



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Dimensionamento de um Purificador Venturi para a
Fábrica Açucareira de Xinavane**

Autor:

Massossote Júnior, António Francisco

Supervisor:

Prof. Doutor. Fabião Manuel Alfredo Cumbe, Engº.

Maputo, Março de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

Dimensionamento de um Purificador Venturi para a Fábrica Açucareira de Xinavane

Autor:

Massossote Júnior, António Francisco

Supervisor:

Prof. Doutor. Fabião Manuel Alfredo Cumbe, Engº.

Maputo, Março de 2025

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante **Massossote júnior, António Francisco** entregou no dia ___ / ___ / ___ as três cópias do relatório do seu Trabalho da Disciplina de Trabalho de licenciatura com a referência: _____

Intitulado: **Dimensionamento de um Purificador Venturi para a Fábrica Açucareira de Xinavane.**

.

Maputo, ____ de _____ de 20____

O Chefe de Secretaria



Dimensionamento de um Purificador Venturi para a Fábrica Açucareira de Xinavane

Índice

AGRADECIMENTOS	i
DECLARAÇÃO DE HONRA	ii
ÍNDICE DE TABELAS	iii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objectivos Gerais	2
1.2. Objectivos Específicos	2
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura do Trabalho	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Cana-de-açúcar	4
2.1.1. Processamento da Cana-de açúcar.....	4
2.1.2. Combustível e geração de energia através da biomassa de cana-de-açúcar.....	5
2.1.3. Características dos gases de exaustão resultante da queima do bagaço.....	7
2.2. Dispositivos de controle de emissão de partículas	9
2.2.1. Filtro de mangas	9
2.2.2. Ciclone	9
2.2.3. Precipitador electrostático	9
2.2.4. Purificadores húmidos	10
2.3. Purificador Venturi	11
2.3.1. Princípio de funcionamento do purificador Venturi	11
2.4. Mecanismos de colecta das partículas nos gases de exaustão	12
2.4.1. Impactação inercial	13
2.4.2. Intercepção	14
2.4.3. Difusão	14
2.4.4. Configuração e operação do purificador Venturi	15
2.4.4.1. Venturi de baixa energia	15
2.4.4.2. Venturi de média energia	16

2.4.4.3.	Venturi de alta energia	16
2.4.5.	Sistema de armazenamento e distribuição de água de purificação.....	16
2.4.6.	Sistema de injeção de líquido.....	17
2.4.6.1.	Tubo aberto	17
2.4.6.2.	Bicos de pulverização	18
2.4.7.	Secção da garganta do Venturi.....	18
2.4.7.1.	Garganta fixa	18
2.4.7.2.	Garganta variável.....	18
2.4.8.	Câmara de recolha e eliminador de gotas	19
2.4.8.1.	Câmara de recolha.....	19
2.4.8.2.	Eliminador de gotas.....	19
2.5.	Equipamentos auxiliares	20
2.6.	Materiais de construção	21
3.	DIMENSIONAMENTO DO PURIFICADOR VENTURI.....	22
3.1.	Parâmetros de dimensionamento do sistema venturi	23
3.1.1.	Distribuição do tamanho de partículas.....	23
3.1.2.	Razão liquido-gás.....	25
3.1.3.	Velocidade do gás e queda de pressão	25
3.1.4.	Tamanho da gota.....	26
3.2.	Cálculo do purificador Venturi.....	27
3.2.1.	Propriedades dos gases de exaustão.....	27
3.2.2.	Determinação dos parâmetros relacionados ao desempenho do Purificador Venturi.....	29
3.2.2.1.	Cálculo da queda de pressão.....	30
3.2.2.2.	Cálculo da eficiência fracçãoária e geral do purificador Venturi	31
3.3.	Simulação numérica pelo software ANSYS-FLUENT.....	32
3.3.1.	Modelo do Purificador Venturi.....	32
4.	ANÁLISE DE CUSTOS DO SISTEMA DE PURIFICAÇÃO VENTURI.....	33
4.1.	Custos de aquisição do sistema venturi (CA)	34
4.1.1.	Custos de Instalação do sistema Venturi (CI)	34
4.1.2.	Investimento total de capital.....	35
4.2.	Custos de operação	35
4.2.1.	Consumo do líquido de purificação	35
4.2.2.	Consumo de Electricidade	36

5.	MANUTENÇÃO DO PURIFICADOR VENTURI.....	37
5.1.	Entupimento dos bicos.....	37
5.2.	Acúmulo de sólidos	38
5.3.	Desgaste por corrosão	38
5.4.	Desgaste por abrasão	39
5.5.	Desgaste de equipamentos rotativos.....	39
5.6.	Ventiladores	39
5.6.1.	Ventiladores de corrente-forçada	39
5.6.2.	Ventiladores de corrente-induzida	39
5.6.3.	Bombas	39
5.7.	Manutenção preventiva	40
5.7.1.	Inspeção periódica do equipamento.....	40
5.7.2.	Substituição de peças desgastadas.....	40
5.7.3.	Manutenção de um inventário adequado de peças sobressalentes.....	40
5.7.4.	Registo de toda a manutenção efectuada no equipamento de purificação.	40
6.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	41
6.1.	Análise das propriedades dos gases de exaustão	41
6.2.	Análise do desempenho do purificador Venturi	42
6.3.	Análise da simulação dinâmica de fluidos computacional	45
6.3.1.	Curvas de velocidade.....	45
6.4.	Apresentação do purificador venturi proposto.	46
7.	Conclusões e recomendações	49
7.1.	Conclusões	49
7.2.	Recomendações	49
8.	Refêrencias Bibliográficas	50

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter-me concedido saúde e persistência necessária para realizar os exames que possibilitaram a admissão ao curso de engenharia mecânica, e pela força que tem me dado em todos aspetos da vida.

Ao meu supervisor Professor Doutor Engº Fabião Cumbe que se dispôs a ajudar a orientar o Trabalho de licenciatura nas suas diferentes etapas.

Agradeço aos meus progenitores António Massossote e Isáura Massossote, pelo esforço que sempre fizeram para garantir a minha boa educação.

