminé

Busca-se neste cálculo, encontrar as dimensões dos componentes adequadas da chaminé, de modo a garantir a dispersão adequada dos gases expelidos na instalação.

3.6.1. Fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé

O fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé é determinado pela fórmula abaixo:

$$\dot{V}_g^{ch} = \dot{B}_c \cdot V_{g,Norm} \frac{t_{gB}^{ch} + 273}{273} \cdot \frac{1.01 \cdot 10^5}{P_B} \qquad [m^3/s] \tag{3.40}$$

Em que P_B é a pressão barométrica, em Pa; B_c é o consumo de combustível, em kg/s; t_{gB}^{ch} é a temperatura dos gases na base da chaminé, em ℃; $V_{g,Norm}$ é o volume dos gases de combustão, em m^3/kg.

3.6.2. Diâmetros da chaminé

Os diâmetros da chaminé são calculados pelas fórmulas apresentadas abaixo:

$$d_{boca} = 1.13 \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}_g^{ch}}{c_{g,boca}}} \qquad [m] \tag{3.41}$$

$$d_{base} = d_{boca} \qquad [m] \tag{3.42}$$

$$d_{médio} = \frac{d_{boca} + d_{base}}{2} \quad [m] \tag{3.43}$$

Em que d_{boca}, d_{base} e $d_{médio}$ são respectivamente o diâmetro da boca, da base e diâmetro médio, em m; $c_{g,boca}$ é a velocidade dos gases na boca da chaminé, em m/s. É igual a $10\,m/s$ para extracção artificial e 4 á $8m/s$ para extracção natural; V_g^{ch} é o fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé em m^3/s.

3.6.3. Velocidades dos gases

As velocidades dos gases na base da chaminé e a velocidade média dos mesmos são dados pelas fórmulas abaixo:

$$c_{g,base} = \frac{c_{g,boca} \cdot {d_{boca}}^2}{{d_{base}}^2} \qquad [m/s] \tag{3.44}$$

$$c_{médio} = \frac{c_{g,base} + c_{base}}{2} \qquad [m/s] \tag{3.45}$$

$c_{g,base}$ e $c_{médio}$ são a velocidade dos gases na base e velocidade média, em m/s; $c_{g,boca}$ é a velocidade dos gases na boca da chaminé, em m/s; d_{boca} é o diâmetro da boca em m.

3.6.4. Temperatura dos gases

As temperaturas dos gases na chaminé são dadas pelas fórmulas abaixo:

$$t_{boca} = t_{base} + \Delta t \cdot H \qquad [℃] \tag{3.46}$$

$$t_{média} = \frac{t_{base} + t_{boca}}{2} \qquad [℃] \tag{3.47}$$

Onde t_{base}, t_{boca} e $t_{média}$ São temperaturas da base, boca e média da chaminé, em ℃; Δt é a queda média de temperatura por metro de altura da chaminé $℃/m$, varia de 1-1.5 para chaminés fabricadas de tijolos, de 2-3 fabricadas de aço com revestimento, de 3-4 para chaminés fabricadas de aço sem revestimento; H é a altura da chaminé me m, retirada do ábaco do Anexos (4).

3.6.5. Altura corrigida da chaminé

Para o cálculo da altura corrigida da chaminé, usa-se a fórmula abaixo:

$$H = \frac{\Delta P + \zeta \frac{{c_{boca}}^2}{2} \rho_{gás}(1 + \beta \cdot t_{boca})}{g\left(\frac{\rho_{ar}}{1 + \beta \cdot t_{ar}} - \frac{\rho_{ar}}{1 + \beta \cdot \bar{t_g}}\right) - \frac{\lambda}{3 \cdot d_{médio}} \cdot \frac{{c_{médio}}^2}{2} \cdot \rho_{gás} \cdot (1 + \beta \cdot \bar{t_g})} \quad [m] \qquad (3.48)$$

Em que ζ é o coeficiente de resistência local na saída da chaminé. Usa-se como valor médio $\zeta = 1.06$; ρ_{ar} e$\rho_{gás}$ são as densidades dos gases e do ar em kg/m^3; t_{ar} é a temperatura do ar ambiente em ℃; λ é o coeficiente de atrito na parede interior da chaminé; $\beta = 1/273$ é o coeficiente de expansão térmica.

Depois de calculada a altura pela fórmula acima, verifica-se o erro relativo entre a altura lida no ábaco, caso seja inferior que 10% aceita-se, caso contrário, aproxima-se o valor lido no ábaco e repetem-se os cálculos a partir da t_{boca}.

CAPÍTULO 4
ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÓMICA

4.1. Metodologia

Este estudo visa avaliar a viabilidade económica de estabelecer uma instalação de processamento de arroz em uma determinada localidade. O objectivo é determinar se o investimento inicial, custos operacionais e receitas potenciais justificam o empreendimento.

O estudo da viabilidade económica para este projecto foi feito com base na colecta de dados estruturados, em que as principais ferramentas de colectas de dados foram pesquisas em artigos relacionados e no uso de plataformas de comércio electrónico.

Para que fosse possível a análise da viabilidade económica deste projecto, obedeceu-se às seguintes etapas:

- Colecta de dados: Foram levantadas informações por meio de artigos publicados de empresas brasileiras que operam na área e em plataformas de comércio electrónico.
- Análise de dados: A partir de todas as informações colectadas, fez-se a análise dos dados, com intuito de facilitar a visualização dos processos e dos resultados obtidos.
- Análise de investimentos: Foi demonstrada a viabilidade com base em projecções financeiras de fluxos de caixas dos indicadores financeiros. Essas projecções foram elaboradas por meio planilhas electrónicas (*Excel*) que se apresentam no Anexos 5, de onde foram identificadas as reais possibilidades da instalação.

4.2. Capital Inicial Investido

Para a implantação da fábrica de processamento de arroz, são necessários investimentos em máquinas e equipamentos, móveis, veículos, construção dos imóveis e outros itens necessários para o funcionamento da mesma.

O custo por metro quadrado é usado para calcular o orçamento de uma obra de construção civil de acordo com área do imóvel. Para este projecto foi feita uma estimativa do custo de construção de acordo com as entidades internacionais (brasileira) de construção civil[6].

O valor total investido na compra de em máquinas e equipamentos, móveis, veículos, construção dos imóveis e outros itens, segundo o Anexos 5 é de 303,970.90 USD (trezentos e três mil, novecentos e setenta e noventa centavos de dólares norte americanos).

4.3. Custos Operacionais

Foram levantados os custos anuais para o funcionamento do empreendimento, dois quais são subdivididos em custos fixo e variáveis.

4.3.1. Custos Fixos

Os Custos Fixos são os encargos em que a empresa suporta independentemente do nível de produção, são custos que existem mesmo quando a empresa não está produzindo. Nos custos fixos estão envolvidos todos os desembolsos como a mão-de-obra, depreciação e aluguel.

4.3.2. Custos Variáveis

Os Custos Variáveis correspondem a todos os custos que variam conforme a actividade produtiva, ou seja, eles crescem ou decrescem conforme a quantidade produzida. Estão envolvidos nestes custos, a matéria-prima (arroz), fretes, combustível, entre outros.

O custo anual da matéria-prima foi baseado em 15 toneladas de arroz processado por dia na instalação e pelo preço médio de compra no mercado do mesmo. Os outros custos estão detalhados no Anexos 5.

Tabela 4.1. Custo anual da matéria-prima.

Matéria-prima	Valor (USD)
Quantidade mensal de matéria-prima (em sacas de 50 kg)	7800
Preço de arroz (em sacas de 50 kg)	21.58

[6] Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)

Custo mensal da matéria-prima	168324
Custo anual da matéria-prima	**2019888**

Estima-se anualmente um valor de 2,019,888.00 USD (dois milhões, dezanove mil e oitocentos e oitenta e oito dólares americanos) para compra da matéria-prima.

4.3.3. Depreciação

A depreciação refere-se à perda de valor de um certo bem devido ao seu uso, desgaste natural ou mesmo de sua obsolescência normal.

Para fins de projecção a depreciação vai impactar directamente no imposto de renda á pagar, tendo em vista que ela incide directamente no resultado da empresa, fazendo com que se pague menos impostos. No fluxo de caixa acrescenta-se o valor depreciado ao final da projecção, pois ela não representa efectivamente uma saída de caixa, mas sim, um benefício fiscal. Apresenta-se no Anexos 5 os detalhes do levantamento do valor da depreciação da maquinaria, onde o valor total de depreciação por ano é de 3,919.38 USD (três mil, novecentos e dezanove e trinta e oito centavos dólares norte americanos).

4.4. Levantamento da Estimativa da Receita Anual

O preço de venda médio de um quilograma de arroz foi definido através de orçamentos com empresas já actuantes no mercado. O preço de venda do arroz será o preço de compra da matéria-prima acrescido de uma margem de 30% para que seja rentável ao negócio.

Tabela 4.2. Estimativa de venda anual.

Estimativa de Venda Anual	
Item	**Valor (USD)**
Preço de matéria-prima	2019888.00
Preço de venda (+30% da matéria prima)	2625854.40

Estima-se a venda anual de arroz num valor de 2,625,854.40 USD (dois milhões, seiscentos e vinte e cinco mil, oitocentos e cinquenta e quatro e quarenta centavos de dólares americanos).

4.5. Análise do Retorno do Investimento

A análise do retorno do investimento deste projecto foi feita por meio de indicadores financeiros usados na análise de viabilidade económica. Usaram-se os indicadores VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno) e o Payback Simples.

O Valor Presente Líquido (VPL), do inglês *Net Present Value* (NPV) utiliza os princípios de matemática financeira, calculando o valor presente do fluxo de caixa do investimento. Este indicador é chamado de líquido, pois considera o fluxo total com as saídas (investimentos) e entradas (retornos) descontadas a uma taxa mínima de atractividade (TMA). Para o projecto foi considerado uma TMA de 13.7% ao ano.

A Taxa Interna de Retorno (TIR), também é conhecida por seu nome em inglês *Internal Rate of Return* (IRR), apresenta a taxa de rentabilidade esperada considerando o seu fluxo de caixa projectado.

O Payback tem como pressuposto avaliar o tempo que o projecto demorará para retornar o total do investimento inicial não levando em conta o dinheiro no tempo (custo de oportunidade). Quanto mais rápido o retorno, menor é o Payback e melhor é o projecto.

Através do fluxo de caixa apresentado no Anexos 5, obtém-se a tabela abaixo, que representa os valores dos indicadores.

Tabela 4.3. Valores representativos dos indicadores financeiros.

Indicadores Financeiros		
Taxa Mínima de Atractividade (TMA): 13.7% ao Ano		
VPL (NPV)	**TIR (IRR)**	**Payback**
359,994.98	56.42%	1.583

Segundo a Tabela 4.3, o projecto é economicamente viável, pois, remunera a empresa a 13.7% ao ano e ainda sobra 359,994.98 USD (positivo) num período de cinco anos, portanto o projecto vai além das expectativas. A taxa interna de rentabilidade é de 56.42% ao ano e o período mínimo de recuperação do investimento é de aproximadamente 1 ano e sete meses.

CAPÍTULO 5
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Considerações Gerais

Neste capítulo, apresenta-se os principais resultados obtidos no dimensionamento dos componentes. Não só, mas também se apresenta as características das edificações da instalação e as suas condições ambientais.

5.2. Resultados do Dimensionamento da Caldeira

Os resultados principais do dimensionamento da caldeira estão apresentados nas tabelas abaixo. Neles, engloba-se a parte da fornalha e a parte dos tubos de convecção. Para mais detalhes, vide o Anexos 6 e Anexos 7.

Tabela 5.1. Resultados do cálculo térmico da fornalha.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura adiabática	T_{ad}	1609.51	℃
Comprimento	L_f	1.273	m
Diâmetro	D_f	600	mm
Temperatura da chama	T_{ch}	1275.05	℃
Temperatura da saída dos gases na fornalha	T_{sai}^{f}	1000	℃
Consumo de combustível no activo	B	0.028	kg/s
Consumo de combustível no vazio	B_{vazio}	0.0056	kg/s

O consumo de combustível é de 0.028 kg/s, ou seja, para produção de 1000 kg/h de vapor necessário para o accionamento da turbina, a fornalha consome 100.8 kg/h da casca de arroz.

A caldeira precisa manter uma certa temperatura para garantir que a água ou o vapor esteja pronto para uso imediato. O consumo de combustível em vazio em refere-se ao consumo de combustível

quando a caldeira está operando sem carga. Para o projecto, o valor é de aproximadamente a 0.0056 kg/s, que corresponde a 20.16 kg/h. Esse parâmetro é necessário para manter a caldeira pronta para entrar em operação plena rapidamente quando as actividades de produção na instalação retomarem.

Verifica-se na tabela, temperaturas muito altas dos gases dentro da fornalha o que faz com que na construção desta caldeira se escolha matérias resistentes a temperaturas elevadas para garantir segurança durante o funcionamento.

São apresentados na tabela baixo, os resultados referentes aos cálculos nos tubos de convecção. Vide o Anexos 8 para mais detalhes.

Tabela 5.2. Resultados do cálculo de transferência de calor no banco de tubos.

Parâmetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidade**
Temperatura dos gases na entrada dos tubos	T_{sai}^{f}	1000	℃
Temperatura da saída dos Gases	T_{sai}^{conv}	350	℃
Temperatura média logarítmica	Δt_{lm}	441.40	℃
Diâmetro dos tubos	d_{in}	64	mm
Comprimento dos tubos	L_t	1.273	m
Número de tubos	N_t	14	

Na construção da caldeira projectada, são necessários 14 tubos de comprimento 1.273 metros e de 64 mm de diâmetro.

As temperaturas dos gases de combustão na fornalha e nos tubos de convecção são próximas e elevadas, isso permite a selecção de matérias da mesma natureza e resistentes ao calor na construção dos componentes expostos a estes gases.

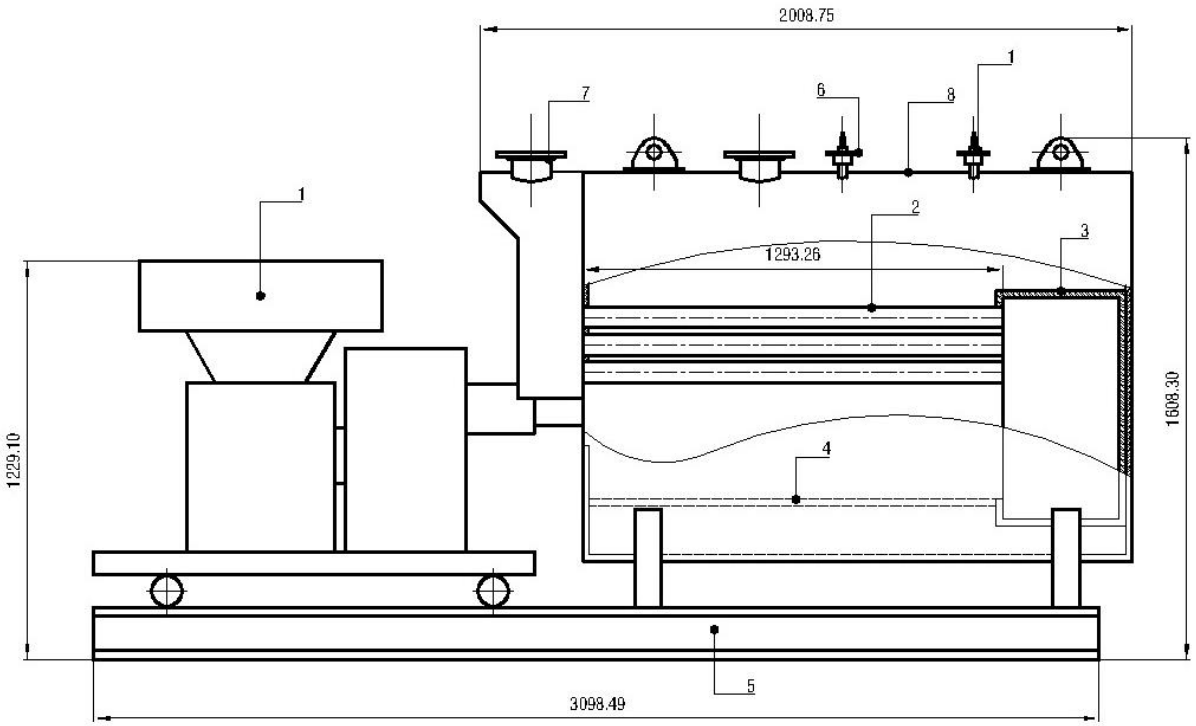


Figura 5.1. Ilustração da caldeira. Dimensões dadas em milímetros. Fonte: Autor.

Ilustra-se acima a caldeira de tubos horizontais com câmara de reversão húmida. Em que o (1) é o queimador, (2) são tubos de convecção, (3) é a câmara de reversão, (4) é a fornalha, (5) é o suporte, (6) é a válvula, (7) saída dos gases de combustão e (8) o casco da caldeira. Encontra-se no Anexos 14 os desenhos detalhados da caldeira.

5.3. Resultados do Dimensionamento do Leito do Secador

Os resultados do dimensionamento do leito do secador estão apresentados na tabela abaixo. Esses são dados como parâmetros fundamentais para a construção do secador de arroz. Para mais detalhes, vide a tabela do Anexos 9.

Tabela 5.3. Resultados do dimensionamento do leito do secador.

Item	Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Dados de Partida	Massa específica do arroz	ρ_{arroz}	570	kg/m^3
	Quantidade de arroz secada em cada secador	m_{arroz}	5000	kg

Dados de Saída	Volume do leito	V_{leito}	8.772	m^3
	Largura e comprimento do leito	L_{leito}	2.411	m
	Altura do leito	h_{leito}	1.509	m

Pela tabela acima, nota-se que o volume do leito necessário para a secagem de 5 toneladas de arroz é de 8.772 metros cúbicos (m^3). De modo a proporcionar um espaço mais compacto do secador, opta-se por um secador cúbico de 1.509 m de altura de leito.

Apresenta-se na figura abaixo, a ilustração esquemática do secador assente sobre uma base de concreto e os seus respectivos mecanismos de carregamento e descarregamento. O processo de carregamento é feito pelo transportador móvel de parafuso sem fim, e o de descarregamento é feito pelo parafuso transportador horizontal. Vide o Anexos 15 para mais detalhes.

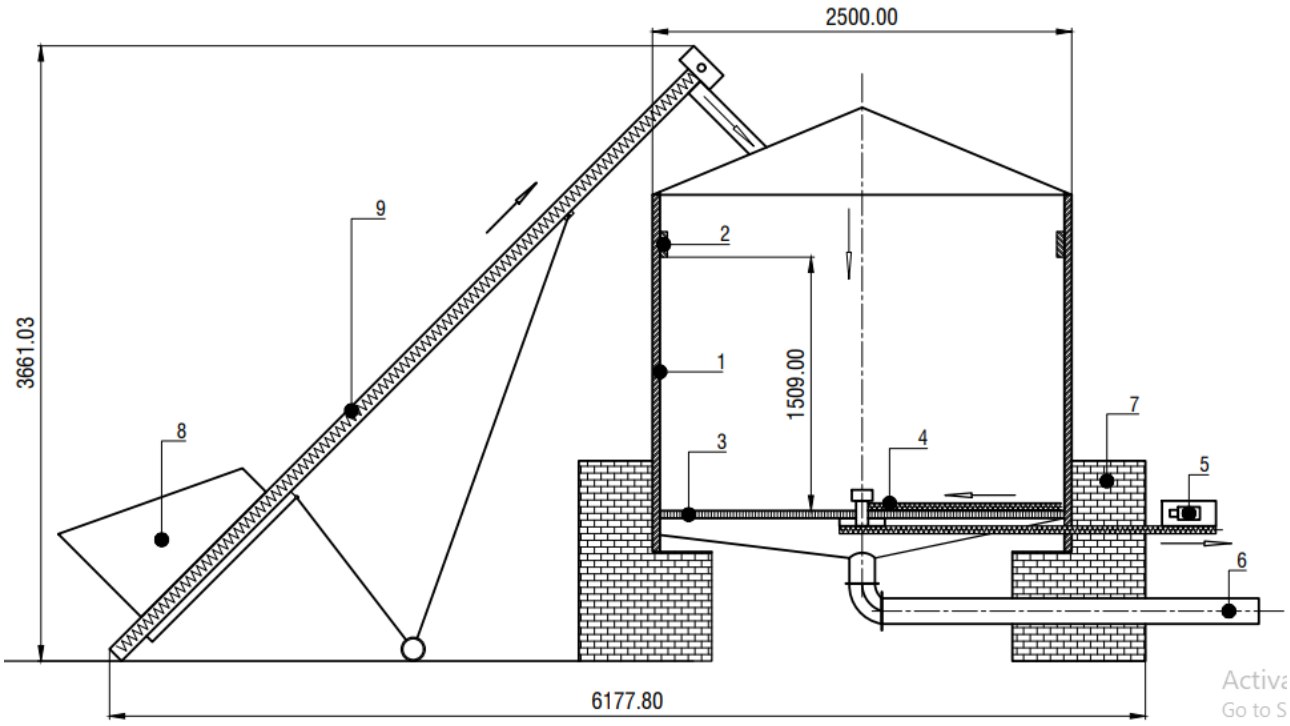


Figura 5.2. Ilustração do secador. Dimensões em (mm). Fonte: Autor.

Legenda:

1. Parede do secador
2. Indicador de enchimento máximo
3. Distribuidor de ar
4. Parafuso de descarga
5. Motor do transportador de descarga
6. Tubo de ar
7. Base de suporte do secador
8. Tremonha
9. Tubo transportador de carga

5.4. Resultados do Dimensionamento do Termopermutador

O dimensionamento do termopermutador teve como parâmetros, dados do leito do secador e da caldeira. Os dados do leito foram principalmente usados para determinar o fluxo mássico de ar necessário para secar a quantidade arroz prevista (5000 kg). Os dados resultantes do dimensionamento estão ilustrados na tabela abaixo, e para mais detalhes, vide o Anexos 10.