Às minhas irmãs Cátia, Julieta e Márcia por estarem sempre do meu lado em todos momentos da minha vida.

Ao engenheiro Alcides Zacarias funcionário da Fábrica Açucareira de Xinavane, que foi sempre muito atencioso e paciente, disponibilizando o material e conhecimento necessários para a correcta realização do trabalho de licenciatura.

Às minhas Amigas e colegas de longa data Letícia e Steiss, pela sua presença e disponibilidade para me apoiar nas várias fases da minha vida pessoal e académica.

Aos meus amigos e colegas da faculdade Isildo, Feliciano, Heldo, Curima, Massunda, David pelas explicações e por terem sido a minha motivação para alcançar melhores resultados académicos .

À minha namorada Solange pelo seu apreço e dedicação em estar sempre do meu lado em todos momentos da minha vida pessoal e académica.

Muito Obrigado!

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, **António Francisco Massossote Júnior** declaro por minha honra que o presente projecto final do curso é exclusivamente de minha autoria, não constituindo cópia de nenhum trabalho realizado anteriormente e as fontes usadas para a realização do trabalho encontram-se referidas na bibliografia.

Assinatura: _____

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Materiais usados para o fabrico de Purificadores húmidos e suas propriedades.....	21
Tabela 2: Distribuição real de tamanho das partículas nos gases de exaustão correspondente a FAX (Fonte: Howden Energy Systems).	24
Tabela 3: Parâmetros de operação para purificadores húmidos (Fonte: Mussatti, 2002).....	25
Tabela 4: Dados de entrada para o cálculo das propriedades dos gases de exaustão.....	27
Tabela 5. Dados de entrada para cálculo dos parâmetros de desempenho do sistema Venturi. ...	30
Tabela 6. parâmetros dimensionais do tubo Venturi.	33
Tabela 7. Custos de instalação do purificador Venturi.	34
Tabela 8. Resultados do cálculo das propriedades do gás de exaustão.....	41
Tabela 9. Resultados do cálculo do desempenho do sistema Venturi.	44
Tabela 10. Eficiência de colecta do sistema venturi	44
Tabela 11. Especificações do purificador venturi dimensionado	46
Tabela 12. Características dimensionais do purificador venturi.	46

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Produção de cana-de-açúcar dos maiores produtores do mundo em comparação com Moçambique, 1961 a 2022(Fonte: www.ourworldindata.org , Adaptado pelo Autor).	5
Gráfico 2. Mortes atribuíveis à poluição ambiental por partículas, por ano e causa (Fonte: Cohen et al, 2015).	8
Gráfico 3: Distribuição de tamanho das partículas nos gases na saída da caldeira correspondente a fábrica açucareira de Xinavane (Fonte: Autor).	24
Gráfico 4: Eficiência de colecta como função do tamanho da partícula e queda de pressão em purificadores Venturi (Fonte: Lawrence, 2004).	26
Gráfico 5. Relação entre a razão líquido-gás, eficiência de colecta e a queda de pressão (Fonte: Autor).	43
Gráfico 6. Relação entre a velocidade do gás na garganta, eficiência de colecta e queda de pressão (Fonte: Autor).	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cana-de-açúcar (Fonte: Google fotos)	4
Figura 2: Bagaço depois da secagem, pronto para ser transportado para a caldeira (Fonte: Autor).	6
Figura 3: Vista exterior da caldeira aquatubular na fábrica açucareira de Xinavane (Fonte: autor).	6
Figura 4: Tamanho típico de partículas (Fonte: Rein, 2007).	8
Figura 5. a) Filtro de Mangas; b) Multiciclone; c) Precipitador electrostático.....	10
Figura 6. Purificador Venturi de secção circular (Fonte: Autor).....	11
Figura 7: Impactação de uma partícula em uma gota de líquido (Fonte: Schiffner, 2002)	14
Figura 8: intercepção de uma partícula em uma gota de líquido (Fonte: Schiffner, 2002)	14
Figura 9: Intercepção de uma partícula em uma gota de líquido (Fonte: Schiffner, 2002).....	15
Figura 10: Estação de tratamento de águas residuais na FAX (Fonte: autor)	17
Figura 11. Câmara de recolha de gotas do tipo ciclone (Fonte: www.directindustry.com)	19
Figura 12. a) Eliminador de gotas Chevron; b) Eliminador de gotas em malha. (Fonte: Google fotos)	20
Figura 13: a) ventilador de corrente-forçada ; b) ventilador de corrente-induzida. (Fonte: autor)	20
Figura 14. Carta Psicrométrica para altas temperaturas (Fonte: Mussatti, 2002).	29
Figura 15. Malha computacional na superfície do purificador Venturi (Fonte: Autor).	33
Figura 16. Desenho técnico do tubo Venturi(Fonte: Autor).....	33
Figura 17. Variação da velocidade no tubo Venturi (Fonte: Autor).	45
Figura 18. Desenho técnico do sistema venturi proposto no presente trabalho (Fonte:Autor). ..	48

LISTA DE ABREVIATURAS

α_1	Ângulo de curvatura da convergência ($^\circ$)
α_2	Ângulo de curvatura da divergência ($^\circ$)
ρ_L	Massa específica da água (g/cm^3)
ρ_G	Massa específica do gás de exaustão (g/cm^3)
σ	Tensão superficial do líquido (N/m)
μ_L	Viscosidade dinâmica da água (Ns/m^3)
μ_G	Viscosidade dinâmica do gás de exaustão (Ns/m^3)
η_{dp}	Eficiência fraccionária da partícula (%)
ρ_p	Massa específica da partícula (g/cm^3)
θ_{H_2O}	Teor de humidade (%)
ω	Humidade absoluta (adimensional)
C_D	Coeficiente de arrasto para gotas com diâmetro médio sauter (adimensional)
d_d	Diâmetro médio da gota de água (mm)
d_g	Diâmetro da garganta do venturi (m)
d_p	Diâmetro aerodinâmico da partícula (μm)
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
EPA	<i>Agência de proteção ambiental</i>
$f_{sólidos}$	Fracção mássica dos sólidos no líquido de recirculação (%)
F	Factor empírico de afinidade da partícula à água (adimensional)
FAX	Fábrica Açucareira de Xinavane
K_p	Parâmetro de impactação inercial (adimensional)

l_g	Comprimento da garganta (m)
M_{ar}	Massa molar do ar ($kg/kmol$)
M_{va}	Massa molar do vapor de água ($kg/kmol$)
$\dot{m}_a$	Vazão mássica do ar seco (kg/h)
$\dot{m}_{va}$	Vazão mássica do vapor de água (kg/h)
$\dot{m}_{PM}$	Vazão mássica de particulados no gás de exaustão (kg/h)
MP	Material Particulado
Pt_d	Penetração da partícula (%)
Q_G	Vazão volumétrica do gás (m^3/s)
$Q_{T(H_2O)}$	Vazão volumétrica da água de reposição (m^3/s)
$Q_{va(evap)}$	Vazão volumétrica da água perdida por evaporação (m^3/s)
Q_{dren}	Vazão volumétrica da água drenada (m^3/s)
R_e	Número de Reynoulds da gota de água (adimensional)
T	Temperatura do gás de exaustão ($^{\circ}C$)
t	Tempo (s)
T_{sat}	Temperatura de saturação do gás de exaustão ($^{\circ}C$)
$UGBI$	Unidade de gestão da bacia do incomati
u_g	Velocidade do gás na garganta (m/s)
u_r	Velocidade da mistura líquido – gás na câmara de recolha (m/s)
V_{mol}	Volume de 1 kg – mole de ar (m^3)
V_H	Volume Húmido (m^3/kg)

RESUMO

Diante de uma diversificada matriz energética, a Fábrica Açucareira de Xinavane (FAX) tem o bagaço da cana-de-açúcar como fonte primária de geração de energia. A queima de biomassa produz partículas finas ($MP_{2,5}$), suspensas nos gases quentes de combustão que são facilmente respiráveis e danosas à saúde humana, podendo provocar problemas respiratórios, cardiovasculares, entre outros. A FAX faz o controle de emissão de partículas através de um multiciclone que se mostra pouco eficiente na colecta de partículas finas e ultrafinas, que ficam facilmente suspensas no ar atmosférico perigando a saúde dos operários da fábrica e da população vizinha. Nesse sentido propõe-se a instalação de um novo equipamento de controle de emissão de partículas. No presente trabalho dimensionou-se um dispositivo de purificação de gases por via húmida do tipo venturi, a escolha justifica-se por este apresentar baixa relação custo benefício, elevada eficiência na coleta de particulado fino, e também teve-se em conta a abundância de água disponível no Rio Incomati que dista cerca de 100 metros da fábrica. Para o dimensionamento do sistema Venturi foram realizadas visitas à fábrica para mapeamento do local projectado para instalação do purificador e colecta de dados de entrada. Com recurso a formulas extraídas da literatura e do simulador ANSYS Fluent 16.0 foram realizados cálculos e simulações com vista a obter valores ótimos de desempenho. O purificador Venturi mostrou-se muito eficiente na purificação dos gases, com eficiências maiores que 98% para MP maior que 2,5 μm e maiores que 95% para MP entre 1,0 e 2,5 μm , para $MP < 1,0 \mu\text{m}$, a eficiência foi satisfatória com valor máximo de 71%. Verificou-se que as eficiências foram maiores para altas velocidades de gás, favorecendo a captura de material particulado. Concluiu-se que o purificador foi eficiente na coleta de material particulado fino, tendo como condição ótima $VG = 110 \text{ m/s}$ e razão líquido-gás de $2\text{L}/\text{m}^3$.

PALAVRAS-CHAVE: Material Particulado, Purificador Venturi, eficiência de colecta.

ABSTRACT

Faced with a diversified energy matrix, the Xinavane Sugar Factory (FAX) has sugarcane bagasse as its primary source of energy generation. The burning of biomass produces fine particles ($PM_{2,5}$), suspended in the hot combustion gases that are easily breathable and harmful to human health, and can cause respiratory, cardiovascular, and other problems. FAX controls particle emissions using a multicyclone that is inefficient in collecting fine and ultrafine particles, which easily become suspended in the atmospheric air, endangering the health of factory workers and the surrounding population. In this sense, it is proposed to install new particulate emission control equipment. In this work, a Venturi Wet Scrubber was designed. The choice is justified by its low cost-benefit ratio, high efficiency in collecting fine particulate matter, and also taking into account the abundance of water available in the Incomati River, which is approximately 100 meters from the factory. To size the Venturi system, visits were made to the factory to map the location designed for the installation of the Scrubber and collect input data. Using formulas extracted from the literature and the ANSYS Fluent 16.0 simulator, calculations and simulations were performed with a view to obtaining optimal performance values. The Venturi Scrubber proved to be very efficient in purifying gases, with efficiencies greater than 98% for MP greater than $2.5\ \mu\text{m}$ and greater than 95% for MP between 1.0 and $2.5\ \mu\text{m}$, for $MP < 1.0\ \mu\text{m}$, the efficiency was satisfactory with a maximum value of 71%. It was found that efficiencies were higher for high gas velocities, favoring the capture of particulate matter. It was concluded that the purifier was efficient in collecting fine particulate matter, with the optimal condition $VG = 110\ \text{m/s}$ and a liquid-gas ratio of $2\text{L}/\text{m}^3$.

KEYWORDS: Particulate Matter, Venturi Scrubber, Collection Efficiency.

1. INTRODUÇÃO

O controle de emissão de partículas na indústria açucareira em Moçambique é um aspecto que carece de uma especial atenção. A presença de particulados finos nos gases de exaustão é fonte de preocupação tanto para o processo industrial como para a saúde humana (Ângela Maria, 2006). O bagaço da cana-de-açúcar é a biomassa amplamente usada na indústria açucareira como combustível principal que alimenta os processos de cogeração na caldeira. Porém há uma problemática: a emissão de material particulado para a atmosfera provido da queima do bagaço. A queima de bagaço gera alta concentração de material particulado, que se não for controlado poderá ser considerado prejudicial a saúde, aumentando o risco de infecções e doenças cardiorrespiratórias (Bruno Menezes, 2020).