Tabela 5.4. Resultados do dimensionamento do termopermutador.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura média logarítmica	Δt_{lm}	34.67	℃
Calor transferido	Q	10.80	kW
Diâmetro dos tubos	d_t	38.1	mm
Comprimento dos tubos	l_t	1.5	m
Número de tubos	N_{tubos}	44	

O calor transferido no termopermutador entre os gases de combustão que saem da caldeira e o ar insuflado é de 10.80 kW. São necessários para este feito, 44 tubos de 1.4 m de comprimento e de 38.1 mm de diâmetro.

Apresenta-se na Figura 5.3, a ilustração do termopermutador dimensionado. Apresenta-se no Anexos 16, os desenhos detalhados.

Legenda:

A. Entrada dos gases de combustão (Bocal)
B. Saída do ar quente para o secador (Bocal)
C. Entrada do ar ambiente (Bocal)
D. Saída dos gases para a chaminé (Bocal)
1. Espelho frontal
2. Chicana
3. Espelho traseiro
4. Cabeçote traseiro
5. Cabeçote frontal
6. Placa de partição
7. Tubos
8. Suporte
9. Pino de içamento
10. Casco

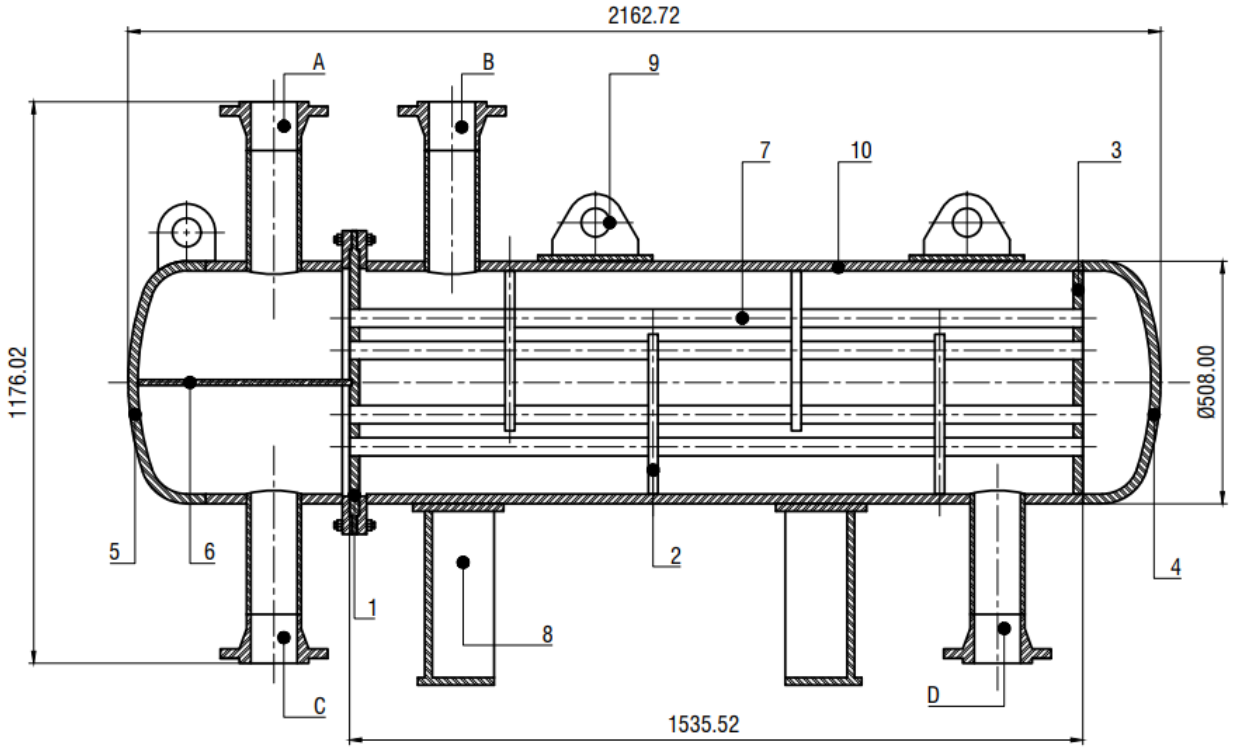


Figura 5.3.Ilustração do termopermutador. Fonte: Autor.

5.5. Resultados do Dimensionamento do Condensador

Os resultados do dimensionamento do condenador estão apresentados na tabela abaixo. Para determinação dos mesmos teve-se como parâmetros principais, as temperaturas de saída e entrada do vapor e da água de alimentação e o consumo de vapor da turbina seleccionada. Para mais detalhes, vide o Anexos 11.

Tabela 5.5. Resultados do dimensionamento do condensador.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Taxa de condensação de vapor	m_v	0.013	kg/s
Temperatura média logarítmica	Δt_{lm}	64.92	℃
Calor transferido	Q	29.06	kW
Diâmetro dos tubos	d_t	28.58	mm
Comprimento dos tubos	l_t	800	mm
Número de tubos	N_{tubos}	10	

Pelos dados apresentados acima, nota-se que durante o processo de condensação, 46.8 kg de vapor se transforma em líquido a cada uma hora. O calor transferido entre o vapor e a água de alimentação é de 29.06 kW. A temperatura média dos fluidos dentro do condensador é de 64.94 ^{o}C.

Para a construção do condensador são necessários, 10 tubos de 800 mm de comprimento e de 28.58 mm de diâmetro. Apresenta-se na figura abaixo, a ilustração do condensador dimensionado. Vide o Anexos 17 para mais detalhes.

Legenda:

A. Entrada da água de alimentação (Bocal)
B. Entrada de vapor (Bocal)
C. Saída da água de alimentação (Bocal)
D. Saída do condensado (Bocal)
1. Espelho frontal
2. Chicana (*Buffle*)
3. Cabeçote fontal
4. Tubos
5. Cabeçote traseiro
6. Casco
7. Suporte
8. Pino de içamento

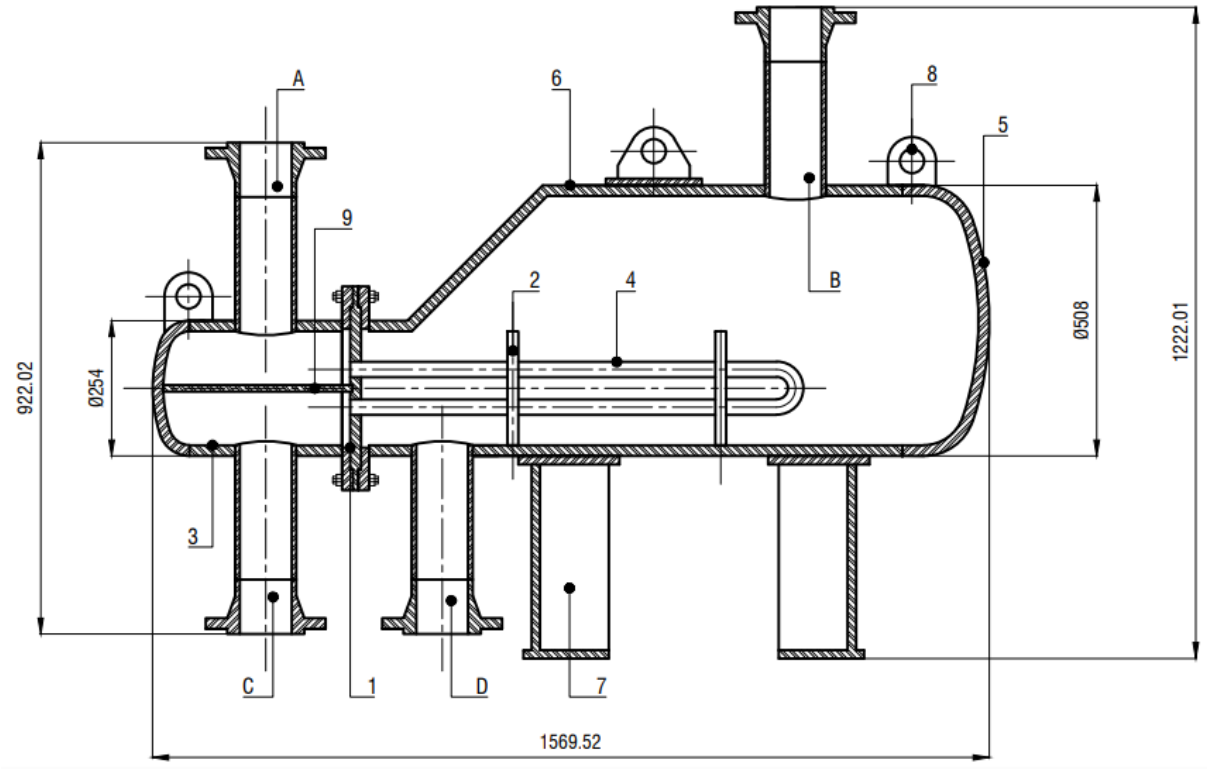


Figura 5.4. Ilustração do termopermutador dimensionado. Fonte: Autor.

Ilustra-se acima o condensador do tipo casco-tubo de um passe com tubos em forma de U. O formato aplicado minimiza as perdas de calor, garantindo que o calor seja transferido de maneira mais eficaz entre os fluidos.

5.6. Resultados do Dimensionamento da Chaminé

Os resultados do dimensionamento da chaminé estão apresentados na tabela abaixo. Nesta, mostra-se a altura da chaminé e os diâmetros da mesma, dimensões essas, que servem de base para a sua construção.

Apresenta-se abaixo a tabela de resultados provenientes do dimensionamento da chaminé. Para mais detalhes, vide o Anexos 12.

Tabela 5.6. Resultados fundamentais do dimensionamento da chaminé.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Temperatura dos gases na base da chaminé	t_{base}	130.15	℃
Diâmetro da chaminé	$d_{médio}$	0.897	m
Altura da chaminé	H	16.93	m
Temperatura dos gases na saída da chaminé	t_{boca}	69.47	℃

Abaixo, mostra-se os componentes fundamentais que constituem a chaminé dimensionada. Vide em Anexo 18 o desenho mais detalhado da chaminé.

Os gases de combustão entram na chaminé a uma temperatura abaixo de 200 ºC, o que permite o uso de aço carbono como material de construção da mesma. Durante a montagem da canalização, devem ser priorizadas as curvas de 45º, pois têm uma transição mais suave, resultando em menos perdas de carga.

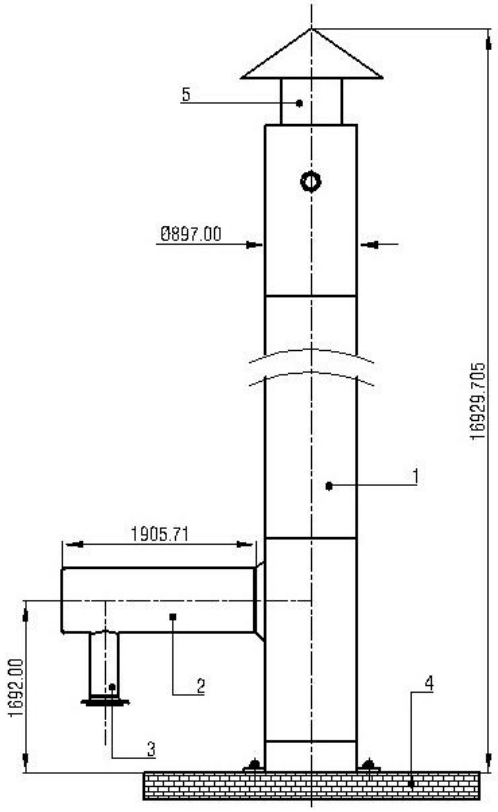


Figura 5.5. Ilustração da chaminé. Dimensões em (mm). Fonte: Autor.

Legenda:

1. Corpo da chaminé
2. Conduta da entrada
3. Bocal
4. Base de concreto
5. Boca da chaminé

5.7. Escolha de Equipamentos para a Instalação

Neste ponto, são escolhidos os equipamentos auxiliares para o funcionamento da instalação, ou seja, equipamentos fundamentais que auxiliam no funcionamento dos equipamentos dimensionados.

Fez-se a selecção de equipamentos como a máquina de pré-limpeza, máquina combinada de processamento de arroz, ventilador centrífugo, bomba periférica, queimador de pelotas de biomassa e tubo transportador de carga de parafuso sem fim.

Mostram-se nos subcapítulos que se seguem as descrições e os parâmetros técnicos de alguns equipamentos escolhidos. Encontram-se no Anexos 13, as ilustrações de todos equipamentos mencionados no parágrafo anterior, assim como, os seus parâmetros técnicos de forma mais detalhada.

5.7.1. Máquina de peneirar arroz (máquina de pré-limpeza)

A descrição técnica deste equipamento, assim como o seu esquema apresenta-se abaixo.

Tabela 5.7. Descrição técnica da máquina de pré-limpeza.

Característica	Valor
Modelo/Marca	MGCZ46 15 2 / BC
Potência do motor	3 kW
Capacidade de produção	4-6 t/h
Dimensões	2120x1680x2140 mm
Fabricante	Wuhan Qing Hao Yun Fei Technology Co., Ltd.

Seleccionou-se este equipamento com base na quantidade de arroz processada diariamente. A produtividade deste equipamento é muito maior que a produtividade da Máquina Combinada de Processamento de Arroz, de modo a permitir menos tempo no processo de pré-limpeza.

5.7.2. Máquina combinada de processamento de arroz

O uso desta é muito vantajosa que o uso de máquinas separadas. Ela proporciona um funcionamento contínuo ininterrupto durante o processamento, consequentemente aumento da produtividade. A descrição técnica deste equipamento apresenta-se na tabela abaixo.

Tabela 5.8. Máquina combinada de processamento de arroz.

Característica	Valor
Modelo	-
Potência do motor	79.07 kW
Capacidade	30-40 t/h

Dimensões	6000*3400*3180 (mm)
Fabricante	Burt Machinery

5.7.3. Queimador de pelotas de biomassa

Tratando-se da queima da biomassa, escolhe-se um queimador típico e adequado para a queima da mesma. Escolhe-se queimador de pelotas de biomassa em função do consumo de combustível dimensionado na caldeira, queimador este, que fornece fonte de calor para caldeiras ou máquinas de secagem por meio da queima de biomassa. Os parâmetros técnicos deste equipamento, apresenta-se na tabela abaixo.

Tabela 5.9. Características técnicas do queimador

Característica	**Valor**
Modelo	GV-30 G
Consumo de combustível	104 kg/h
Consumo de energia	1.9 kW
Potência de saída	$30x10^4$ kcal
Fabricante	Green Vinci Biomass Energy Co., Ltd.
Tamanho da biomassa	Não superior a 5 cm

O queimador apresentado acima consome aproximadamente 104 kg de biomassa a cada hora. Este consumo quando comparado ao consumo calculado, apresenta uma diferença abaixo de 4%, o que é aceitável para o funcionamento adequado da caldeira.

5.8. Análise do Consumo de Combustível

A análise do consumo do combustível para o projecto desta natureza é fundamental, pois, é nela onde se verifica se a quantidade da casca produzida no processamento de uma certa quantidade de arroz pode, ou não processar arroz da mesma quantidade.

Fez-se a análise considerando que a máquina de pré-limpeza, o secador e máquina combinada trabalhando em simultâneo no processamento de cinco (5) toneladas de arroz.

A tabela abaixo representa o tempo normal que as três máquinas gastam para processar cinco (5) toneladas de arroz.

Tabela 5.10. Tempo médio de processamento.

Máquina	**Produtividade Média**	**Tempo Médio Gasto (h)**
Máquina de pré-limpeza	5 t/h	1
Secador	-	2.17
Máquina combinada	35 t/dia ou 1458.33 kg/h	3.43

Considera-se que o tempo de processamento é de 3.43 horas, e que a casca corresponde a 22% da massa total de arroz, então a cada 5 toneladas produz-se aproximadamente a 1100 kg de combustível (casca).

O consumo de combustível do queimador é de 0.0289 kg/s, o que significa que a cada 3.43 horas o queimador consome 358.10 kg de casca de arroz. Portanto, conclui-se que a quantidade de combustível produzido no processamento de unidade de tonelada é suficiente para processar mais de duas (2) unidades de toneladas da mesma quantidade.

5.9. Fontes de Energia

O fornecimento de energia eléctrica será feito principalmente pelo gerador eléctrico alimentado pela caldeira a biomassa. No tempo de paragem da fábrica (funcionamento em vazio), será usada a energia da rede nacional para alimentação das lâmpadas e dispositivos electrónicos, isso permitirá que a fábrica fique iluminada mesmo não havendo produção. Além disso, será usada como fonte de ignição para inicialização da combustão no queimador.

O queimador de pelota de biomassa deste projecto não funciona correctamente se o fornecimento da electricidade for interrompido. A alimentação de combustível, a ventilação, o controle da combustão e os sistemas de segurança dependem de electricidade para operar. Portanto, na ausência de electricidade vindo do gerador (funcionamento no vazio), o queimador praticamente deixa de funcionar e não poderá ser reiniciado até que a electricidade seja restabelecida. Entretanto,

a mesma energia da rede nacional, não só será usada para ignição ou iluminação, mas também usada para alimentação do queimador no período de funcionamento em vazio.

Para a inicialização do processo de combustão, no caso da ausência da casca de arroz, considerar-se o uso de outras biomassas que são semelhantes em termos de características (dimensões recomendadas) e propriedades energéticas. Entretanto, biomassas como a serradura, casca de milho, sabugo de milho triturado e bagaço de cana-de-açúcar triturado podem ser usadas para a inicialização do processo de combustão.

5.10. Características da instalação

Em qualquer unidade industrial é sempre necessário assegurar, de forma controlada, o acesso aos vários locais da indústria de forma ordenada e segura, quer de pessoas, quer de veículos com passageiros ou carga.

Apresenta-se nos subcapítulos subsequentes a descrição das instalações feitas para este projecto.

5.10.1. Local de implantação da fábrica

A fábrica será instalada no distrito de Nicoadala, província da Zambézia[7]. A instalação da fábrica em Nicoadala deve-se principalmente ao facto da proximidade da matéria-prima, na qual destaca-se, a presença predominante das actividades agrícolas de produção de arroz nos distritos vizinhos (Namacurra, Mopeia e Maganja da Costa) e nas regiões centro e norte.

5.10.2. Armazenagem

A fábrica será composta por dois armazéns: um armazém da matéria-prima e outro de arroz processado (em sacas de 10, 25 e 50 kg).

O produto acabado será armazenado em sacas, na qual, serão amontoadas e separadas em paletes de altura mínima de 12 cm, o que permitem boa circulação do ar entre as colunas de sacas. No armazém do arroz processado o movimento é mecanizado, com o auxílio de empilhadoras.

[7] Segundo os dados do Conselho Executivo Provincial da Zambézia, a província da Zambézia foi em 2023, a maior contribuinte da produção nacional de arroz com cerca de 55%.

5.10.3. Abastecimento de água

A fonte primária de água será proveniente da empresa FIPAG, que é uma rede nacional de abastecimento de água. O abastecimento na instalação será feito por meio de tanque subterrâneo, e com auxílio de um depósito elevado, far-se-á distribuição na instalação por gravidade. Em casos em que ocorra alguma interrupção de fornecimento de água da rede nacional, os reservatórios da instalação deverão ser utilizados.

5.11. Características do Edifício

Sendo um edifício para processamento de cereal, é importante considerar-se diversos aspectos para garantir a eficiência e segurança do processo.

5.11.1. Estrutura

O tipo de estrutura fabril escolhido para a instalação é de betão armado, pois ela apresenta um baixo custo de manutenção que permitirá a aplicação dos fundos para outros fins em virtude do desenvolvimento da fábrica. A altura dos pilares será de 6 metros.

5.11.2. Cobertura

A cobertura do edifício é inclinada com treliças, com telhado do tipo *shed* (em dente de serra), por se projectar vão inferior que 20 metros.

5.11.3. Revestimentos laterais

Para as paredes exteriores bem como as interiores, são escolhidas as paredes de alvenaria de tijolos, garantindo a protecção das máquinas, dos equipamentos, das instalações e dos operadores.

5.11.4. Pavimento

O pavimento da fábrica terá a forma construtiva rígida de betão, com a aplicação de películas de resina. As máquinas serão assentes em fundamentos apropriados para evitar que a vibração durante o funcionamento das mesmas não destrua o piso.

5.11.5. Arquitectura

Apresenta-se no Anexos 19, a planta baixa simplificada da instalação. Onde a área total da unidade fabril é de 340.6 m^2.

5.12. Condições Ambientais

Monitorar as condições ambientais em uma unidade de processamento de arroz é fundamental, não só para optimizar a o processo de produção, mas, para assegurar a saúde dos operários. Isso inclui considerar factores como a iluminação, ventilação, acústica e climatização.

5.12.1. Iluminação

Para a iluminação artificial escolhe-se lâmpadas com vapor de mercúrio, montadas numa altura de por cima do plano de trabalho de 5.1 metros do chão.

A iluminação recomendada para diferentes ambientes de trabalho da fábrica apresenta-se na tabela a seguir:

Tabela 5.11. Iluminação recomendada para diferentes ambientes de trabalho da fábrica.

Tipo de Secção	Iluminação (Lux)
Maquinaria (Sala de Geração)	300
Pré-limpeza e Secagem	500
Linha de Processamento	
Armazém de matéria-prima	200
Armazém do produto acabado	
Corredores (Áreas de circulação)	150
Sala de refeições	200
W.C	150

5.12.2. Ventilação

Com a escolha da forma tipo *shed*, que tem a característica de proporcionar uma boa ventilação, a ventilação natural poderá ser aplicada na fábrica e o uso de extractores, extraindo o ar do ambiente contaminado pelos subprodutos do arroz.

5.12.3. Climatização

A climatização auxiliar não será utilizada na fábrica, pois as medidas adoptadas na ventilação escolhidas garantem boas condições para o trabalho laboral.

5.12.4. Acústica

As medidas de protecção contra o ruído na indústria aplicadas na fábrica serão de protecção individual.

CAPÍTULO 6
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

A utilização da casca de arroz como biomassa em instalações de processamento de arroz é uma abordagem promissora e sustentável, de acordo com as abordagens teóricas e cálculos feitos ao longo do projecto.

Neste trabalho foi feita uma apresentação compactada da tecnologia envolvida no processamento de arroz, conforme se apresentou no Capítulo 2. Onde foram mostrados os componentes fundamentais que fazem parte de uma instalação de processamento de arroz e o seu devido funcionamento, o que serviu como base para a escolha da turbina.