Em Moçambique existem 4 fábricas de agro-processamento de cana-de-açúcar para produção de açúcar, nomeadamente a Maragra, e Açucareiras de Xinavane, Mafambisse e Marromeu. O presente trabalho está centralizado na fábrica açucareira de Xinavane (FAX), a mesma é a maior produtora de açúcar a nível nacional, processando em média de 1,4 milhão de toneladas de cana-de-açúcar por campanha.[24]

O presente trabalho tem em vista o dimensionamento de um purificador Venturi que é um dispositivo para o controle de emissão de material particulado para atmosfera por via húmida.

Para tal foram colectados dados relativos a carga do particulado no gás de exaustão, a respectiva distribuição do tamanho de partículas e outros parâmetros físicos gerais. Também foi realizada uma vistoria da região onde se localiza o sistema de exaustão para melhor instalar o purificador venturi e o equipamentos auxiliares.

1.1. Objectivos Gerais

Dimensionamento de um dispositivo cuja função é filtrar material particulado suspensas nos gases quentes de combustão na Fábrica Açucareira de Xinavane.

1.2. Objectivos Específicos

- Dimensionamento de um purificador venturi com base em condições de entrada reais obtidos na Fábrica Açucareira de Xinavane, distrito da Manhica.
- Modelagem e simulação do escoamento em um purificador Venturi com auxilio de técnicas de dinâmica de fluídos computacional.
- Realizar uma análise de custos de aquisição/instalação do equipamento, e custos anuais de operação e manutenção.

1.3. Metodologia

Para a realização do meu projeto de final de curso, recorreu-se a uma abordagem metodológica combinada, com o objetivo de garantir a qualidade e a fiabilidade dos dados obtidos. Em primeiro lugar, foram realizadas visitas técnicas à fábrica açucareira de Xinavane, onde se teve a oportunidade de observar diretamente os processos industriais e recolher informações relevantes através de entrevistas com técnicos e engenheiros da unidade. Esta etapa foi fundamental para compreender o funcionamento prático dos sistemas em estudo. Em seguida, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica aprofundada, com base em artigos científicos, livros e normas técnicas, de modo a embasar teoricamente o projeto e identificar as melhores práticas da área. Por fim, utilizou-se o software ANSYS Fluent 16.0 para simular e analisar o comportamento do sistema proposto em condições operacionais reais, o que permitiu validar as soluções sugeridas com base em resultados numéricos.

1.4. Estrutura do Trabalho

O capítulo 2 é a revisão da literatura onde é apresentado de forma geral o historial do processamento da cana-de-açúcar em Moçambique e no mundo, é também apresentada as características da biomassa (Bagaço) usada como combustível primário, e do gás de combustão resultante da queima no processo. Por sua vez também dado a conhecer os principais dispositivos

de controle de emissão de material particulado, e por fim apresenta-se o dispositivo proposto para o trabalho, o seu princípio de funcionamento e principais componentes.

No capítulo 3 são definidos os parâmetros que afectam o desempenho do venturi, e com base nos dados reais obtidos na FAX são realizados os cálculos e simulações dos parâmetros necessários para o dimensionamento do sistema de purificação Venturi e determinação da eficiência de colecta do sistema.

No capítulo 4 são feitos cálculos de custos de aquisição, custos de operação do purificador Venturi

No capítulo 5 são apresentados todos procedimentos de manutenção para garantir a integridade dos diferentes componentes do purificador Venturi.

No capítulo 6 é feita uma análise dos resultados obtidos no dimensionamento e simulação do escoamento dos gases pelo Venturi. É também apresentado o dispositivo proposto e as respectivas especificações.

No capítulo 7, aborda de maneira sucinta as conclusões em resposta aos objectivos traçados em função dos resultados encontrados e são apresentadas sugestões e estudos que podem ser feitos a fim de complementar o tema em estudo.

No capítulo 8 está apresentada a bibliografia que foi usada e consultada para elaboração do trabalho.

Por fim, apresenta-se os anexos onde tem tabelas, gráficos, esquemas e desenhos técnicos relativos á projecção purificador Venturi.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cana-de-açúcar

Delgado (2001) afirma que a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é um membro da família gramínea, sendo esta cultivada em climas tropicais e subtropicais, e seus principais constituintes são fibras, açúcar e água. Cuba foi o primeiro país do Caribe a produzir açúcar a partir da cana-de-açúcar. A cana-de-açúcar é originária da Nova Guiné e foi eventualmente propagada através de pequenas ilhas do Oceano Pacífico seguido da Indochina e Índia onde foi inicialmente processado em charope e sumo. Hoje a cana-de-açúcar é uma das culturas mais eficientes do mundo para a produção de açúcar, etanol e energia.

As características da cana-de-açúcar variam tremendamente de uma região para a outra. Dependendo da variedade da cana, clima da região, disponibilidade de água, e da campanha de crescimento da cana que é em média 8 meses (Rein, 2007).



Figura 1. Cana-de-açúcar (Fonte: Google fotos)

2.1.1. Processamento da Cana-de-açúcar

Segundo a Our World in Data, na temporada 2022/23 foram produzidos mundialmente aproximadamente 1,92 bilhões de toneladas de cana-de-açúcar, nesse total tem-se o Brasil como maior produtor com uma produção de cana de açúcar de aproximadamente 725 milhões de toneladas conforme mostra o Gráfico 1.[25]

Em Moçambique o cultivo de cana-de-açúcar para o processamento industrial começou no final do século XIX ao longo dos rios Zambeze e Búzi (Gode, 1997). Recentemente as fábricas de Xinavane e Maragra em Maputo e Mafambisse e Marromeu em Sofala são as que fazem o agro-

processamento de cana-de-açúcar em Moçambique. Em 2022 Moçambique registou uma produção de aproximadamente 3 milhões de toneladas de cana-de-açúcar que é processado para a produção de açúcar. A maior fábrica de agro-processamento de cana-de-açúcar em Moçambique é a açucareira de Xinavane que adquirida em 88% pela empresa sul africana Tongaat hulett no ano de 1998, está situada nas margens do Rio Incomati, produz açúcar a partir da cana-de-açúcar cultivada nas suas próprias propriedades e também em pequenos e grandes produtores. No ano de 2024 a fábrica teve início da sua campanha em Abril e encerramento em Dezembro estima-se que se tenha processado 1,4 milhão de toneladas de cana-de-açúcar, e como resultado produzido 106 mil toneladas de açúcar castanho e 62 mil toneladas de açúcar refinado.[24]