Efectuaram-se cálculos para dimensionamento da caldeira que funcione a casca de arroz, que resultaram numa geometria que permite a produção adequada de vapor de acordo com os parâmetros exigidos pela turbina. Também se dimensionou um sistema de secagem artificial, que culminou num secador de 5 toneladas de capacidade, num termopermutador do tipo casco-tubo e numa chaminé de aproximadamente 16.93 metros de altura, conforme os resultados apresentados no Capítulo 5.

De acordo com o Capítulo 4, o projecto é economicamente viável, pois todos os indicadores analisados para a sua viabilidade estão dentro dos limites recomendados.

6.2. Recomendações

Tratando-se de uma unidade de produção, é preciso que se tomem algumas considerações para o funcionamento adequado da mesma, assim como para melhoria da unidade fabril.

Durante a implementação do projecto, recomenda-se:

- O dimensionamento adequado do transportador para os processos de carregamento e descarregamento do arroz no secador, assim como, para alimentação do combustível no queimador; e
- Dimensionamento de um revolvedor para o secador, de modo a garantir uma distribuição igual de ar pelos grãos, o que proporciona uma boa secagem do arroz.

CAPÍTULO 7
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Charas, E. (03 de Julho de 2012). Colhidas 16 mil toneladas de arroz no regadio de Chókwé. Verdade. Consultado a 05 de Abril de 2024. https://verdade.co.mz/colhidas-16-mil-toneladas-de-arroz-no-regadio-de-chokwe/
2. Dos Santos, R.F. (26 de Março de 2020). Secagem do arroz: tudo sobre este processo. aegro. Consultado a 25 de Abril de 2024. https://blog.aegro.com.br/secagem-do-arroz/
3. Eifert, E. D. C. (2009). Secagem, armazenamento e beneficiamento.
4. Da Silva, L. C. (2005). Secagem de graos. Boletim Técnico: AG, 4(05).
5. Costa, L. C. D. (2018). LEVANTAMENTO E ANÁLISE DAS AGROINDÚSTRIAS E DO SETOR DE BENEFICIAMENTO DE ARROZ EM SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA.
6. Eifert, E., Sérgio, R., Silva, Elias, M. & Franco, D. (2021). Beneficiamento. Embrapa. Consultado a 27 de Abril de 2024. https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pos-producao/pos-colheita/beneficiamento
7. Martinelli, L. C. (2003). Geradores de vapor. UNIJUÍ, Panambi RS.
8. STROBEL, C. S. (2015). Caldeiras.
9. Nhambiu, J. P. (2024). Geradores de Vapor.
10. Nunes, O. M. (2017). O uso da casca de arroz como alternativa energética: um estudo de caso no município de Dom Pedrito-RS. Informe Gepec, 21(2), 42-62.
11. HOFFMANN, R., JAHN, S. L., BAVARESCO, M., SARTORI, T. C. Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. Santa Maria.
12. Hoffmann, R., Jahn, S. L., Bavaresco, M., & Sartori, T. C. (2002). Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. In *Congresso Brasileiro de Energia* (pp. 1138-1143).
13. Schneider, L. T. (2017). Casca de arroz como agente adsorvente no tratamento de óleo residual.
14. Heaslip, B. (2007). HEAT EXCHANGERS. Consultado a 23 de Maio de 2024. https://files.engineering.com/download.aspx?folder=5c80ce6d-51a9-4d73-8542-99a073625ef3&file=HeatExchangersDesignNotes.pdf
15. Axsom, T. (2023). Heat Exchanger Material Selection. Fictiv. Consultado a 04 de Junho de 2024. https://www.fictiv.com/articles/heat-exchanger-material-selection

16. Wang, B., Klemeš, J. J., Li, N., Zeng, M., Varbanov, P. S., & Liang, Y. (2021). Heat exchanger network retrofit with heat exchanger and material type selection: A review and a novel method. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *138*, 110479.
17. SD Metals. (2024). Special Stainless Steel. Consultado a 16 de Junho de 2024. https://www.sd-metals.com/en/s-d-materials/special-stainless-steel/aisi-347-1-4546-9/
18. Conselho Executivo Provincial da Zambézia. (01 de Junho de 2023). A província da Zambézia é actualmente a maior contribuinte da produção nacional do arroz com cerca de 55%. https://www.youtube.com/watch?v=c5uOu-JPFZY

ANEXOS

ANEXOS 1.

PÂRAMETROS DA TURBINA SELECIONADA

Tabela A 1. Parâmetros técnicos da turbina.

Parâmetro	**Valor**	**Unidade**
Modelo	NO.15-1.27	
Capacidade	150	kW
Pressão de entrada do vapor	1.27	Mpa
Velocidade	1500	rpm
Temperatura de entrada do vapor	300	℃
Produtividade	1	t/h
Consumo de vapor	6.35	$kg/kW \cdot h$
Pressão de escape	0.05	Mpa
Dimensões	735x432x701	mm
Fabricante	DTEC	

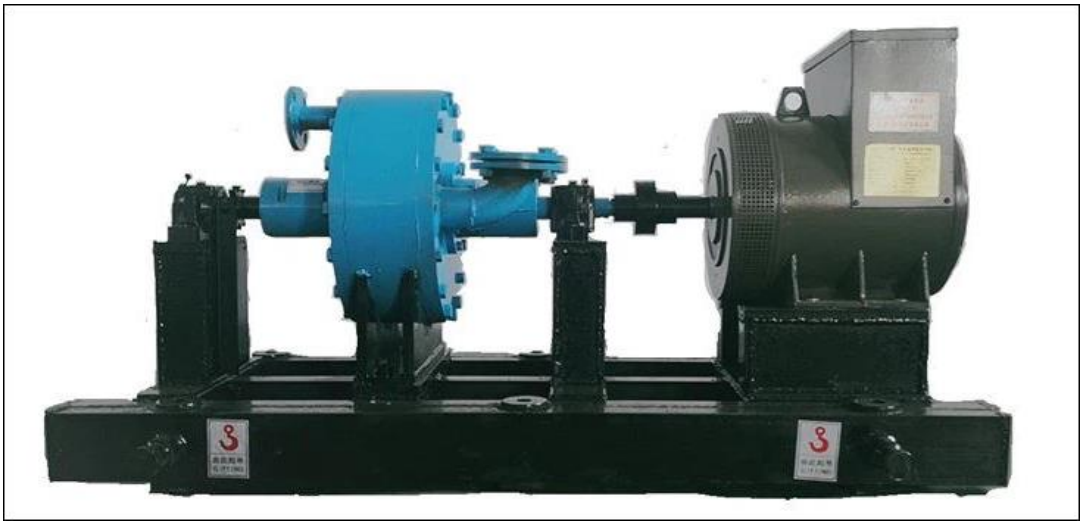


Figura A 1. Turbina a vapor. Fonte: DTEC (2024).

ANEXOS 2.

PARÂMETROS USADOS NO DIMENSIONAMENTO DA CALDEIRA

Tabela A 2. Espessura da camada de radiação efectiva para geometrias standard.

Tipo de Volume de Gás	Comprimento médio do feixe , S
Volume entre dois planos finitos	1,8 x distância entre as placas
Cilindro (comprimento infinito) radiação para a parede	0,95 x diâmetro
Cilindro (diâmetro=altura) radiação para o centro da base	0,71x diâmetro
Cilindro (diâmetro=altura) radiação para toda a superfície	0,60 x diâmetro
Cubo, radiação para qualquer face	0,60 x aresta
Volume envolvendo feixes de tubos infinitos. radiação para um tubo	
Arranjo em triângulo equilátero passo = 2 x diâmetro	3,0 x (passo-diâmetro)
Arranjo em triângulo equilátero passo = 2 x diâmetro	3,5 x (passo-diâmetro)
Arranjo quadrangular	3,8 x (passo-diâmetro)

Tabela A 3. Dimensões usuais de caldeiras flamotubulares (Ata Combustão Técnica S.A.).

Características	Unidade	TIPO DE CALDEIRA ATA				
		02	08	14	18	20
Super Aquecimento	m^2	15,5	31	62	100	124
Produção de Vapor	Kg/h	500	1000	2000	3300	4000
Diâmetro da Fornalha	m	0,4	0,45	0,6	0,7	0,73
Comprimento da Fornalha	m	1,412	2,40	3,20	3,762	4,032
Diâmetro dos Tubos	pol	1,5	2	2,5	2,5	2,5
Número de tubos 1º Trajecto	-	53	50	61	83	96
Número de tubos 2º Trajecto	-	36	32	36	50	58
Comprimento dos tubos	m	1,430	-	-	3,78	4,05

Tabela A 4. Características termofísicas dos produtos de combustão e do ar.

t °C	Produtos de combustão			Ar		
	k x10²W/m²K	ν x10⁶ m²/s	Pr	k x10²W/m²K	ν x10⁶ m²/s	Pr
0	2,28	11,9	0,74	2,44	13,28	0,69
50	2.71	16.35	0.72	2,83	17,95	0,69
100	3,13	20,8	0,70	3,21	23,13	0,69
200	4,01	31,6	0,67	3,93	34,85	0,69
300	4,84	43,9	0,65	4,60	48,33	0,69
400	5,70	57,8	0,64	5,21	63,09	0,7
500	6,56	73,0	0,62	5,74	79,38	0,7
600	7,42	89,4	0,61	6,22	96,89	0,71
700	8,27	107	0,60	6,71	115,4	0,71
800	9,15	126	0,59	7,18	134,8	0,72
900	10,01	146	0,585	7,63	155,1	0,72
1000	10,90	167	0,58	8,07	177,1	0,72
1100	11,75	188	0,57	8,50	199,3	0,72
1200	12,62	223	0,56	9,15	233,7	0,73
1300	13,49	247	0,55			
1400	14,42	273	0,54			
1500	16,35	300	0,53			

ANEXOS 3.

PARÂMETROS USADOS NO DIMENSIONAMENTO DO TERMOPERMUTADOR

Tabela A 5. Diâmetros padronizados dos tubos para trocadores de calor. Fonte: TEMA (2019).

Tube OD, in.	BWG	Wall thickness, in.	ID, in.	Flow area per tube, in.²	Surface per lin ft, ft²		Weight per lin ft, lb steel
					Outside	Inside	
½	12	0.109	0.282	0.0625	0.1309	0.0748	0.493
	14	0.083	0.334	0.0876		0.0874	0.403
	16	0.065	0.370	0.1076		0.0969	0.329
	18	0.049	0.402	0.127		0.1052	0.258
	20	0.035	0.430	0.145		0.1125	0.190
¾	10	0.134	0.482	0.182	0.1963	0.1263	0.965
	11	0.120	0.510	0.204		0.1335	0.884
	12	0.109	0.532	0.223		0.1393	0.817
	13	0.095	0.560	0.247		0.1466	0.727
	14	0.083	0.584	0.268		0.1529	0.647
	15	0.072	0.606	0.289		0.1587	0.571
	16	0.065	0.620	0.302		0.1623	0.520
	17	0.058	0.634	0.314		0.1660	0.469
	18	0.049	0.652	0.334		0.1707	0.401
1	8	0.165	0.670	0.355	0.2618	0.1754	1.61
	9	0.148	0.704	0.389		0.1843	1.47
	10	0.134	0.732	0.421		0.1916	1.36
	11	0.120	0.760	0.455		0.1990	1.23
	12	0.109	0.782	0.479		0.2048	1.14
	13	0.095	0.810	0.515		0.2121	1.00
	14	0.083	0.834	0.546		0.2183	0.890
	15	0.072	0.856	0.576		0.2241	0.781
	16	0.065	0.870	0.594		0.2277	0.710
	17	0.058	0.884	0.613		0.2314	0.639
	18	0.049	0.902	0.639		0.2361	0.545
1¼	8	0.165	0.920	0.665	0.3271	0.2409	2.09
	9	0.148	0.954	0.714		0.2498	1.91
	10	0.134	0.982	0.757		0.2572	1.75
	11	0.120	1.01	0.800		0.2644	1.58
	12	0.109	1.03	0.836		0.2701	1.45
	13	0.095	1.06	0.884		0.2775	1.28
	14	0.083	1.08	0.923		0.2839	1.13
	15	0.072	1.11	0.960		0.2896	0.991
	16	0.065	1.12	0.985		0.2932	0.900
	17	0.058	1.13	1.01		0.2969	0.808
	18	0.049	1.15	1.04		0.3015	0.688
1½	8	0.165	1.17	1.075	0.3925	0.3063	2.57
	9	0.148	1.20	1.14		0.3152	2.34
	10	0.134	1.23	1.19		0.3225	2.14
	11	0.120	1.26	1.25		0.3299	1.98
	12	0.109	1.28	1.29		0.3356	1.77
	13	0.095	1.31	1.35		0.3430	1.56
	14	0.083	1.33	1.40		0.3492	1.37
	15	0.072	1.36	1.44		0.3555	1.20
	16	0.065	1.37	1.47		0.3587	1.09
	17	0.058	1.38	1.50		0.3623	0.978
	18	0.049	1.40	1.54		0.3670	0.831

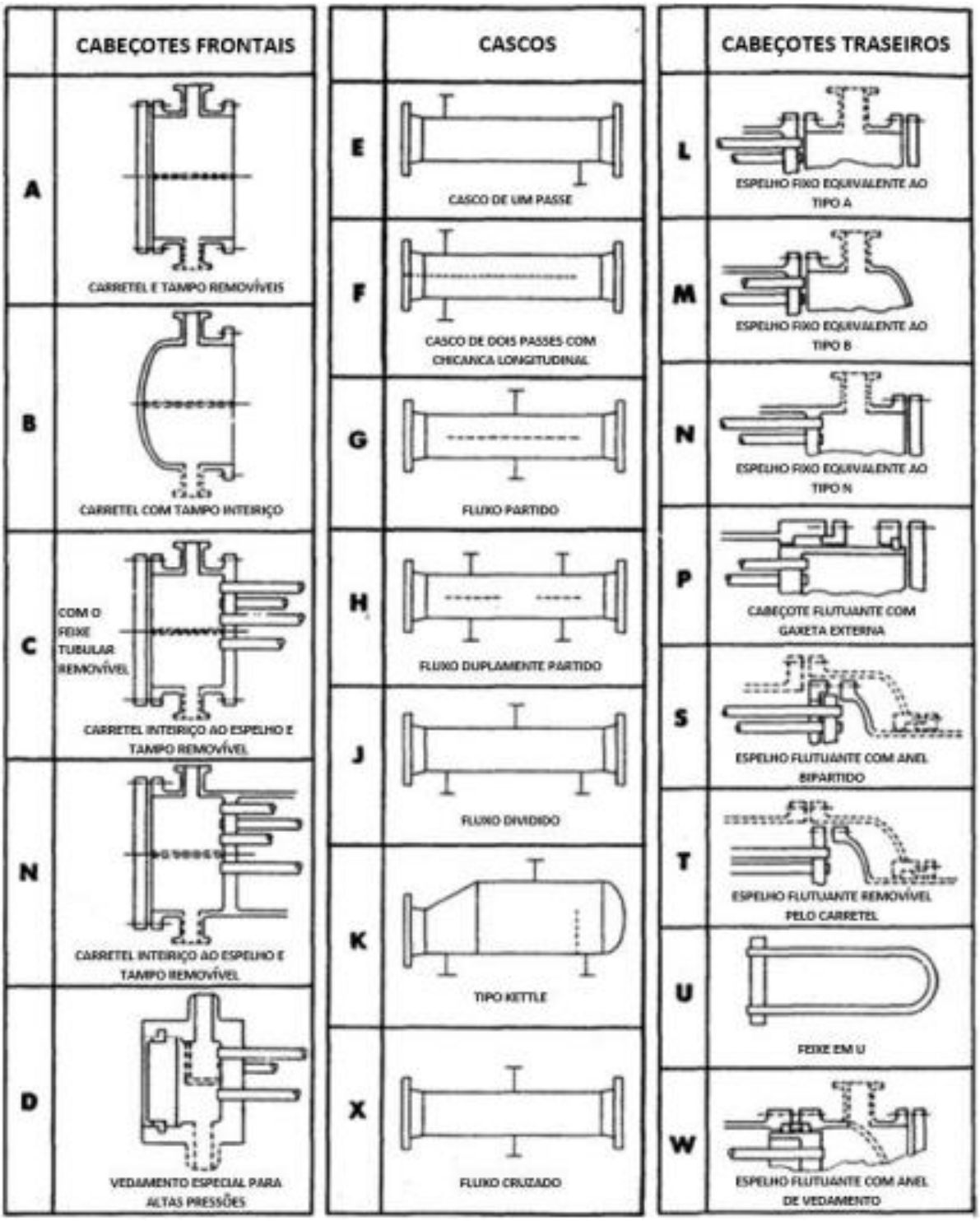


Figura A 2. Tipos de casco e cabeçotes. Fonte: Filho (2023).

ANEXOS 4.

PARÂMETROS USADOS NO DIMENSIONAMENTO DA CHAMINÉ

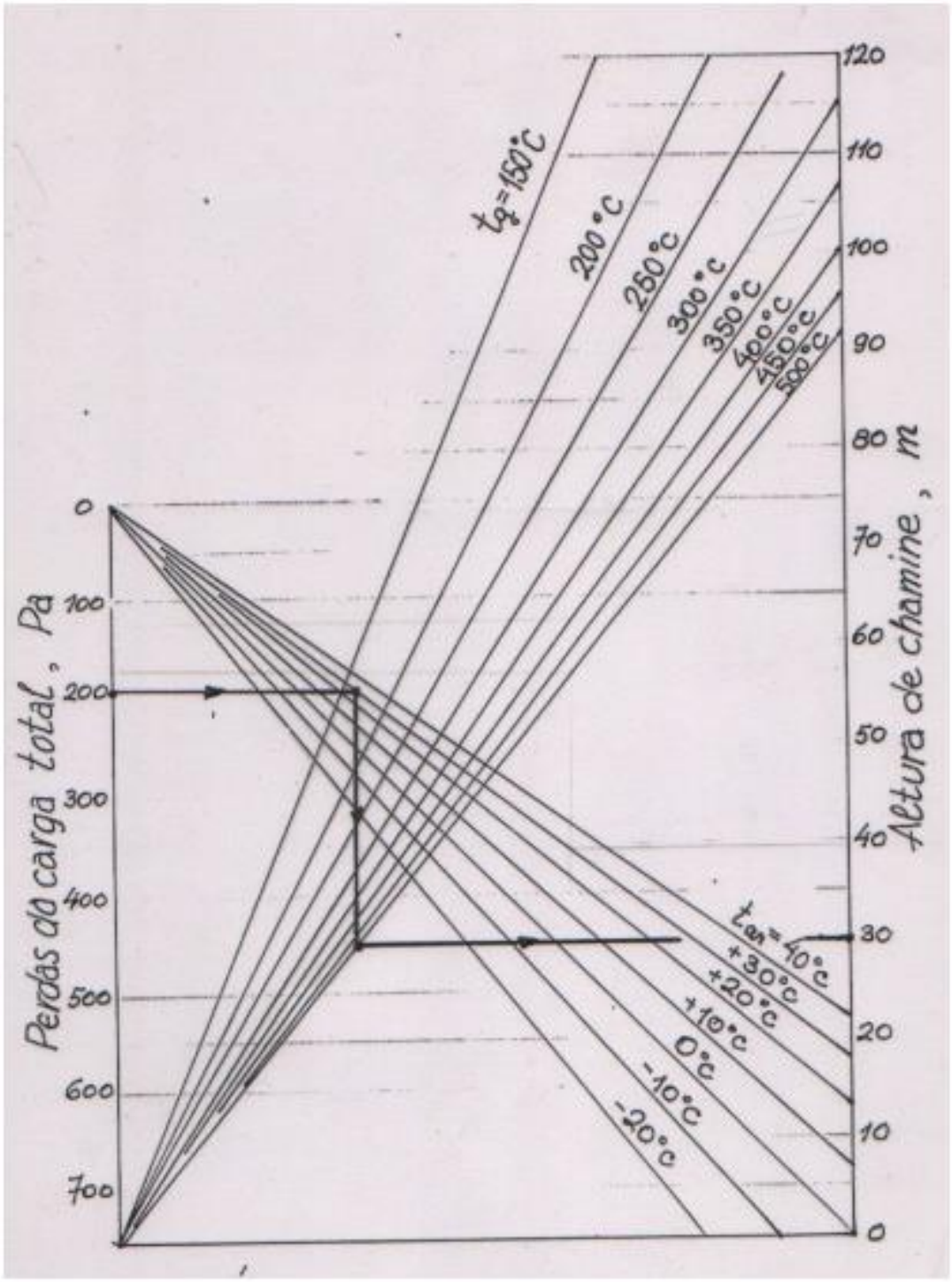


Figura A 3. Altura da Chaminé

ANEXOS 5.

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÓMICA DO PROJECTO

Tabela A 6. Investimento em maquinaria.

INVESTIMENTO EM MAQUINARIAS

Item	Descrição	Quantidade	Valor (USD)	Consideração	Observação
1	Turbina	1	11027.02		Equipamentos Bases Importados
	Máquina de pré-limpeza	1	3206.78		
	Máquina combinada	1	5950.35		
	Empacotadeira	2	9652.9		
	Bomba periférica	1	34.21		
	Ventilador centrífugo	1	500		
	Balança eléctrica industrial	2	200.42		
	Queimador de pelotas de biomassa	1	371.63		
	Silos para armazém	3	3000		
2	Caldeira flamotubular	1	6049.64		Equipamentos Bases de Produção Local
	Termopermutador	1	121		
	Secador	1	1000		
	Condensador	1	119.88		
	Móveis e utensílios	1	1800		
TOTAL		18	**43,033.83**		

Tabela A 7. Depreciação das máquinas.

DEPRECIAÇÃO DAS MÁQUINAS

Item	Descrição	Percentagem (%)	Valor Depreciado (USD/Ano)
1	Turbina	7.4	816.00
	Máquina de pré-limpeza	10	320.68
	Máquina combinada	10	595.04
	Empacotadeira	10	965.29
	Bomba periférica	10	3.42
	Ventilador centrífugo	12.5	62.50
	Balança eléctrica industrial	12.5	25.05
	Queimador de pelotas de biomassa	4.28	15.91
	Silos para armazém	5	150.00
2	Caldeira flamotubular	7.4	447.67
	Termopermutador	7.4	8.95
	Secador	5	50.00
	Condensador	7.4	8.87
	Móveis e utensílios	25	450.00
	TOTAL		**3,919.38**

Tabela A 8. Levantamento total do capital investido.

LEVANTAMENTO TOTAL DO CAPITAL INICIAL INVESTIDO

Item	Descrição	Percentagem (%)	Valor (USD)
1	Equipamento base e outros	100	43033.83
	Frete	10	4303.38
2	Instalação, Montagem e Instrumentação	46	19795.56
3	Água	14	6024.74
4	Instalação Eléctrica	17	7315.75
5	Construções e Serviços	56	24098.94
6	Engenharia	69	29693.34
7	Despesas com contractos	26	11188.80
8	Contingências	49	21086.58
9	Capital Circulante	70	30123.68
	Construção da Instalação	-	107306.30
Capital Total de Investimento			**303,970.90**

Tabela A 9. Custos Operacionais.

CUSTOS OPERACIONAIS

Item	Descrição	Valor (USD/Ano)	Observação
1	Matéria-prima	2019888.00	Custos Variáveis
2	Mão-de-obra Directa	282784.32	
3	Manutenção e Reparação		
4	Depreciação da Maquinaria	3919.38	Custos Fixos
5	Taxas Locais	46457.42	
6	Seguros		
7	Custos Administrativos	80795.52	Despesas Gerais da Instalação
8	Custo de Financiamento		
9	Custos de Distribuição e Vendas		
Custos Totais Operacionais		**2433844.64**	

Tabela A 10. Fluxos de caixa.

FLUXO DE CAIXAS

	Tempo (Anos)					
Caixas	0	1	2	3	4	5
Capital Total Investido	-303970.9031					
Vendas		2625854.40	2625854.40	2625854.40	2625854.40	2625854.40
Custos Operacionais		-2433844.64	-2433844.64	-2433844.64	-2433844.64	-2433844.64
Lucro Líquido	-303970.9031	192009.7558	192009.7558	192009.7558	192009.7558	192009.7558

ANEXOS 6.
RESULTADOS DO CÁLCULO ESTEQUIOMÉRICO

Tabela A 11. Resultados do cálculo estequiométrico.

CÁLCULO ESTEQUIOMÉTRICO		
Produtividade	1000	kg/h
Temperatura final do vapor	300	◦C
Pressão final	16.00	bar
Temperatura dos gases de escape	350	◦C
Temperatura exterior	18	◦C
Temperatura do combustível	0	◦C
Ro comb	0	kg/m³
Cp Combustível	1.35	kJ/kgK
Cp ar	1.304	kJ/m³K
Temperatura do ar	200	◦C
Massa	**Seca**	**Trabalho**
Carbono	37.00	33.3
Hidrogénio	8.00	7.2
Nitrogénio	11.00	9.9
Oxigénio	34.85	31.4
Enxofre	0.15	0
Cinzas	9.00	8.1
Humidade		10
Total	**100**	**100**
Coeficiente de excesso de ar	**1.4**	
Poder Calorifico Inferior	15058.6292	kJ/Kg
Poder Calorífico Superior	16937.755	kJ/Kg
Volume de ar (Var)	**3.848**	m³/kg
V_{RO} (gases biatómicos)	3.119	m³/kg
V_{H20} (água)	0.992	m³/kg
V_{RO2} (gases Triatómicos)	0.623	m³/kg
V_{RO} (real)	4.335	m³/kg
V_{H20} (real)	1.016	m³/kg
V_{RO2} (real)	0.623	m³/kg
V_{O2} (oxigénio excedente)	0.323	m³/kg

Volume dos gases de combustão	**6.297**	m³/kg
Fracção dos gases biatómicos (r_{RN2})	0.688	m³/m³
Fracção de água r_{H2O}	0.161	m³/m³
Fracção dos gases triatómicos r_{C02}	0.099	m³/m³
Fracção de oxigénio r_{O2}	0.051	m³/m³
∑	1	
Entalpia Vg	2391.338	kJ/m³
Entalpia do ar I_{ar}	223.102	kJ/m³
Entalpia do combustível	0.000	kJ/m³
Entalpia total dos gases de combustão	**2614.441**	kJ/m³
Temperatura dos gases de combustão	**1609.51**	◦C
Entalpia de nitrogénio	1605.862	kJ/m³
Entalpia da água	492.212	kJ/m³
Entalpia de CO_2	389.604	kJ/m³
Entalpia de O_2	126.667	kJ/m³
Entalpia dos Gases	**2614.345**	kJ/m³

ANEXOS 7.

RESULTADOS DO CÁLCULO DA FORNALHA DA CALDEIRA FLAMOTUBULAR

Tabela A 12. Resultados do cálculo da caldeira.

CÁLCULO DA FORNALHA DA CALDEIRA FLAMOTUBULAR

	Descrição	Símbolo	Fórmula/Valor	Unidade
1.1	Condição de cálculo de q_2	A	37.647	
	Perdas associadas ao combustível nas cinzas volantes	Pcv	0.000	%
	Perdas associadas ao combustível nas cinzas de fundo	Pcf	0.000	%
	Perda de calor com as cinzas	**q_2**	**0.000**	%
1.2	constante que depende do combustível utilizado	k1	0.019	kg/kJ
	Percentagem máxima de CO_2 teórica nas condições estequiométricas	CO2t	13.828	%
	% em volume de CO_2 presente nos gases de combustão	CO2	10.448	%
	Temperatura do Vapor	Tv	300.000	ºC
	Temperatura dos gases de combustão á saída da caldeira	Tg	350.000	ºC
	Temperatura do ar ambiente	Ta	18.000	ºC
	Perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustível	Pgc	0.608	%
	Perdas associadas à entalpia do vapor de água nos gases de combustão	Pagua	3.741	%
	Perdas com gases efluentes ou escape	**q_3**	**4.350**	**%**
1.3	**Perdas de calor associadas à combustão incompleta mecânica**	**q_4**	**5.000**	%
1.4	**Perdas de calor associadas à combustão incompleta química**	**q_5**	**0.000**	%
1.5	**Perdas de calor ao meio ambiente**	**q_6**	**2.000**	%
1.6	Temperatura da água de alimentação	Tagua	125.000	ºC
	Percentagem das purgas	p	3.000	%
	Temperatura das Purgas	Tp	50.000	ºC
	Somatório de todas as outras perdas anteriores	EP	11.350	%
	Perdas associadas às purgas	**q7**	**0.000**	%
1	**Perda Total**	**q total**	**11.350**	%
2	Rendimento do gerador	nv	88.650	%
3	Cálculo Estequiométrico		Cal. das Entalpias	
4	Temperatura do ar quente(pré-aquecido)	Tar	25.000	◦C
5	Entalpia do ar quente	Iar	223.102	kJ/m³
6	Calor trazido para a fornalha pelo ar	Qai		kJ/kg
7	Calor trazido para a fornalha por unidade de combustível	Qf=Qdisp	16463.540	kJ/kg
8	Temperatura adiabática	Tad	1882.660	K
9	Temperatura de saída dos gases	Tsai	1273.150	K
10	Entalpia dos gases a saída da fornalha	Isai	2614.345	kJ/kg
11	C/ específico médio dos prod. do combustível	ṼĈp	22.722	kJ/kg˚C
12	Fracção volúmica do vapor de água	rH2O	0.161	m³/m³
13	Fracção volúmica dos gases triatómicos	rRO2	0.051	m³/m³
14	Frac. vol/ somatória dos gases triatómicos	r	0.213	m³/m³
15	Pressão na fornalha	P	0.100	Mpa
16	Coef. de absorção radiante dos gases triatómicos	Ky	Intem nº 21	1/(m.Mpa)
17		dh	20.000	µm

	Coef. de absorção radiante das partículas de cinza	Kh	6.921	1/(m.Mpa)
18	Emissividade da parte não luminosa	anl		
19	Emissividade da parte luminosa	al		
	Diâmetro da fornalha	Df	0.600	m
20	Tamanho efectivo do feixe de radiação	S	0.420	m
21	O coeficiente de absorção radiante devido aos gases triatómicos	ky	15.609	1/(m.Mpa)
	Concentração de partículas de cinzas na fornalha	Uh	8.100	%
		c1	0.500	%
		c2	0.030	%
	Coeficiente de absorção radiante na fornalha	k	59.529	1/(m.Mpa)
	Emissividade da chama	**εch**	**0.918**	
22	Coeficiente de deposição na fornalha	ξ	0.500	
23	Eficiência térmica da parede de água	Ψ	0.500	
24	Emissividade da fornalha	εf	0.957	
25	Coeficiente de conservação de calor na fornalha	ϕ	0.978	
26	Entalpia da água no estado de vapor saturado	Ivv	1975.950	kJ/kg
	Entalpia da água de alimentação	Iaa	524.830	kJ/kg
	Calor físico do ar	Qf,ar	1404.911	kJ/kg
	Calor disponível	Qdisp	16463.540	kJ/kg
	Consumo de combustível	**B**	**0.028**	kg/s
	Consumo de combustível em vazio	**B_{vazio}**	**0.0056**	kg/s
27	Calor absorvido na fornalha	q	374.052	kJ/kg
28	Constante de Stefan-Boltzmann	σ	0.000	kW/m^2K^4
	Comprimento da fornalha	Lf	3.200	m
	Área da Fornalha	**A**	**2.399**	m^2
29	**Diâmetro da fornalha**	**Df**	**0.600**	m
	Comprimento da fornalha corrigido	$L_{f,corrig}$	1.273	m
30	Número de Konakov	Ko	1.352	
	Comprovar a temperatura de saída da fornalha	$T_{sai,corrig}$	1273.150	K
	Condição de aceitação da Tsai assumida | Tsai - $T_{sai,corrig}$ |≤100K		0.000	K
	Volume da fornalha	$V_{fornalha}$	3.054	m^3
31	Calor liberto por unidade de volume na fornalha	qv	148.892	kW/m^3
	Calor liberto por unidade de área da fornalha	**qF**	**189.518**	kW/m^2
33	Diâmetro dos tubos	d,tubos	0.064	m
	Secção de passagem dos gases	Ag	0.283	m^2
	Temperatura da Chama	Tch	1548.195	K
	Temperatura média dos gases na fornalha	t	1410.673	K
	Viscosidade cinemática a temperatura t	Vg	0.0002	m^2/s
	Velocidade dos gases na fornalha	**wg**	**3.17852**	m/s
34	Número de Reynolds	Re	11419.836	
35	Número de Prandtl	Pr	0.565	
36	Comprimento da fornalha	Lf	3.200	m
	Condutividade térmica à temperatura média (t) do fluxo do gás	k_g	0.000	kW/mK
	Coeficiente de transferência de calor por convecção	**hconv**	**0.007**	kW/m^2K
37	Temperatura de saturação do vapor	Tvs	204.000	˚C
	Δtexcess	Δtexcess	22.500	˚C
	Temperatura da parede da fornalha	**Tpa**	**1306.000**	K
38	Temperatura da Chama	Tch	1548.195	K
39	Calor transferido por radiação na fornalha	Qr	369.285	kW
40	Calor transferido por convecção na fornalha	Qconv	3.807	kW
41	Parcela transferida por radiação na fornalha	%Qr	99%	%
42	Parcela de transferida por convecção na fornalha	%Qconv	1%	%
43	Soma das parcelas	% Total	100%	%

ANEXOS 8.
RESULDADOS DO CÁLCULO DOS TUBOS DE CONVECÇÃO

Tabela A 13. Resultados do cálculo dos tubos de convecção.

CÁLCULO DOS TUBOS DE CONVECÇÃO

Intem n^{O}	**Parâmetro**	**Símbolo**	**Fórmula & Valor**	**Unid.**
1	Temperatura dos gases na entrada dos tubos de convecção	$T_{ent}^{conv1}=T_{sai}^{f}$	1273.150	K
2	Entalpia dos gases na entrada dos tubos de convecção	$I_{en}^{conv1}=I_{sai}^{f}$	2614.345	kJ/kg
3	Temperatura dos gases na saída dos tubos de convecção	$T_{sai}^{conv1}=T_{vapor}+50$	623.150	K
4	Entalpia dos gases na saída dos tubos de convecção	I_{sai}^{conv1}	348.342	kJ/kg
5	Coeficiente de retenção de calor	Φ	0.970	-
6	Calor fornecido ao fluido motor do balanço térmico	Q_{conv1}	60.706	kJ/kg
7	Temperatura de saturação da água	T_{sat}	474.412	K
8	Temperatura de entrada da água	$T_{ent,H20}$	367.150	K
	Temperatura de saída da água	$T_{sai,H20}$	573.150	K
		Δtmax	700.000	^{O}C
		Δtmin	256.000	^{O}C
	Temperatura logarítmica	ΔT_{lm}	441.394	^{O}C
9	Diâmetro dos tubos	d,tubos	0.064	m
	Secção de escoamento de cada tubo	$\mathbf{A_T}$	**0.003**	m^2
10	Temperatura média dos gases	t	948.150	K
11	**Número de tubos assumido**	**N**	**14.000**	Unid.
	Velocidade dos gases no interior dos tubos	$\mathbf{w_g}$	**6.342**	m/s
12	Viscosidade cinemática a temperatura t	Vg	0.0002	m²/s
	Número de Reynolds	Re	2411.555	-
13	Número de Prandtl	Pr	0.565	-
14	Condutividade térmica à temperatura média (t) do fluxo do gás	k_g	0.000	kW/mK
	Factor de correcção devido a influência da região de entrada	C_c	1.258	
	Coeficiente de transferência de calor por convecção no interior do tubo	$\mathbf{h_{conv}}$	**0.022**	kW/m^2K
16	Temperatura da parede poluída	$t_p=T_{pa}$	1065.000	K
17	emissividade das cinzas depositadas na superfície interna dos tubos	ε_{cinz}	0.800	-
	Emissividade do gás de combustão à temperatura Tg	ε_g	0.918	-
	Constante de Stefan-Boltzmann	σ	0.000	kW/m^2K^4

	Temperatura dos gases de combustão	Tg	1273.150	K
	Razão Tg/Tpa	Tg/Tpa	1.195	-
	Coeficiente da troca de calor por radiação	**h_{rad}**	**0.892**	kW/m^{2}K
21	Pressão nos tubos de convecção	P	0.100	Mpa
22	Coeficiente de absorção radiante dos gases triatómicos	k_y	15.609	1/(m.Mpa)
23	Coeficiente de absorção radiante das partículas de cinza	k_c		1/(m.Mpa)
24	Emissividade da parte não luminosa	a_{nl}		-
25	Emissividade da parte luminosa	a_l		-
26	Tamanho efectivo do feixe de radiação	S	0.038	m
27	Emissividade da chama	ε_{ch}	0.918	-
28	Coeficiente de deposição nos tubos de convecção	ξ	0.500	-
29	Eficiência térmica da parede dos tubos de convecção	Ψ	0.500	-
30	Emissividade dos tubos de convecção	ε_f	0.030	-
31	Coeficiente combinado de transferência de calor dos gases no interior dos tubos	h_1	0.914	kW/m^{2}K
32	Factor de correcção do diâmetro do tubo	C_d	3.100	-
		C_{R30}	1.900	-
		ε_O	0.126	
		$\Delta\varepsilon$	0.010	-
	Coeficiente de deposição de cinzas	ε	7.421	m^2°C/kW
	Coeficiente global da transferência de calor	**U**	**0.117**	kW/m^{2}K
33	Cálculo da área de transferência de calor	A_{tc}	8.77	m^2
34	Cálculo do número de tubos	N_t	13.741	
35	Verificação do erro dos cálculos	Erro	0.019	%
36	Temperatura da Chama	T_{ch}	1273.150	K
37	Calor transferido por radiação nos tubos de convecção	Q_r	20.007	kW
38	Calor transferido por convecção nos tubos de convecção	Q_{conv}	40.981	kW
39	Parcela transferida por radiação nos tubos de convecção	$\%Q_r$	33%	
40	Parcela transferida por convecção nos tubos de convecção	$\%Q_{con}$	68%	
	Soma das parcelas	% Toatal	100%	

ANEXOS 9.
RESULTADOS DO CÁLCULO DO LEITO DO SECADOR

Tabela A 14. Resultados do cálculo do leito secador.

CÁLCULO DO LEITO DO SECADOR

Intem n^{O}	**Parâmetro**	**Símbolo**	**Fórmula & Valor**	**Unid.**
0	Massa específica do arroz	dens.	570	kg/m^3
	Quantidade de processamento por dia	Quant.	15.000	t(toneladas)
	Quantidade de arroz em cada secador	Q_{sec}	5000.000	kg
1	**Volume do secador**	V_{sec}	**8.772**	m^3
2	**Largura e comprimento do leito**	D_{sec}	**2.411**	m
	Área da base	A_{base}	**5.813**	m^2
3	**Altura do leito**	L_{sec}	**1.509**	m

ANEXOS 10.
RESULTADOS DO CÁLCULO DO TERMOPERMUTADOR

Tabela A 15. Resultados do cálculo do termopermutador.

CÁLCULO DO TERMOPERMUTADOR				
Intem n^{O}	**Parâmetro**	**Símbolo**	**Fórmula & Valor**	**Unid.**
1	**Temperatura dos gases na entrada do termopermutador**	$\mathbf{T_{g,ent}^{term}=T_{sai}^{tubos}}$	**623.150**	K
	Entalpia dos gases na entrada do termopermutador	$I_{g,en}^{term}=I_{sai}^{tubos}$	348.342	kJ/kg
	Calor específico dos gases a entrada	C_{gas}	0.559	kJ/kg.K
	Fluxo mássico dos gases na entrada do termopermutador	m_{gases}		
2	Temperatura dos gases na saída do termopermutador	$T_{g,sai}^{term}$	**403.150**	K
	Entalpia dos gases na saída do termopermutador	$I_{g,sai}^{term}$	235.620	kJ/kg
3	**Temperatura do ar na entrada do termopermutador**	$\mathbf{T_{ar,ent}^{term}}$	**293.150**	K
	Temperatura do ar na saída do termopermutador	$\mathbf{T_{ar,sai}^{term}}$	**333.150**	K
	Calor específico do ar a $T_{ar,ent}^{term}$	$\mathbf{C_{p,ar}}$	**1.005**	kJ/kg.K
4	Fluxo mássico do ar na entrado do secador	m_{ar}	1.500	m^3 de ar/(min*m^3 de grão)
	Volume do secador	V_{sec}	8.772	m^3
	Massa específica do ar a temperatura de entrada	p	1.225	kg/m^3
	Vazão mássica do ar em [kg/s]	$\mathbf{m_{ar}}$	**0.269**	kg/s
5	Calor transferido	Q	10.799	kW
6	Coeficiente global de transferência de calor	U	0.040	$kW/m^2.K$
		Δtmax	290.000	K
		Δtmin	110.000	K
7	Temperatura logarítmica	ΔT_{lm}	34.662	^{o}C
8	Área de transferência de calor	A_i	7.789	m^2
9	Diâmetro do tubo	D_i	0.0381	m
10	Comprimentos dos tubos	$L_{tubos,term}$	1.5	m
11	Número de tubos	N_{tubos}	43.384	Unid.

ANEXOS 11.
RESULTADOS DO CÁLCULO DO CONDENSADOR

Tabela A 16. Resultados do cálculo do condensador.

CÁLCULO DO CONDENSADOR				
Intem nº	**Parâmetro**	**Símbolo**	**Fórmula & Valor**	**Unid.**
1	Temperatura de entrada do vapor no condensador	$T_{v,ent}^{cond}$	120.00	ºC
	Temperatura de saída do vapor no condensador	$T_{v,sai}^{cond}$	94.00	
	Temperatura de entrada da água no condensador	$T_{ag,ent}^{cond}$	25.00	
	Temperatura de saída da água no condensador	$T_{ag,sai}^{cond}$	59.00	
	Temperatura superficial ou média da água	$T_{med,ag}$	42.00	
1.1	Produtividade/ fluxo de vapor requerido na entrada	G	0.28	kg/s
	Consumo de vapor	B_{vapor}	6.35	kg/kWh
	Potência gerada na turbina	P_{turb}	150.00	kW
	Taxa de condensação de vapor	m_v	0.01	kg/s
2		Δt_{min}	61.00	ºC
		Δt_{max}	69.00	
	Temperatura média logarítmica	ΔT_{lm}	64.92	
3	Calor latente de vaporização a entrada do condensador	$h_{fl,vapor}$	2202.10	kJ/kg
	Taxa de transferência de calor	$\mathbf{Q^{cond}}$	**29.06**	kW
4	Calor específico da água a $T_{med,ag}$	$c_{p,água}$	4.22	kJ/kgK
	Vazão mássica da água	$m_{água}$	0.20	kg/s
5	Diâmetro interno do tubo	$d_{in,tubo}$	0.04	m
	Secção transversal da tubulação	A_{tubo}	0.001	m^2
	Densidade da água a $T_{med,ag}$	$p_{água}$	985.20	kg/m^3
	Velocidade média da água	$\mathbf{V_{m,ag}}$	**0.21**	**m/s**
6	Viscosidade dinâmica da água	*u*	0.00	kg/ms
	Viscosidade cinemática da água	v_{agua}	0.00	m^2/s
	Número de Reynolds	Re	11712.86	
7	Número Prandtl	Pr	4.12	
	Número de Nusselt	Nu	63.24	
8	Condutividade térmica	k	0.63	W/mK
	Coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície interna do tubo	**hi**	**1127.45**	W/m^2K
9	Temperatura de saturação da água	T_{sat}	100.00	ºC
	Temperatura do filme ou superficial do tubo	T_{sup}	71.00	ºC

	Calor específico da água á T_{sup}	c_{pl}	4.19	kJ/kg.K
	Calor latente de vaporização modificado	h_{fg}*	2284.73	kJ/kg
10	Diâmetro externo do tubo	$d_{ex,tubo}$	0.03	m
	Aceleração de gravidade	g	9.80	m/s^2
	Densidade da água (líquido) a temperatura do filme T_{sup}	p_1	977.50	kg/m^3
	Densidade do vapor a temperatura do filme T_{sup}	p_2	0.20	
	Condutividade térmica a temperatura do filme T_{sup}	k_1	0.66	W/mK
	Viscosidade dinâmica da água a temperatura do filme T_{sup}	μ_1	0.00	kg/ms
	Coeficiente médio de transferência de calor por condensação em película na superfície externa do tubo horizontal	**h_o**	**1641.05**	**W/m^2K**
11	Coeficiente global de transferência de calor	U	0.67	kW/m^2K
12	Área de transferência de calor	A_s	0.67	m^2
13	Comprimento do tubo	L_{tubo}	7.46	m
14	Diâmetro do tubo	Dt	0.028575	m
15	Comprimento dos tubos	L_{tubo}	0.8	m
16	Área longitudinal do tubo	A_{long}	0.07181469	m^2
17	Número de tubos	Nt	9.325587215	-

ANEXOS 12.
RESULTADOS DO CÁLCULO DO CHAMINÉ

Tabela A 17. Resultados do cálculo da chaminé.