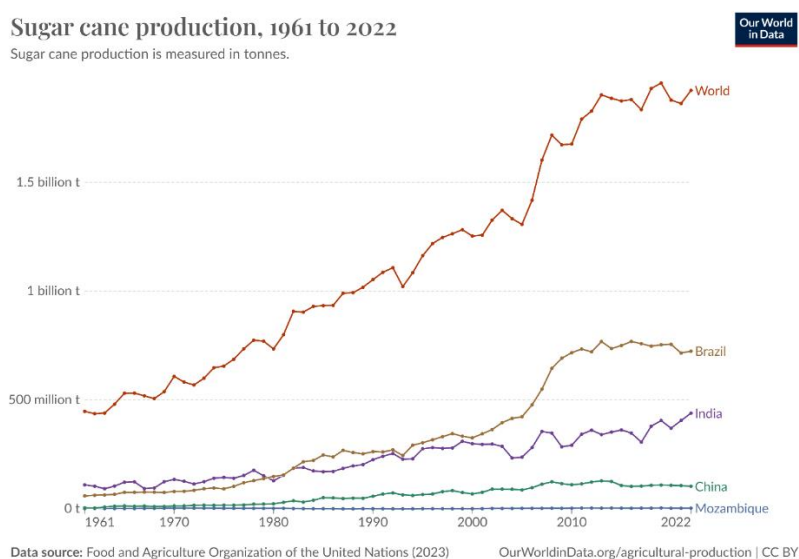


Gráfico 1: Produção de cana-de-açúcar dos maiores produtores do mundo em comparação com Moçambique, 1961 a 2022 (Fonte: www.ourworldindata.org, Adaptado pelo Autor).

2.1.2. Combustível e geração de energia através da biomassa de cana-de-açúcar.

O bagaço É subproduto da cana-de-açúcar depois que extraído o sumo. Por causa da sua disponibilidade, o bagaço é usado como fonte primária de combustível para a geração de vapor para as necessidades do processo. Ao produzir vapor a pressões e temperatura mais altas que o necessário para o uso no processo, o excesso de energia no vapor é usado para o funcionamento de turbinas acionadas a alternadores, transformando a energia mecânica em energia elétrica. A referida energia elétrica é por sua vez utilizada para alimentar motores elétricos acionados à bombas, ventiladores e outras necessidades da fábrica, (Rein, 2007).



Figura 2: *Bagaço depois da secagem, pronto para ser transportado para a caldeira (Fonte: Autor).*

Na fábrica açucareira de Xinavane é usado o bagaço como combustível base. Entretanto é recorrido ao combustível alternativo (carvão mineral), em situações em que o teor de humidade no bagaço estiver acima dos parâmetros aceitáveis, em casos de falha no sistema de transporte do bagaço, ou na inicialização da caldeira.

O bagaço passa por um processo de secagem, e é esperado que após a secagem tenha um teor de humidade na faixa dos 46-50%. De seguida é transportado para a caldeira aquatubular com capacidade nominal de 180 T/h mostrado na Figura 3, a mesma possui uma fornalha com 6 câmaras em que o bagasso é distribuído para a queima.



Figura 3: *Vista exterior da caldeira aquatubular na fábrica açucareira de Xinavane (Fonte: autor).*

2.1.3. Características dos gases de exaustão resultante da queima do bagaço.

Rein (2007) afirma que o poluente mais significativo emitido por caldeiras a bagaço é o material particulado (MP), causado pelo movimento turbulento dos gases de combustão em relação ao bagaço em chamas e às cinzas resultantes. O tamanho das partículas é a característica mais importante que afeta o comportamento no fluxo dos gases. De acordo com a EPA (2002), classifica-se o material particulado principalmente pelo seu diâmetro aerodinâmico, como (a) MP_{10} particulado grosso com diâmetros de 10 μm ou menos; (b) $MP_{2,5}$ particulado fino com diâmetros de 2,5 μm ou menos; (c) $MP_{0,1}$ particulado ultrafino com diâmetros de 0,1 μm ou menos. A Figura 4 ilustra a gama de tamanhos de partículas resultante da queima de bagaço.

A concentração de partículas saindo da caldeira quando o combustível é o bagaço normalmente varia de cerca de 12.500-20.000 mg/Nm^3 . Rein (2007) afirma ainda que números tão altos quanto 24.000 mg/Nm^3 (STP) também podem ser registados. A taxa de emissão é uma função de:

- Teor de cinzas do combustível;
- Teor de humidade do combustível;
- Classificação granulométrica do combustível;
- O tipo e a concepção da fornalha;
- Carga da caldeira.

As emissões de dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x) são menores do que nos combustíveis fósseis convencionais devido aos níveis caracteristicamente baixos de enxofre e nitrogênio associados ao bagaço. Se carvão mineral for usado durante esses períodos, as emissões de CO_2 , SO_2 e NO_x aumentarão, (Rein, 2007).

De acordo com Cohen et al. (2015), o $MP_{2,5}$ presente na atmosfera foi o quinto maior fator de risco de mortalidade em 2015, em que sua exposição levou a cerca de 4,2 milhões de mortes, representando 7,6% do total de mortes globais. A concentração média global de $MP_{2,5}$ aumentou em 11,2% de 1990 (39,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) à 2015 (44,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), em que as maiores exposições encontraram-se em países como Qatar (107,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Arábia Saudita (106,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e Egito (104,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). As maiores causas de morte devido à exposição ao $MP_{2,5}$ foram de isquemia cardíaca, doença cerebrovascular e doença pulmonar obstrutiva crônica.