CÁLCULO DO CHAMINÉ				
Intem n^{O}	**Parâmetro**	**Símbolo**	**Fórmula & Valor**	**Unid.**
0	Temperatura dos gases na base da chaminé	$t_{g,ent}^{ch}$	130.150	^{o}C
	Consumo de combustível	B_c	0.028	kg/s
	Volume dos gases	V_{gNorm}	6.297	m^3/kg
	Pressão barométrica	P_B	105000.000	Pa
1	Fluxo volumétrico dos gases que passam pela chaminé	V_g^{ch}	0.247	m^3/s
2	Velocidade dos gases a saída da chaminé	$C_{gas,sai}$	10.000	m/s
	Diâmetro da boca	d_{boca}	0.897	m
3	Diâmetro da base da chaminé	d_{base}	0.897	m
4	Diâmetro médio da chaminé	$d_{méd}$	0.897	m
5	Velocidade dos gases na boca da chaminé	$c_{gas,base}$	5.978	m/s
6	Velocidade média dos gases na chaminé	$c_{méd}$	7.989	m/s
7	Coeficiente de resistência na curva	ζ_{curva}	0.400	
	Coeficiente de resistência na válvula	$\zeta_{válvula}$	1.750	
	Velocidades óptimas para escoamentos	c	16.000	m/s
	Densidade do gás	$\rho_{gás}$	1.300	kg/m^3
	Perdas locais	ΔP_L	357.760	Pa
8	Perdas de pressão ao longo da conduta	ΔP_{at}	0.000	Pa
	Perdas Totais	ΔP_{total}	357.760	
9	Perdas/coeficiente de segurança	ΔP_{total}	429.312	Pa
10	Altura da chaminé	H	16.93	m
11	a queda média de temperatura por metro de altura da chaminé	Δt	3.000	^{o}C
	Temperatura dos gases na saída da chaminé	$t_{g,boca}$	69.47	

ANEXOS 13.
EQUIPAMENTOS SELECIONADOS PARA A INSTALAÇÃO

Tabela A 18. Parâmetros técnicos da máquina de pré-limpeza de arroz.

Característica	Valor
Modelo/Marca	MGCZ46 15 2 / BC
Potência do motor	3 kW
Capacidade de produção	4-6 t/h
Dimensões	2120x1680x2140 mm
Fabricante	Wuhan Qing Hao Yun Fei Technology Co., Ltd.

Figura A 4. Máquina de limpeza de grãos de arroz. Fonte: alibaba.com.

Tabela A 19. Dados técnicos da máquina combinada de processamento de arroz.

Característica	Valor
Modelo	-
Potência do motor	79.07 kW
Capacidade	30-40 t/h
Dimensões	6000*3400*3180 (mm)
Fabricante	Burt Machinery

Figura A 5. Máquina combinada de processamento de arroz. Fonte: burtmachinery.com

Tabela 7.1. Especificação técnica do ventilador.

Característica	**Valor**
Modelo	6.8A
Potência do motor	7.5-15 kW
Fluxo do ar	770-6050 m^3/h
Fabricante	Shandong Hanqi Industrial Co., Ltd.

Figura A 6. Ventilador centrífugo. Fonte: Alibaba.com

Tabela A 20. Descrição técnica da bomba periférica. Fonte: centraleletrica.com.br

Característica	Valor
Marca (fabricante)	FOXLUX
Modelo	1/2 CV
Potência	2.1 kW
Vazão máxima	3 m^3/h de água
Altura manométrica	30 mca

Figura 7.1. Bomba de água periférica. Fonte: centraleletrica.com.br

Tabela A 21. Parâmetros técnicos do queimador de pelotas de biomassa.

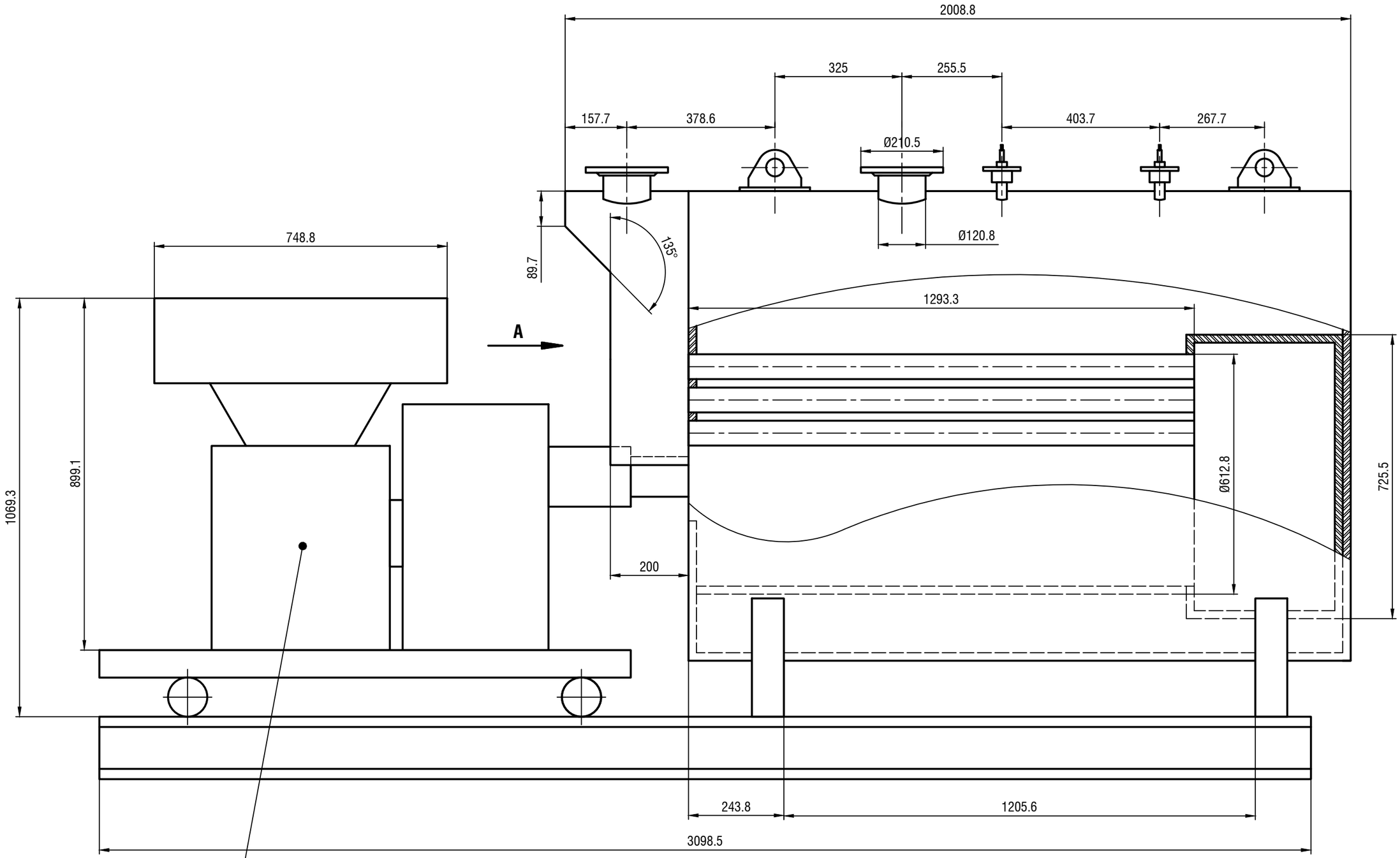
Característica	**Valor**
Modelo	GV-30 G
Consumo de combustível	104 kg/h
Consumo de energia	1.9 kW
Potência de saída	$30x10^4$ kcal ou 348.67 kWh
Fabricante	Green Vinci Biomass Energy Co., Ltd.
Tamanho da biomassa	Não superior a 5 cm

Figura A 7. Queimador de pelotas de biogás. Fonte: Alibaba.com.

Tabela A 22. Parâmetros técnicos do transportador para carga. Adaptado: Demakine (2024)

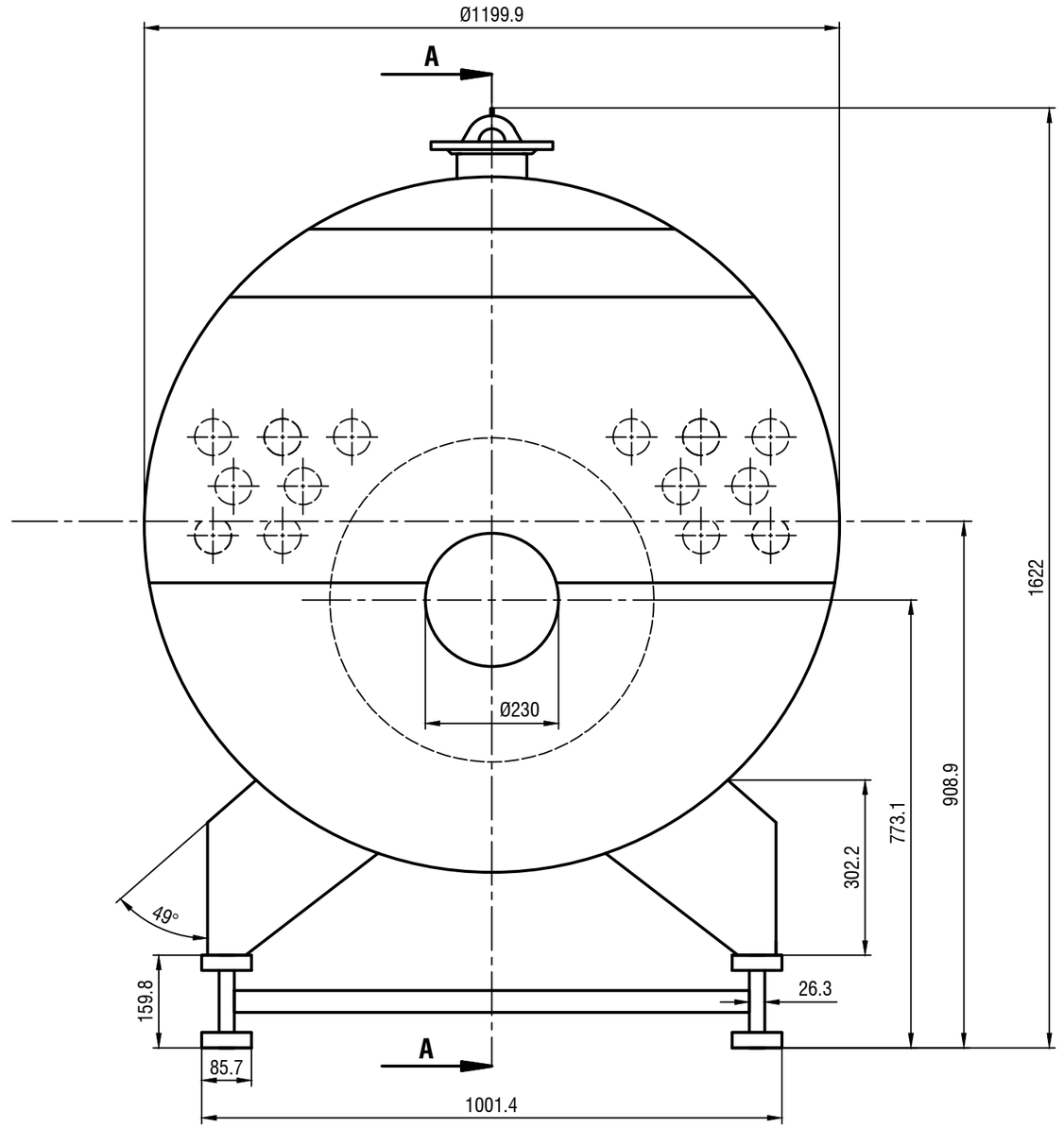
Característica	Valor
Modelo	RTC8
Comprimento	8 m
Diâmetro da helicóide	12”
Altura máxima	5.5 m
Altura mínima	2.0 m
Capacidade produtiva	70 a 75 t/h
Capacidade do motor	100/220V
Material	Aço Inox
Fabricante	Demakine

Figura A 8. Transportador de carga de Parafuso Sem Fim. Fonte: demakine.com.br.



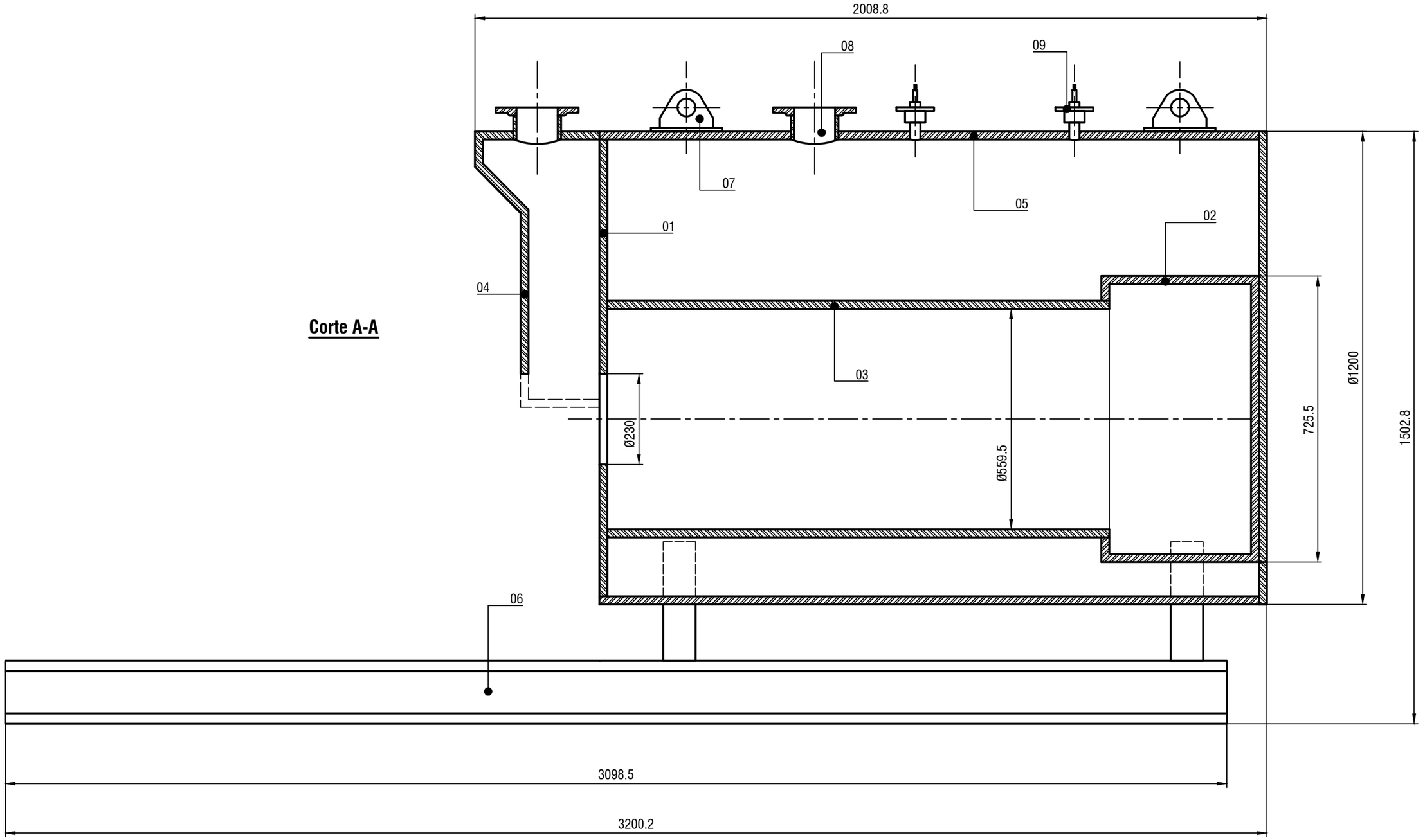
Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A14(1)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:100			CALDEIRA FLAMOTUBULAR	UEM-FE-LE-MEC

Vista A



Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A14(2)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:100	CALDEIRA FLAMOTUBULAR			UEM-FE-LE-MEC

Corte A-A

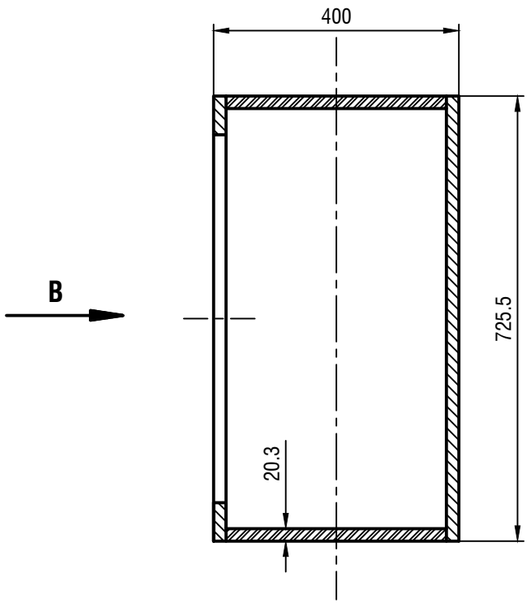


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A14(3)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:100	CALDEIRA FLAMOTUBULAR			UEM-FE-LE-MEC

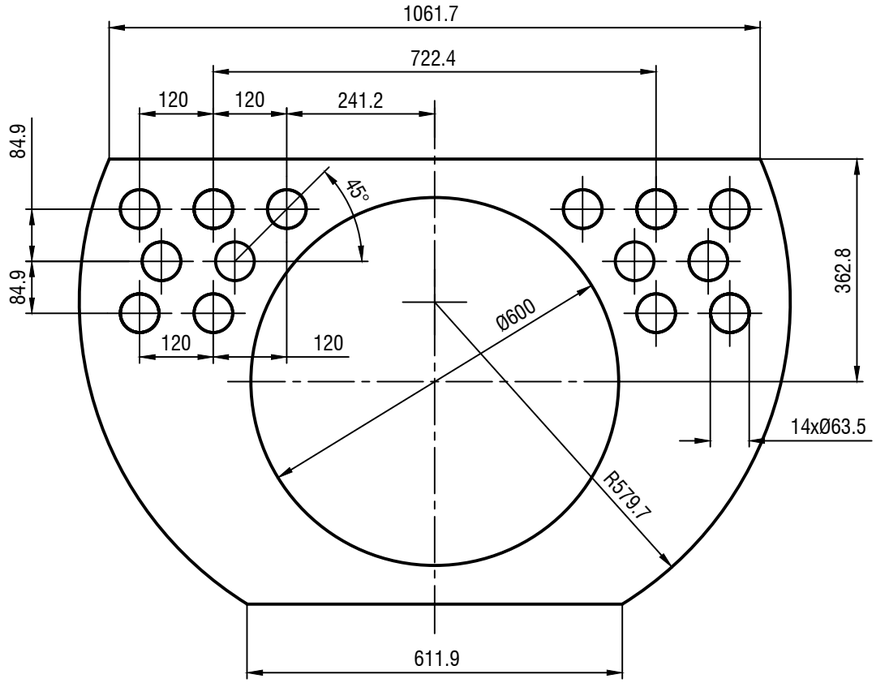
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	09	Válvula	2	
	08	Bocal	2	
	07	Pina de Içamento	2	
	06	Suporte	1	
A3	05	Casco da Caldeira	1	
A3	04	Cabeçote	1	
A3	03	Fornalha	1	
A3	02	Camâra de Reversação	1	
A3	01	Espelho	1	
FOLHA	REF.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	OBSERV./MODELO

Desenhou	Data	Apelido	DEMA-TL-A14(4)
Júlio N.	25.06	Sadala	
Verificou	Data	Apelido	
Jorge P.		Nhambiu	
1:1	LISTA DE COMPONENTES DA CALDEIRA FLAMOTUBULAR		UEM-FE-LE-MEC

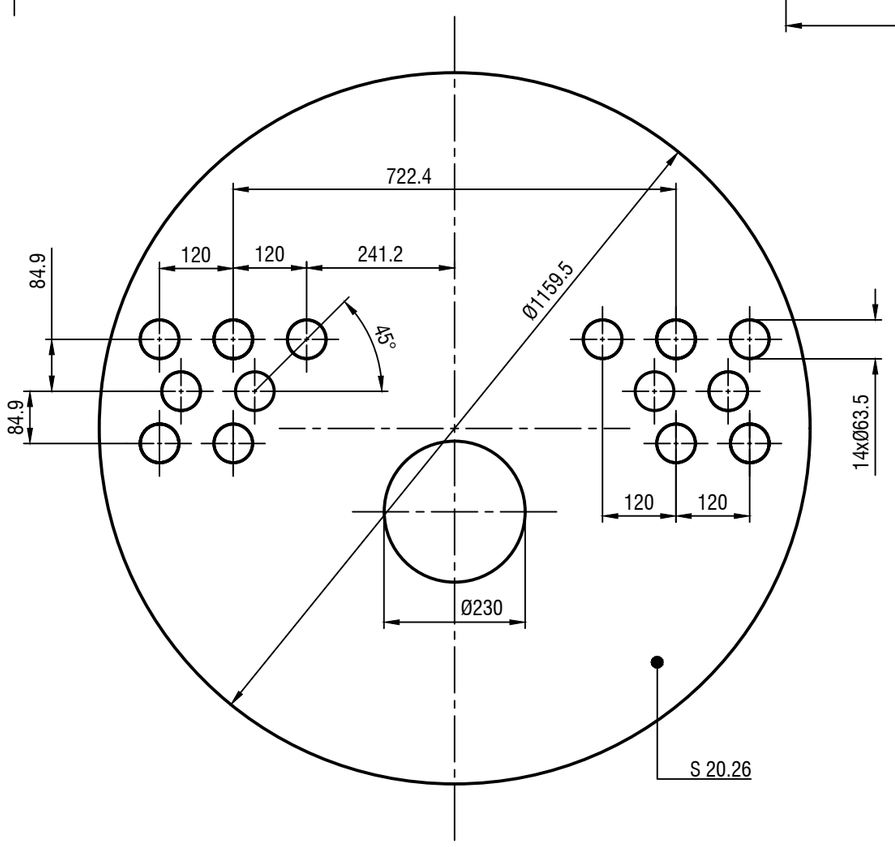
02. Camâra de Reversão



Vista B

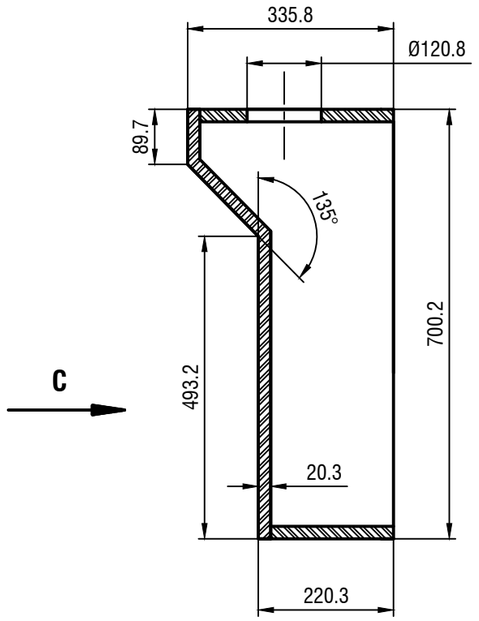


01. Espelho

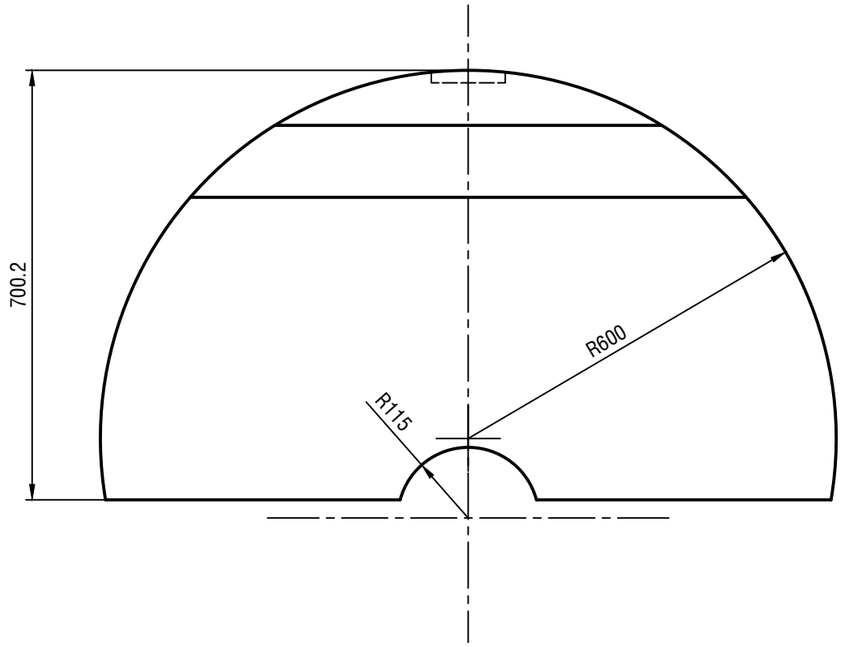


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A14(5)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:100	CALDEIRA FLAMOTUBULAR			UEM-FE-LE-MEC

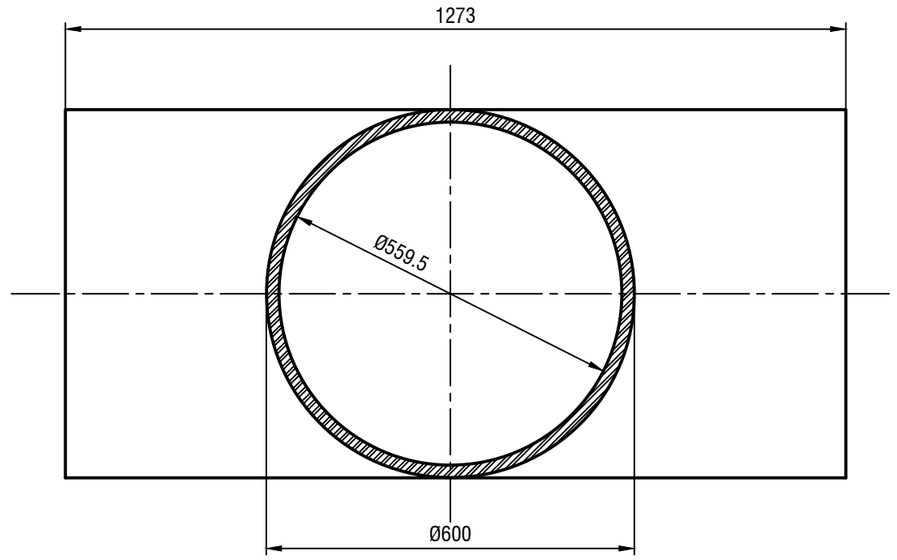
04. Cabeçote

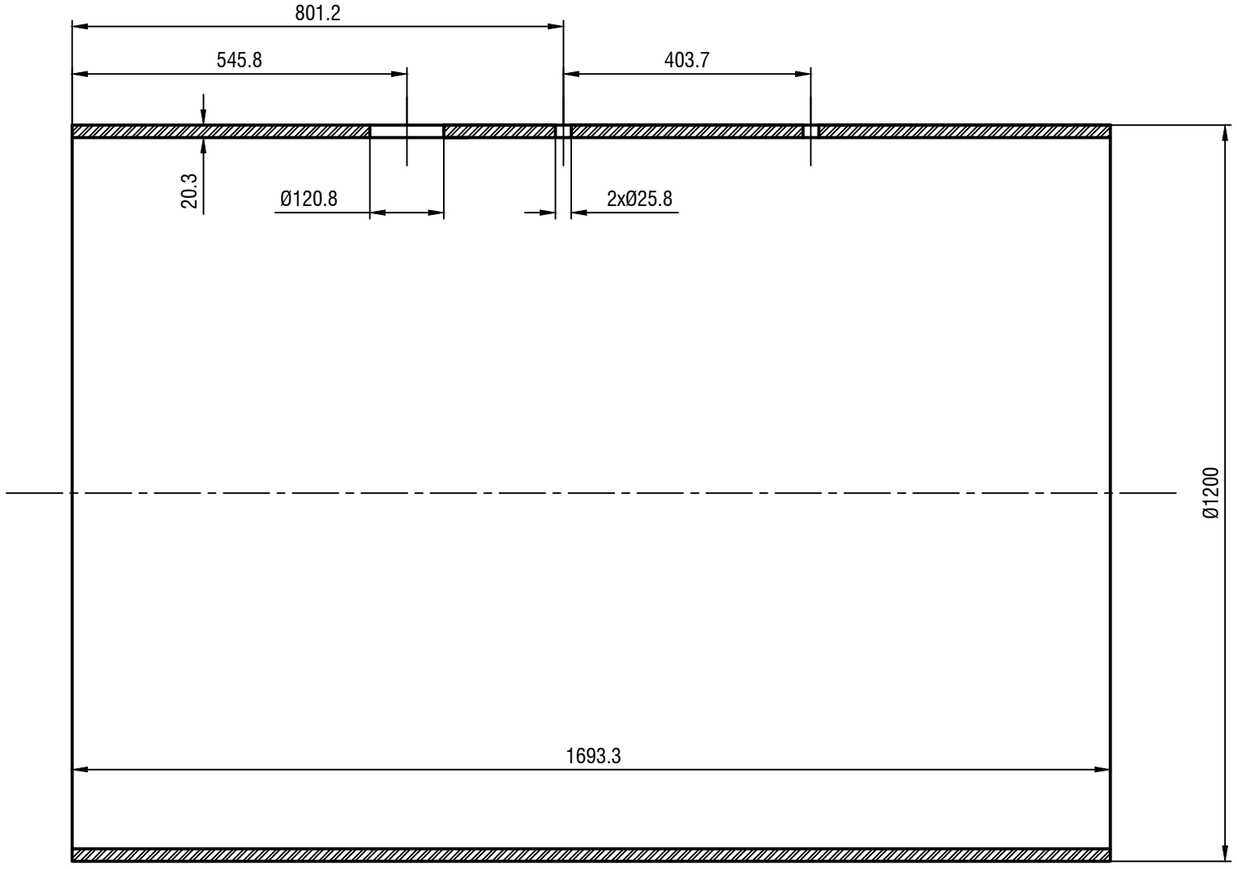


Vista C



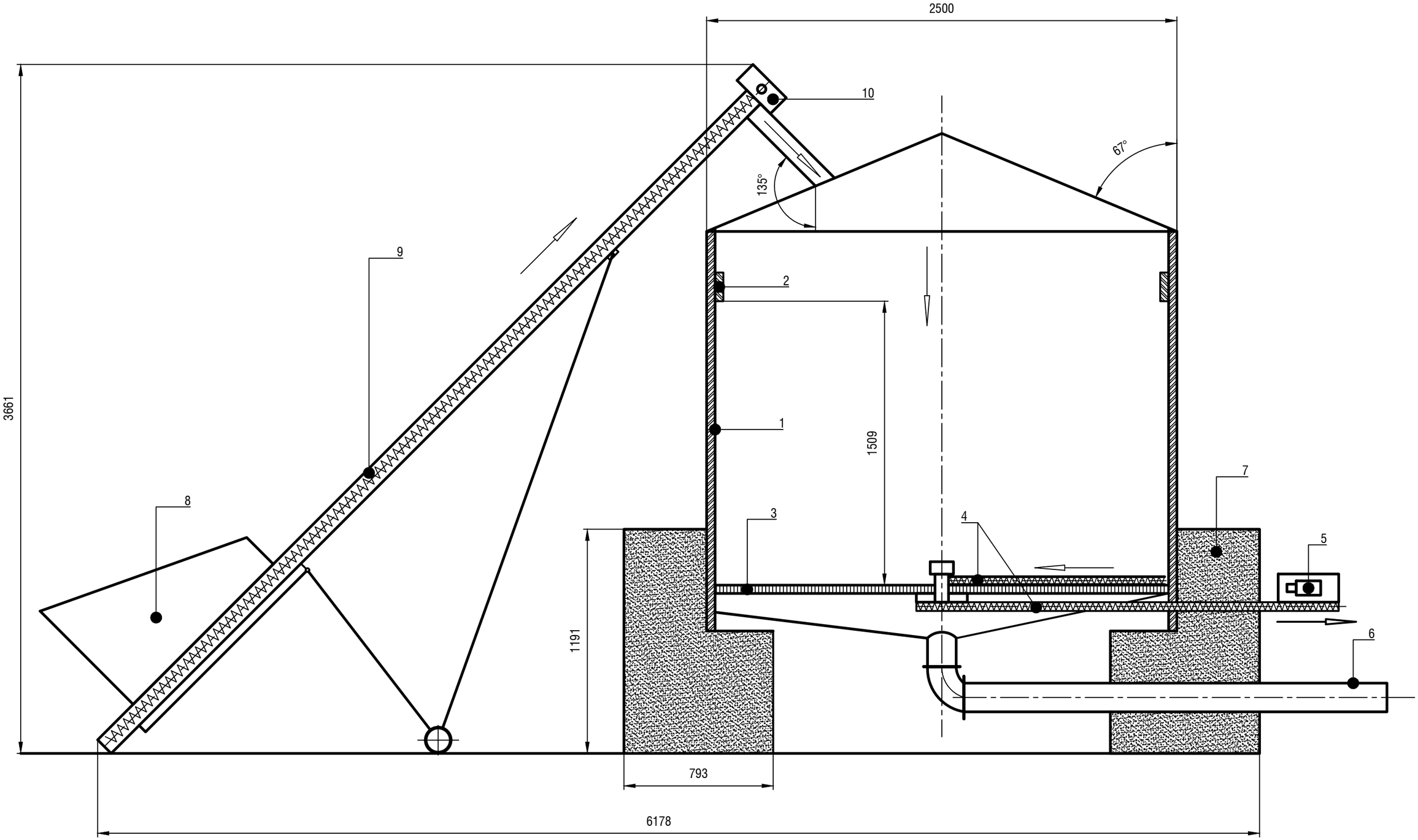
03. Casco da Fornalha





05. Casco da Caldeira

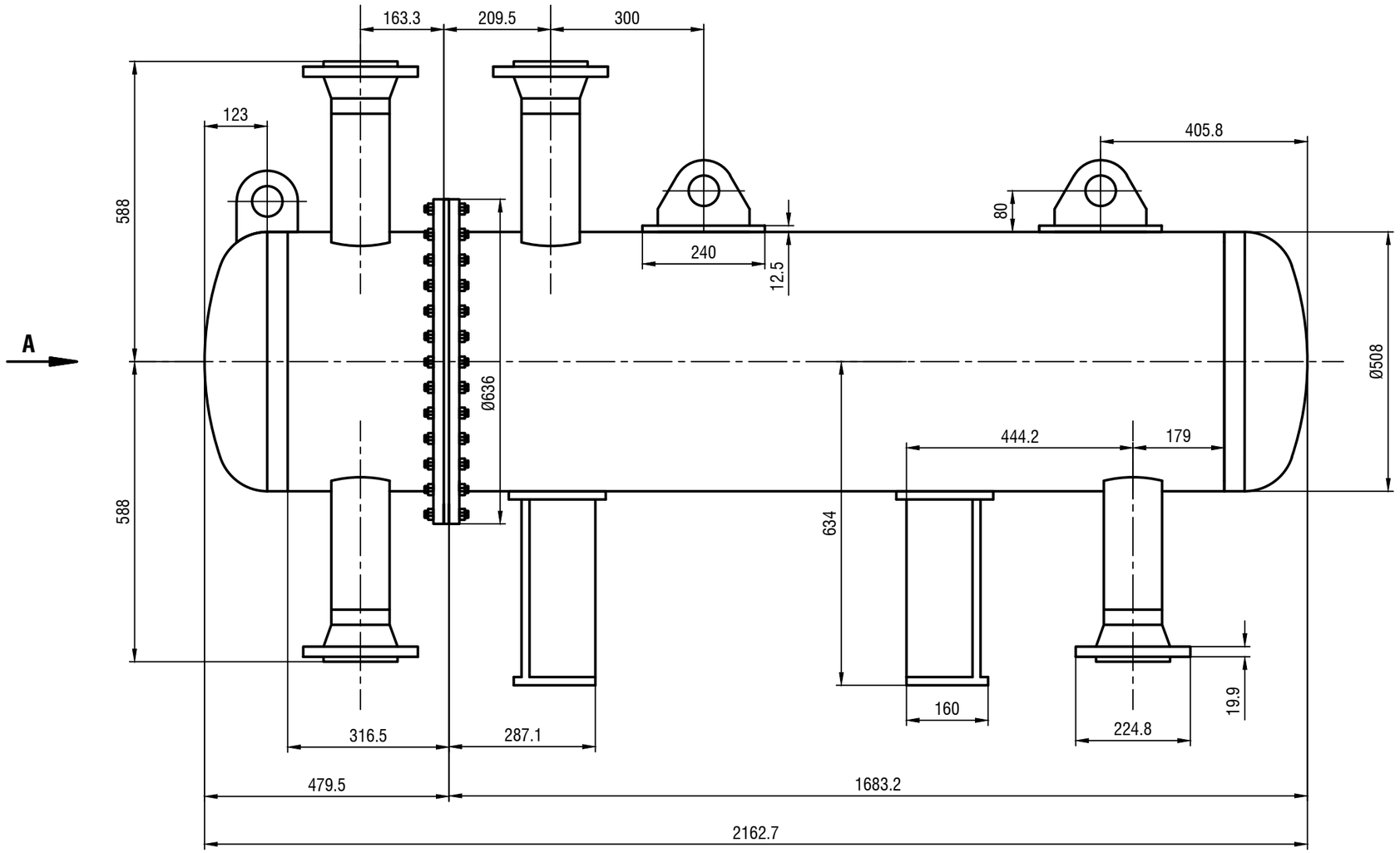
Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A14(6)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:100	CALDEIRA FLAMOTUBULAR			UEM-FE-LE-MEC

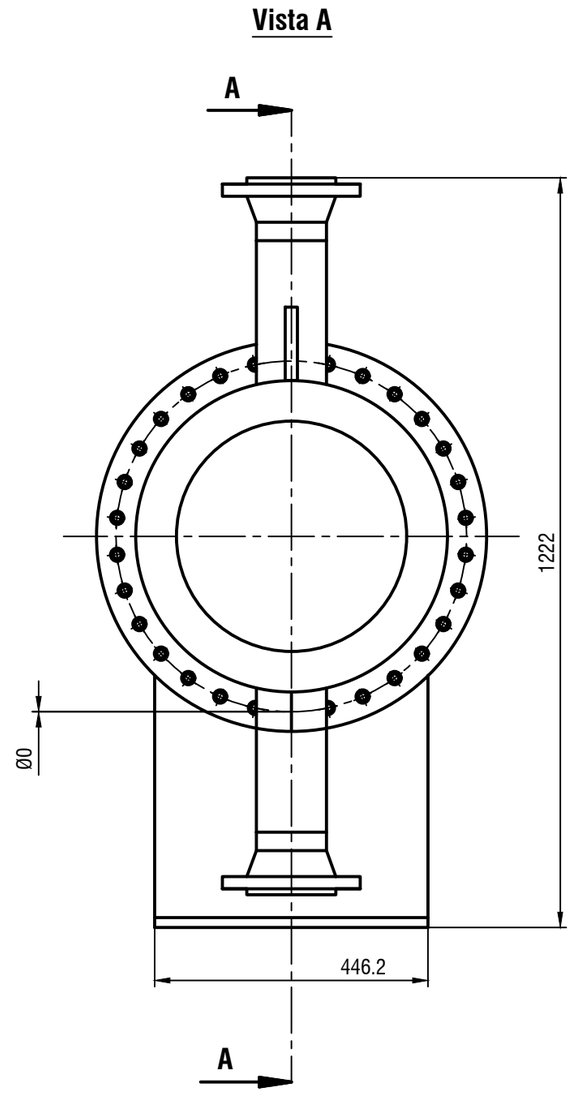


Desenhou	Data	Apelido		
Júlio N.	25.06	Sadala		DEMA-TL-A15(1)
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:20	ESQUEMA SECADOR			UEM-FE-LE-MEC

	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
A3	10	Motor do Tubo Transportador	1	100/220V
A3	09	Tubo Transportador	1	Ø12"
A3	08	Tremonha	1	
A3	07	Base de Concreto	1	
A3	06	Conduta de Ar Quente	1	Ø152.40
A3	05	Motor do Transportador de Descarga	1	
A3	04	Parafuso de Descarga	1	
A3	03	Distribuidor de Ar	1	
A3	02	Placa de Echimento Máximo	1	
A3	01	Parede do Secador	1	Esp.: 44.45 mm
FOLHA	REF.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	OBSERV./MODELO

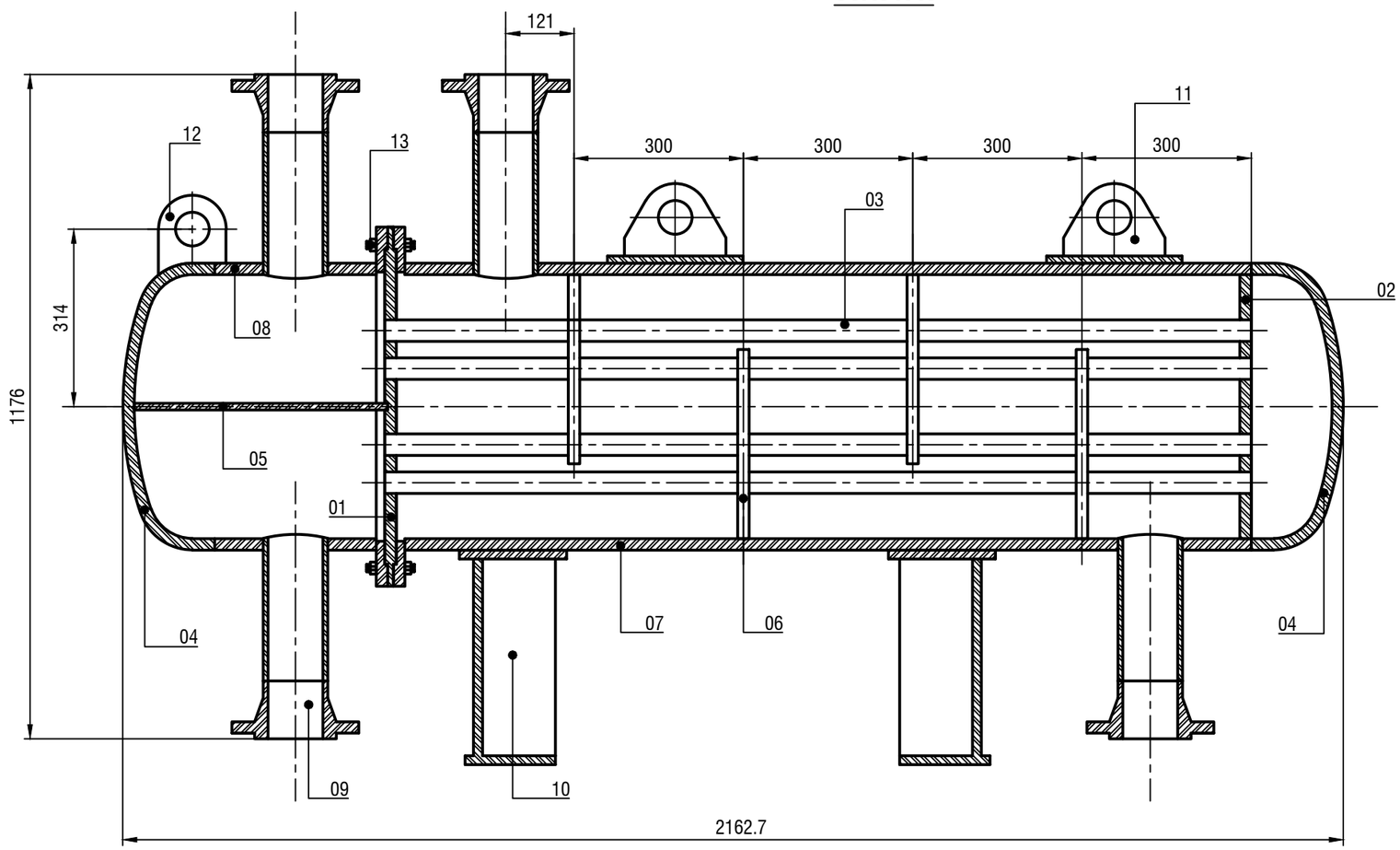
Desenhou	Data	Apelido	DEMA-TL-A15(2)
Júlio N.	25.06	Sadala	
Verificou	Data	Apelido	
Jorge P.		Nhambiu	
1:1	LISTA DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DO SECADOR		UEM-FE-LE-MEC