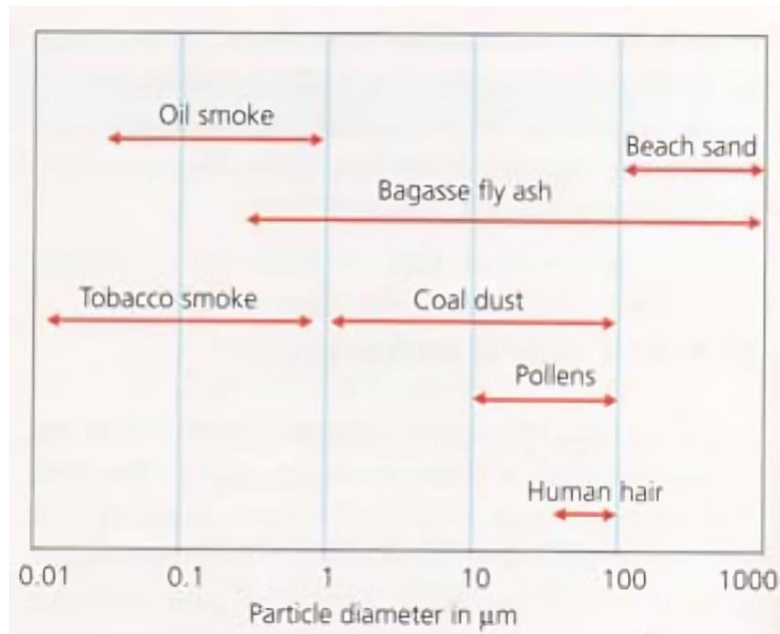


Figura 4: Tamanho típico de partículas (Fonte: Rein, 2007).

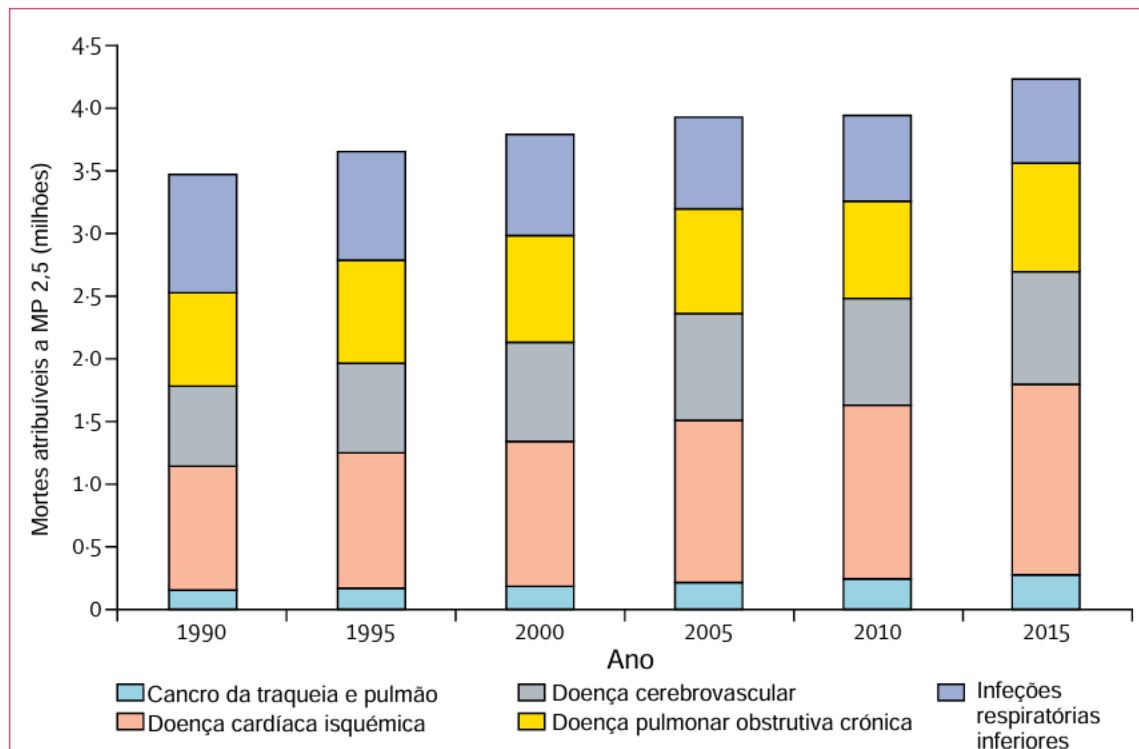


Gráfico 2. Mortes atribuíveis à poluição ambiental por partículas, por ano e causa (Fonte: Cohen et al, 2015).

2.2. Dispositivos de controle de emissão de partículas

Existem quatro (4) formas mais usadas de eliminar particulados dos gases de exaustão. Estas são:

- Filtros de mangas;
- Colectores ciclone;
- Precipitadores electrostáticos;
- Purificadores Húmidos (purificadores Venturi, torres de pulverização, purificadores dinâmicos, etc).

2.2.1. Filtro de mangas

Filtros de mangas fazem parte de uma ampla classe de equipamentos utilizados na separação de partículas sólidas em uma corrente de gases. Formados por sacos de tecidos, que podem estar arranjados em paralelo, têm grande capacidade e eficiência para limpeza, com concentrações de partículas na saída, (Bonna, 2021). Os filtros de mangas normalmente não são usados na indústria da cana-de-açúcar porque as partículas de bagaço presentes nos gases de exaustão encontram-se activados e são facilmente inflamáveis. Esses coletores são, portanto, um risco de incêndio, (Rein, 2007).

2.2.2. Ciclone

Os ciclones são usados para a separação e recuperação de poeira industrial e gases de exaustão. Os ciclones são caracterizados pela sua construção simples e pelo seu baixo custo comparado com outros dispositivos de colecta, (Cooper e Alley, 2010). Na indústria açucareira o ciclone é usado como elemento primário de colecta de partículas, onde esta exerce a função de colectar as partículas mais grosseiras maiores que 10 micrómetros, (Rein, 2007).

2.2.3. Precipitador electrostático

Segundo schiffner e hesketh, (1996) os precipitadores eletrostáticos são utilizados com a finalidade de remover partículas secas dos fluxos de gás. Aplicam basicamente uma carga eletrostática às partículas e fornecem área de superfície suficiente para que as partículas migrem para a placa coletora e sejam capturadas. Este dispositivo tem a vantagem de possuir uma alta eficiência (99%) de colecta de partículas ultrafinas.