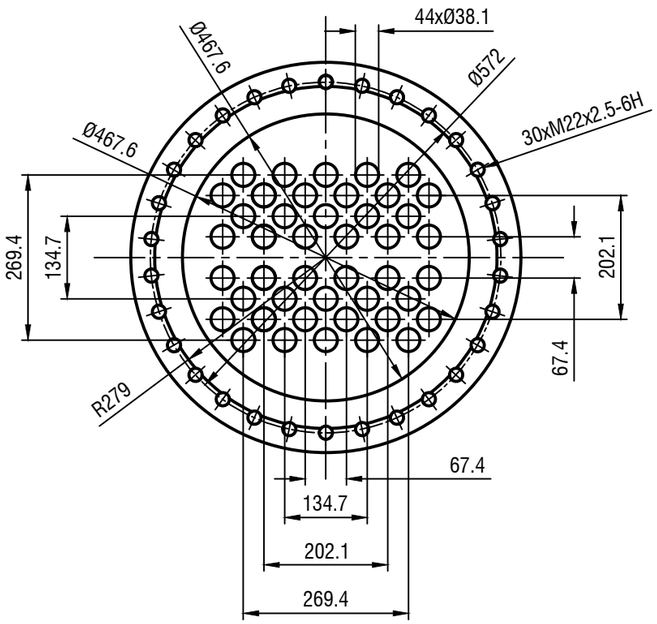


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A16(1)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:10	TERMOPERMUTADOR			UEM-FE-LE-MEC

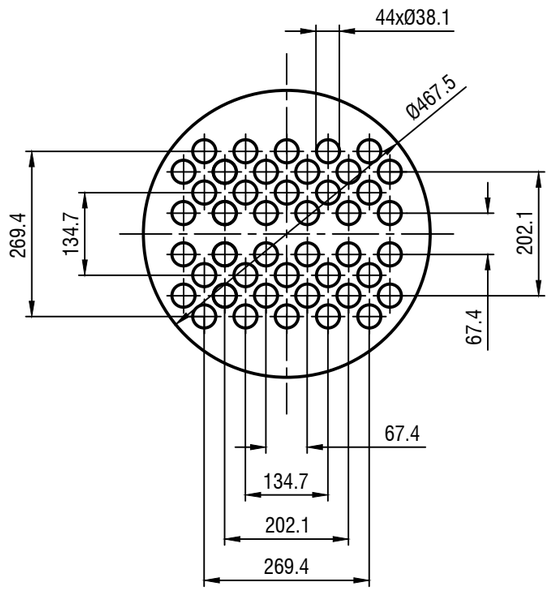
Corte A-A



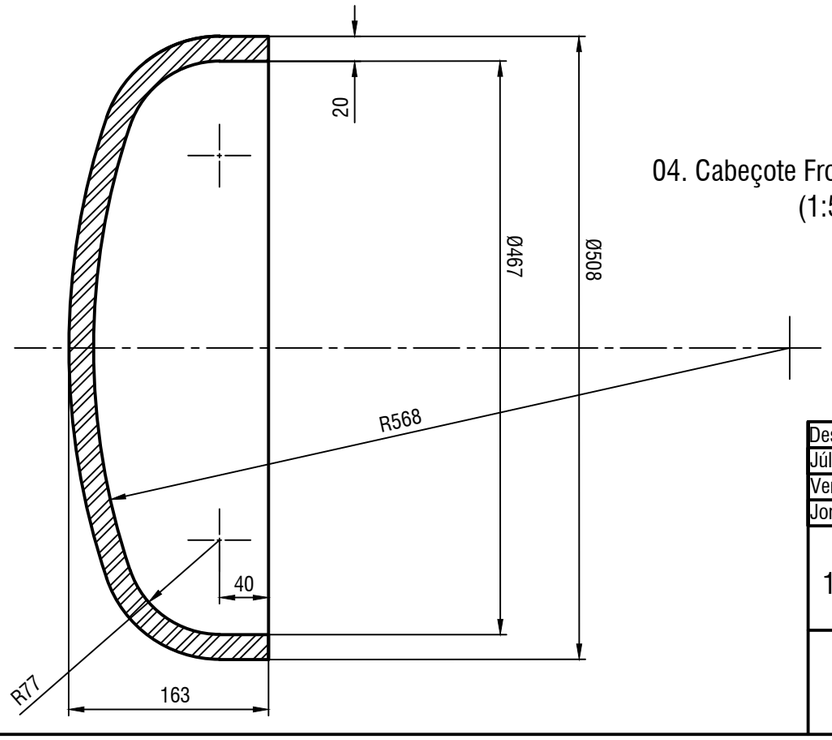
01. Espelho Frontal



02. Espelho Traseiro



04. Cabeçote Frontal & Traseiro
(1:5)

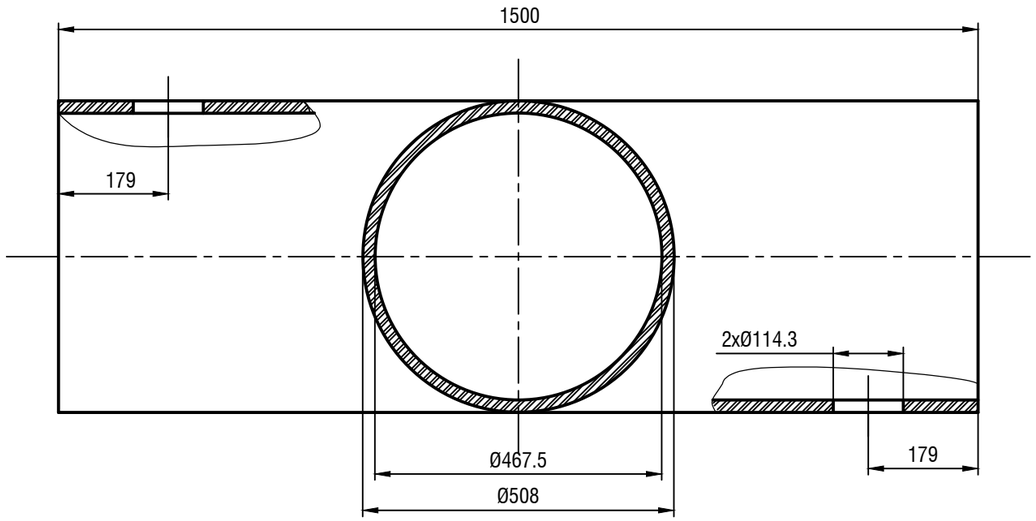


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A16(2)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:10	TERMOPERMUTADOR			UEM-FE-LE-MEC

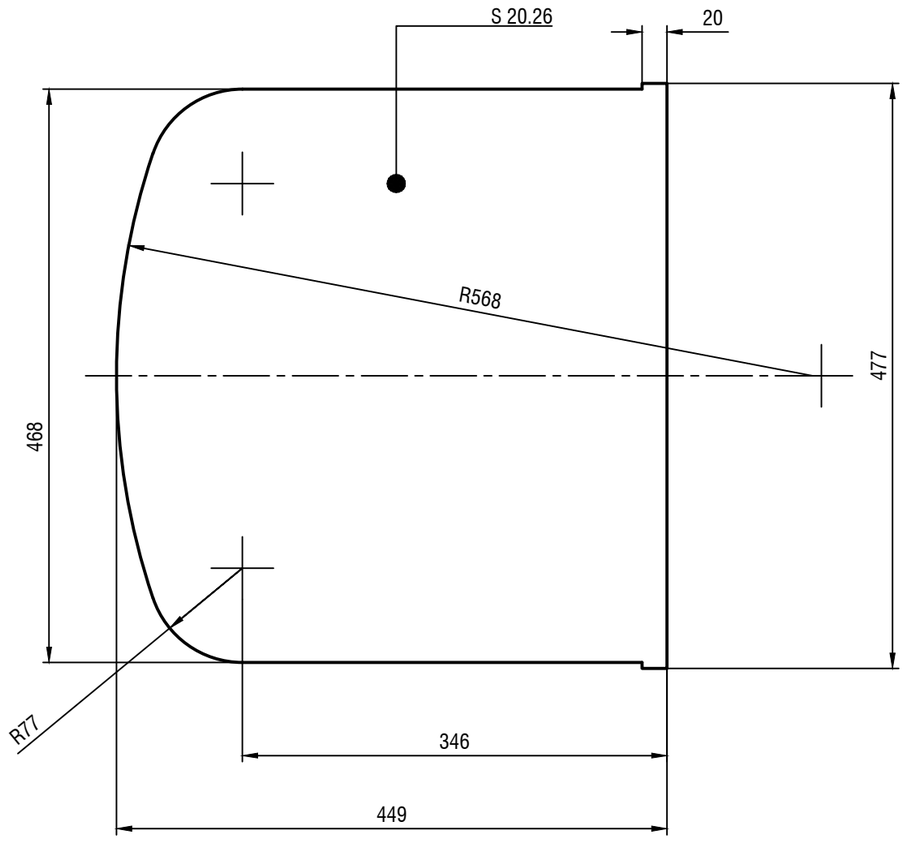
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	13	Parafuso de Fixação	30	M22x2.5x80-6g
	12	Pino de Içamento sem Base	1	
	11	Pino de Içamento	2	
	10	Suporte	2	
	09	Bocal	4	
A3	08	Cabeçote Estacionário	1	
A3	07	Casco	1	
	06	Chicana	4	
A3	05	Placa de Partição	1	
A3	04	Cabeçote	1	
	03	Tubos	44	
A3	02	Espelho Traseiro	1	
A3	01	Espelho Frontal	1	
FOLHA	REF.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	OBSERV./MODELO

Desenhou	Data	Apelido	DEMA-TL-A16(3)
Júlio N.	25.06	Sadala	
Verificou	Data	Apelido	
Jorge P.		Nhambiu	
1:1	LISTA DE COMPONENTES DO TERMOPERMUTADOR		UEM-FE-LE-MEC

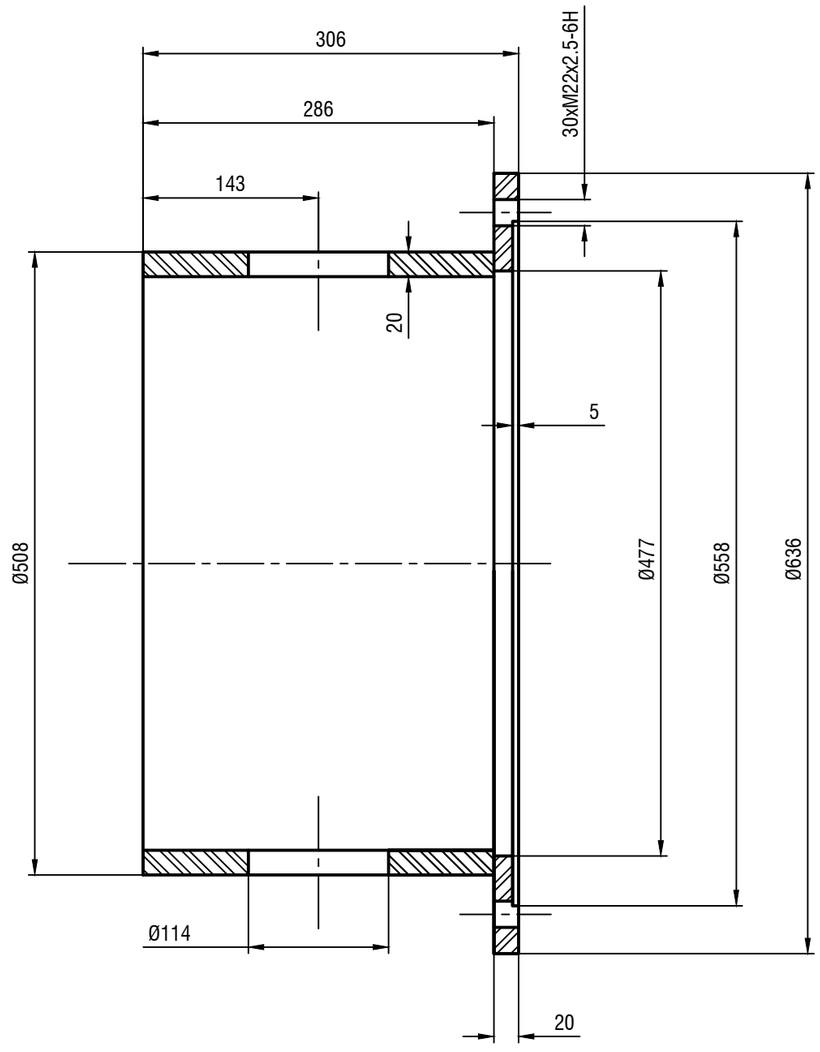
07. Casco



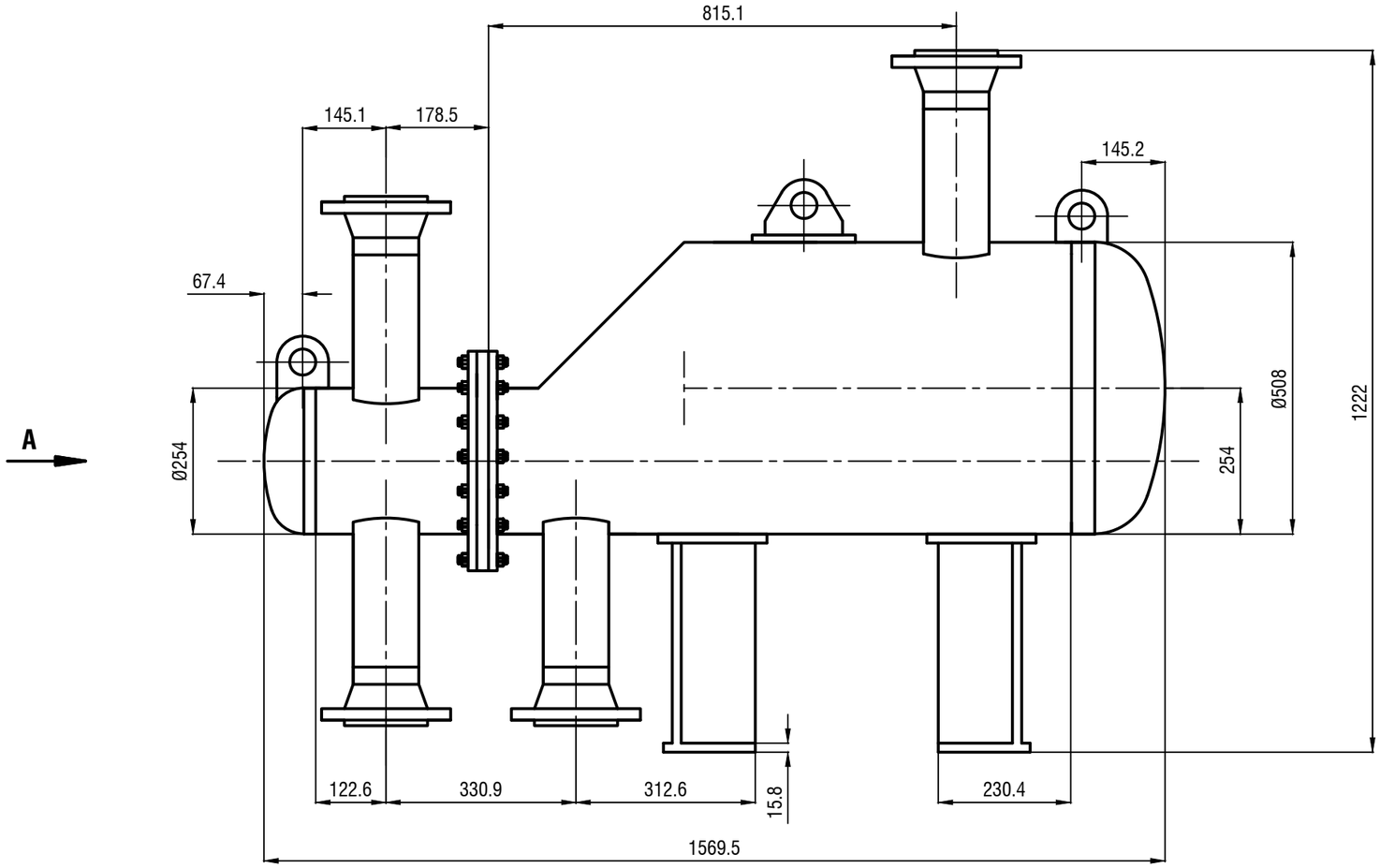
05. Placa de Partição
(1:5)



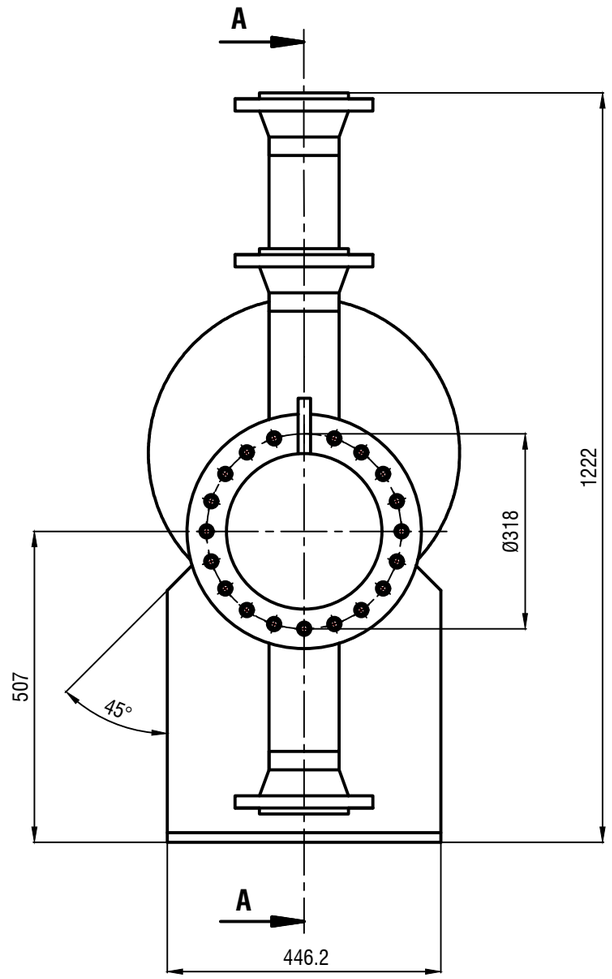
08. Cabeçote Estacionário
(1:5)



Desenhou	Data	Apelido		
Júlio N.	25.06	Sadala		DEMA-TL-A16(4)
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:10	TERMOPERMUTADOR			UEM-FE-LE-MEC

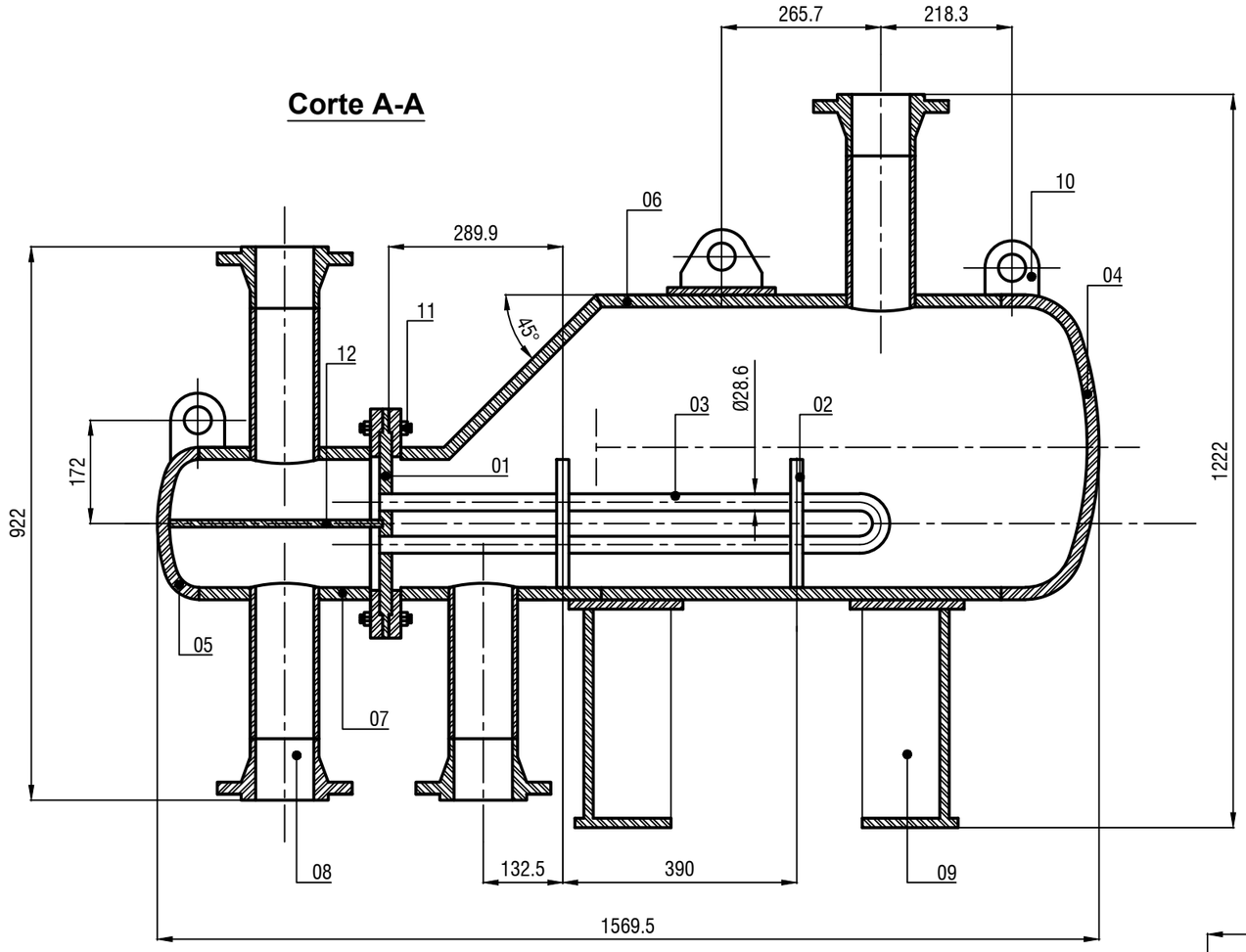


Vista A

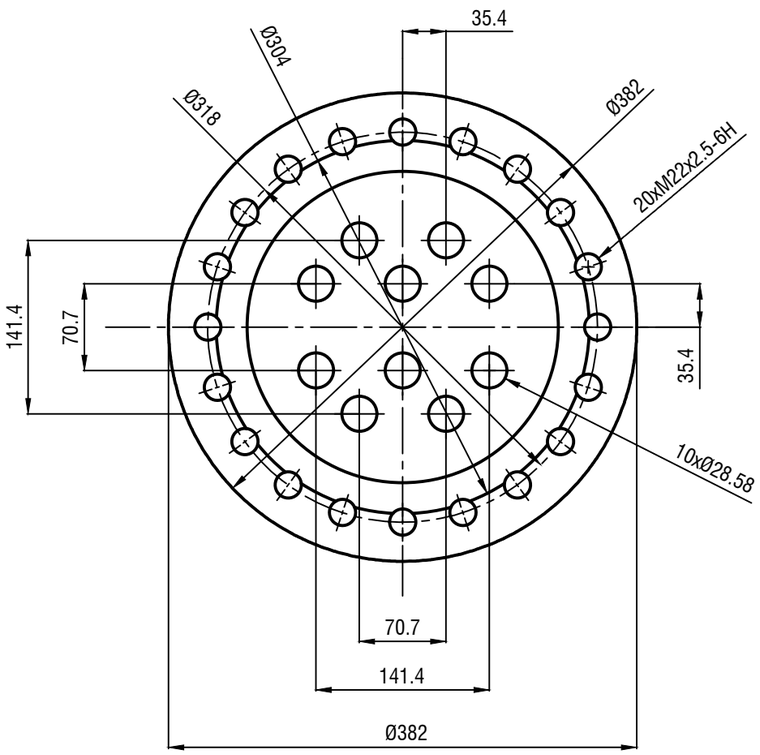


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A17(1)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:10	CONDENSADOR			UEM-FE-LE-MEC

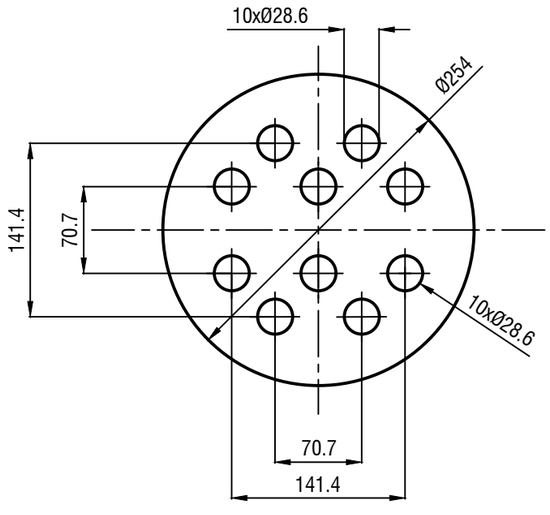
Corte A-A



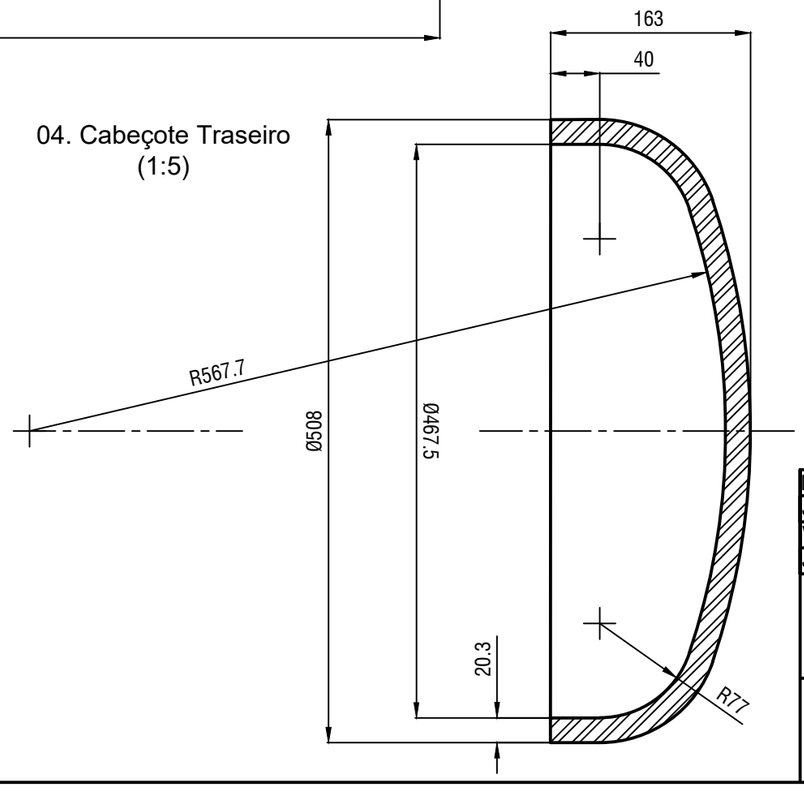
01. Espelho Frontal
(1:5)



02. Chicana
(1:5)



04. Cabeçote Traseiro
(1:5)

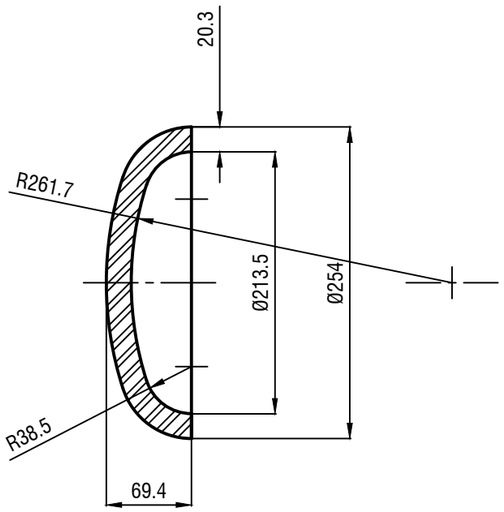


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A17(2)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:10	CONDENSADOR			UEM-FE-LE-MEC

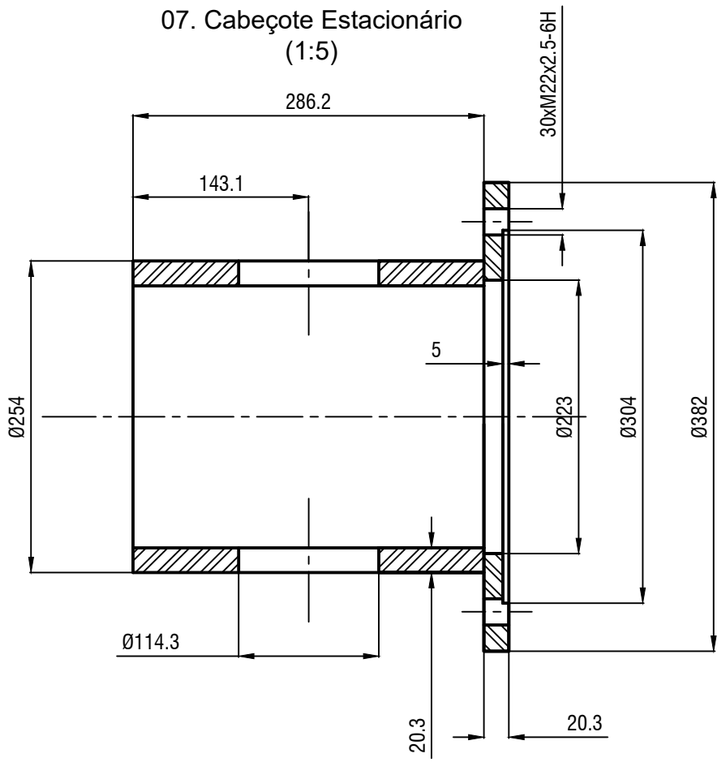
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
A3	12	Placa de Partição	1	
	11	Parafuso de Fixação	20	
	10	Pino de Içamento	3	
	09	Suporte	2	
	08	Bocal	4	
A3	07	Cabeçote Estacionário	1	
A3	06	Casco	4	
A3	05	Cabeçote Frontal	1	
A3	04	Cabeçote Traseiro	1	
	03	Tubos	10	Esp/:1.829 mm
A3	02	Chicana	2	
A3	01	Espelho Frontal	1	
FOLHA	REF.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	OBSERV./MODELO

Desenhou	Data	Apelido	DEMA-TL-A17(3)
Júlio N.	25.06	Sadala	
Verificou	Data	Apelido	
Jorge P.		Nhambiu	
1:1	LISTA DE COMPONENTES DO CONDENSADOR		UEM-FE-LE-MEC

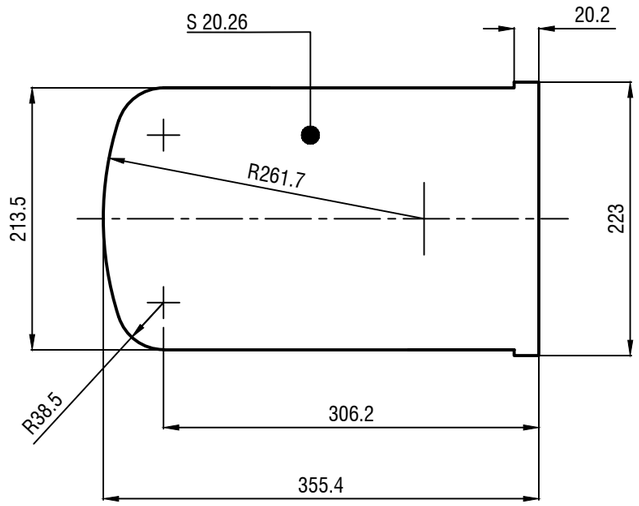
05. Cabeçote Frontal
(1:5)



07. Cabeçote Estacionário
(1:5)

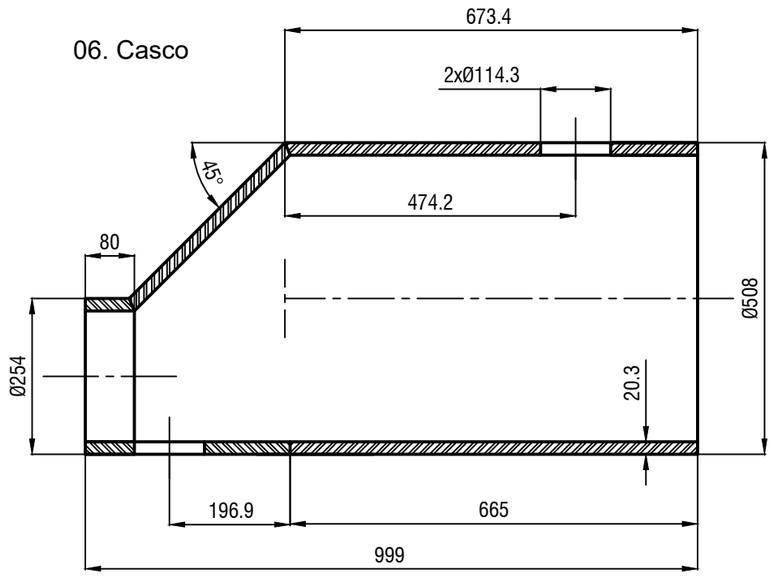


12. Placa de Partição
(1:5)

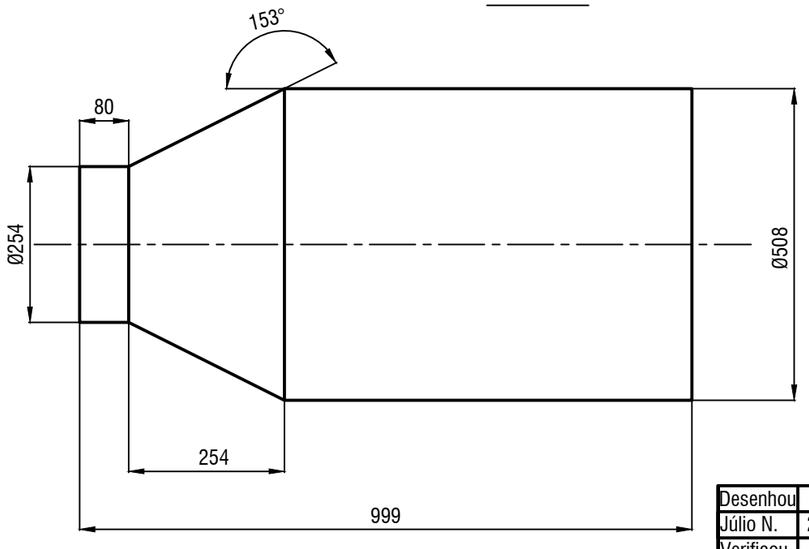


B

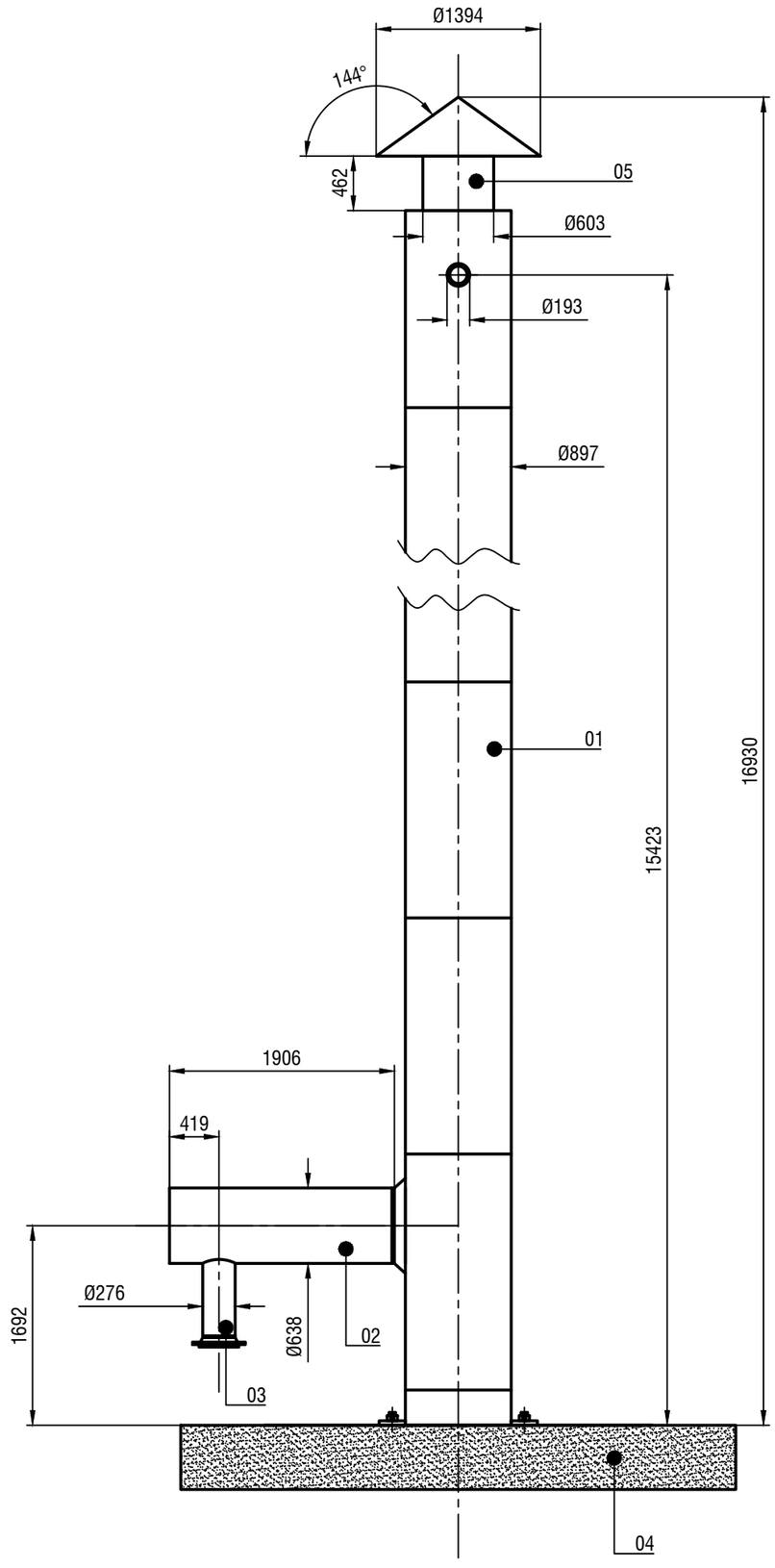
06. Casco



Vista B

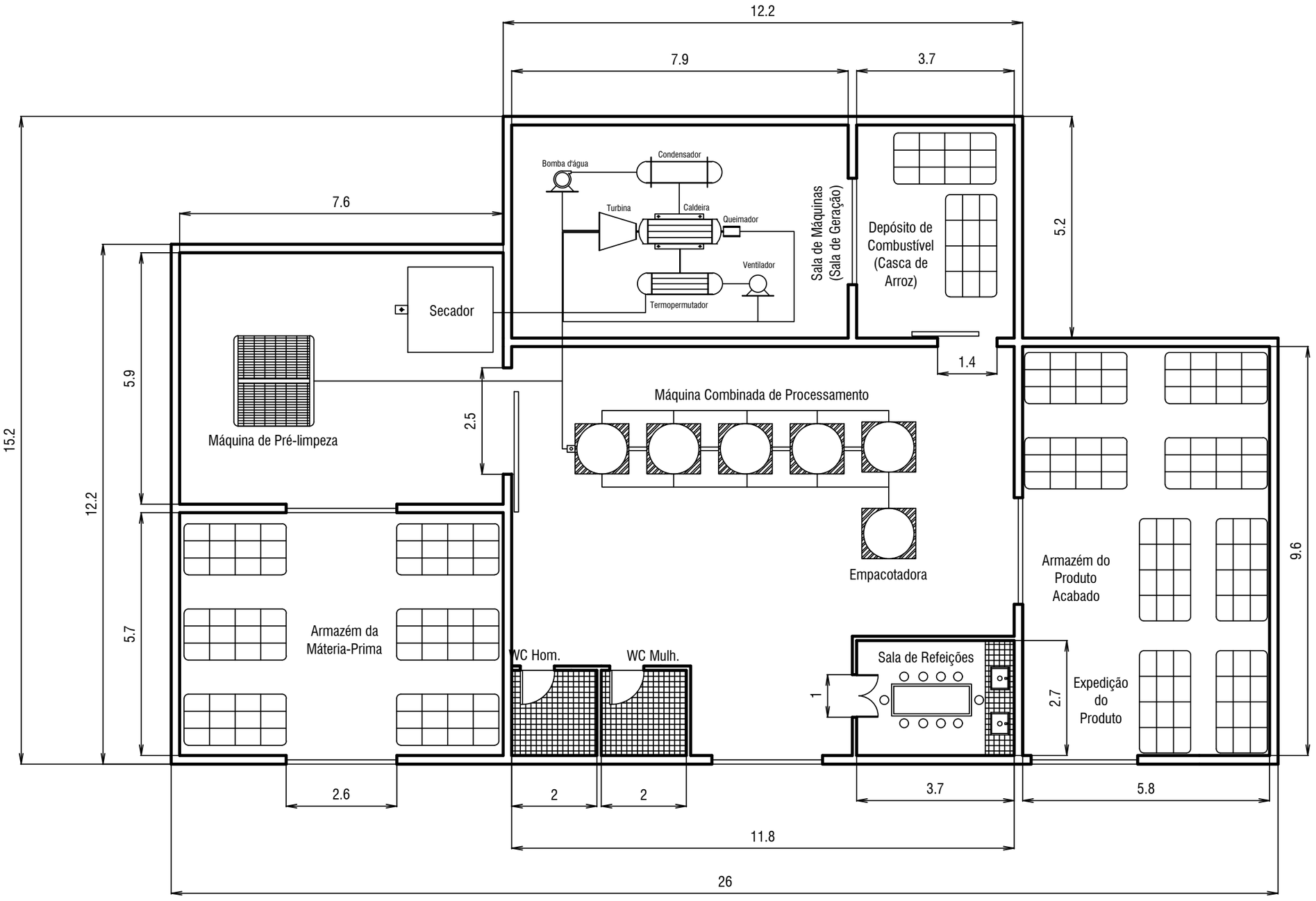


Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A17(4)
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:10	CONDENSADOR			UEM-FE-LE-MEC



	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
	00			
A3	06	Parafuso de Fixação		ISO M36x4.0
A3	05	Boca da Chaminé	1	
A3	04	Base de Concreto	1	
A3	03	Bocal	1	
A3	02	Conduta de Entrada	1	
A3	01	Corpo da Chaminé	1	Esp.: 44.45 mm
FOLHA	REF.	DESIGNAÇÃO	QUANT.	OBSERV./MODELO

Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A18
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:50	CHAMINÉ			UEM-FE-LE-MEC



Desenhou	Data	Apelido		DEMA-TL-A19
Júlio N.	25.06	Sadala		
Verificou	Data	Apelido		
Jorge P.		Nhambiu		
1:100	PLANTA DA INSTALAÇÃO			UEM-FE-LE-MEC