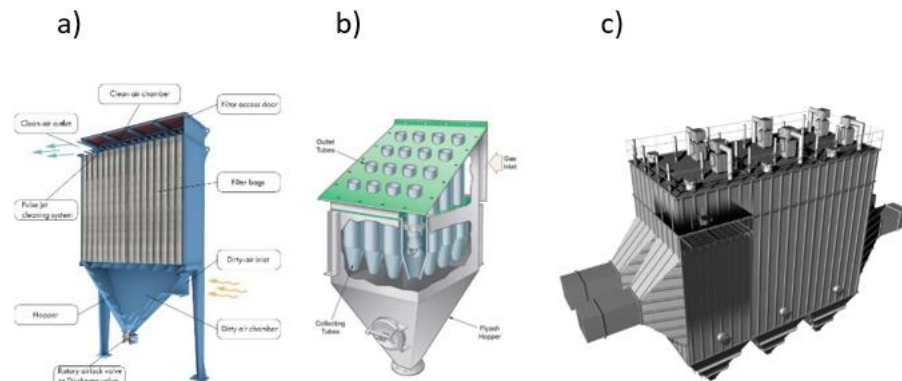


Figura 5. a) Filtro de Mangas; b) Multiciclone; c) Precipitador electrostático.

2.2.4. Purificadores húmidos

Segundo Mussati e Hemmer (2002) o purificador húmido também referido como wet scrubber é um dispositivo de controle de poluição do ar que remove gases, MP e ácidos de fluxos de gases residuais de fontes pontuais estacionárias. Os poluentes são removidos principalmente através da impactação, difusão, interceptação e/ou absorção do poluente em gotículas de líquido.

De acordo com Zerwas (2017), as principais vantagens e desvantagens de se utilizar um purificador de gases com inserção de líquido em relação a um sistema a seco são listadas a seguir:

Vantagens:

- Gases quentes podem ser purificados pelos purificadores a húmido;
- O custo de investimento inicial dos equipamentos de purificador a húmido é geralmente mais barato que outras tecnologias, como por exemplo, precipitadores eletrostáticos;
- Materiais particulados e gases contaminantes podem ser coletados no mesmo equipamento;
- Sistema de purificação geralmente é mais compacto que o sistema a seco.

As principais desvantagens são:

- O custo de se tratar o líquido e o sólido resultante da purificação pode ser elevado.
- Consumo energético pode ser maior do que outras tecnologias, como por exemplo, filtros de mangas;

- Deve-se conhecer bem o sistema que deve ser purificado e suas características, a fim de se projetar o purificador húmido;
- Problemas de corrosão podem ocorrer em alguns sistemas;
- O gás na saída do equipamento estará saturado com água, podendo ocorrer à formação de uma pluma de vapor ou condensação deste.

De acordo com o que foi apresentado acima acerca dos purificadores húmidos em comparação com outros tipos de dispositivos de controle de emissão de partículas, e considerando particularmente que a FAX encontra-se a beira do rio Incomati, constituído uma fonte abundante de água para alimentar o funcionamento de um purificador húmido, o purificador húmido do tipo Venturi é a escolha ideal para este trabalho.

2.3. Purificador Venturi

2.3.1. Princípio de funcionamento do purificador Venturi

A Figura 6, apresenta um esquema típico de um purificador Venturi. Este equipamento é composto por três partes principais: convergência, garganta e difusor ou divergência. A secção transversal pode ser retangular ou circular.

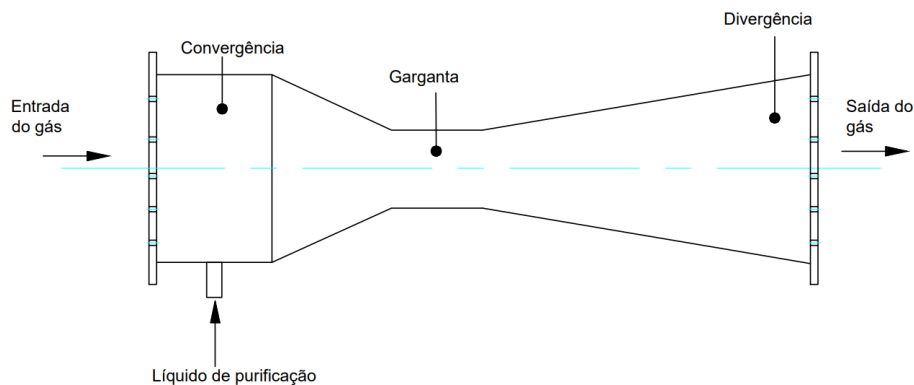


Figura 6. Purificador Venturi de secção circular (Fonte: Autor)

Zerwas (2017) afirma que o funcionamento do purificador consiste em se acelerar o gás contendo partículas na região convergente, uma vez que ocorre uma diminuição da secção transversal, até se atingir velocidades da ordem de 50 a 150 m/s na região da garganta, causando um aumento da energia cinética do fluido por meio da diminuição da pressão. Enquanto o gás é acelerado, o líquido

que fará a purificação é introduzido na forma de uma lâmina de água ou na forma de jatos localizados geralmente antes da secção da garganta do Venturi. Devido ao arrasto proporcionado pelo gás, o jato de líquido se curva no sentido do escoamento, sendo atomizado em pequenas gotas por meio da alta tensão de cisalhamento proporcionada pelo gás. O mesmo ocorre para o líquido que escoar na parede do purificador, o qual sofre deformações e é atomizado, devido também à tensão cisalhante.

Com a atomização do líquido, o sistema composto pelo gás, partículas de contaminante e as gotas de líquido passam pela secção convergente do purificador, conforme descrito anteriormente, ocorrendo um aumento da velocidade do sistema. Devido às gotas de líquido possuírem um diâmetro maior que as do material particulado, essas possuem uma inércia maior e necessitam de um tempo maior para serem aceleradas, diferentemente do material particulado, o qual é acelerado rapidamente, criando-se assim uma velocidade relativa entre as duas fases e proporcionando o choque das partículas com as gotas de líquido, (Zerwas, 2017).

Após a passagem do sistema pela garganta, as partículas de líquido sofrem desaceleração na região divergente do equipamento, uma vez que a quantidade de movimento dessas é trocada com o gás, recuperando-se desta forma, uma parcela da queda de pressão estática. Nesta região divergente, o processo de coleta de partículas ocorre de forma inversa ao descrito na secção da garganta, ou seja, as gotas com diâmetro maior são desaceleradas mais lentamente e colidem com as gotas e partículas menores, que foram desaceleradas mais rapidamente por possuírem inércia menor, (Zerwas, 2017).

2.4. Mecanismos de colecta das partículas nos gases de exaustão

A coleta de material particulado pelo líquido injetado no purificador Venturi ocorre pelo seguinte princípio: o líquido injetado no purificador é atomizado em pequenas gotas, devido à passagem do gás contendo material particulado a alta velocidade na entrada do equipamento; o material particulado, o qual é arrastado juntamente com o gás, se choca com estas gotas de líquido e é aderido por essas, podendo a gota de líquido colidir com outras e assim aumentar o seu tamanho, (Cooper e Alley, 2010).

Quando os gases de exaustão em fluxo se aproxima de uma gota de água, as linhas de fluxo do fluido serão divergidas em torno dessa gota de água. Entretanto as partículas nos gases por conta

da inércia não seguirão exactamente as linhas de fluxo que se divergem do obstáculo, mas estas partículas tenderão a continuar a sua trajetória original, assim se a partícula tiver inércia suficiente colidirá com a gota de água e será colectada, (Cooper e Alley, 2010).

Os métodos de colecta de partículas pelo purificador são apresentados a seguir:

- Impactação inercial;
- Intercepção;
- Difusão.

2.4.1. Impactação inercial

A impactação inercial é o mecanismo de captura que mais predomina quando se está a remover o material particulado dos gases de exaustão. As partículas contêm muito mais inércia quando em movimento que o gás envolvente (EPA, 1982). A Figura 7, mostra uma gota alvo a ser atingida por uma partícula. A partícula tem inércia suficiente para seguir a trajetória prevista para a gota. Uma vez dentro da gota, o tamanho combinado da partícula/gota é aerodinamicamente muito maior, pelo que a tarefa de separação se torna mais fácil, basta separar a gota do fluxo de gás e remove-se as partículas, (Schiffner, 2002). O cálculo da eficiência de colecta em sistemas Venturi para partículas que se comportam inercialmente tem em consideração o parâmetro de impactação inercial (K_p) que é o número de Stokes:

$$K_p = \frac{\rho_L * d_p^2 * u_g}{9 * \mu_G * d_d}, \text{adimensional} \quad (1.0)$$

Onde: K_p = parâmetro de impactação inercial;

ρ_L = Massa específica do liquido;

μ_G = viscosidade do gás;

d_d = diâmetro médio da gota;

u_g = velocidade do gás;

d_p = diâmetro aerodinâmico da partícula.

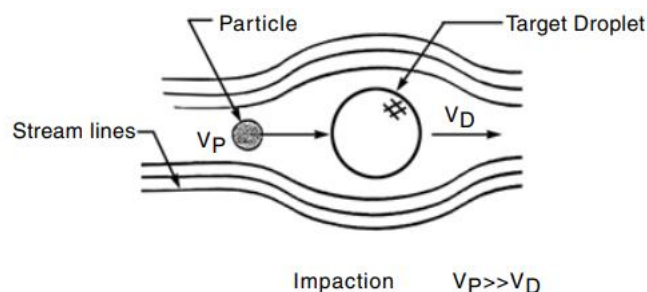


Figura 7: *Impactação de uma partícula em uma gota de líquido (Fonte: Schiffner, 2002)*

2.4.2. Intercepção

A separação das partículas do fluxo de gás pode também ser feita através de um mecanismo conhecido como intercepção. A partícula é interceptada pelo obstáculo (gota de água) se o raio da partícula for tão grande ou maior que o deslocamento da linha de fluxo. Partículas com diâmetro aerodinâmico na faixa de $2\text{-}10\ \mu\text{m}$ são susceptíveis a intercepção, (Schiffner, 2002). A Figura 8, mostra uma partícula, a mover-se ao longo das linhas de fluxo de gás e a ser interceptada na superfície da gota. A partícula, neste caso, aproxima-se o suficiente da superfície da gota para ser atraída e combinar-se com a gota. A intercepção é similar, e pode ser considerada uma forma de impactação.

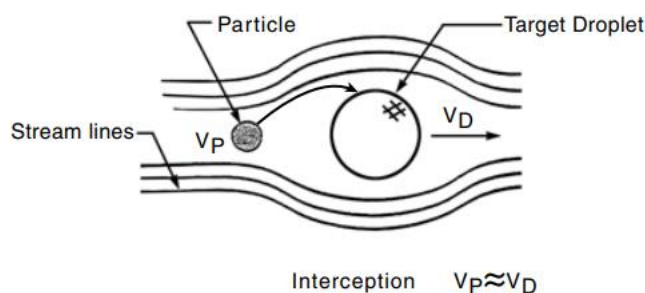


Figura 8: *intercepção de uma partícula em uma gota de líquido (Fonte: Schiffner, 2002)*

2.4.3. Difusão

Partículas na mesma faixa de tamanhos que moléculas experenciam movimentos aleatórios devido a colisões com as moléculas de gás. A Figura 9, mostra uma partícula ainda mais pequena, que é tão pequena que salta na corrente de ar em movimento, fustigada pelas moléculas de água e de gás.

Neste caso, a partícula difunde-se para a gota e, por acaso, é absorvida pela gota. Para aumentar as chances de captura por difusão, é necessário aumentar o número de gotas por unidade de volume. Isto diminui a distância que a partícula tem de percorrer e reduz as chances de não atingir uma gota, (Schiffner, 2002). A difusão de uma partícula pode ser determinada pela equação de Stokes-Einstein:

$$D_p = \frac{C * K * T}{3 * \pi * \mu_G * d_p}, \text{ adimensional} \quad (1.1)$$

D_p = Difusibilidade da partícula

C = Factor de correlação de Cunningham

K = Constante de Boltzman

T = Temperatura do gás

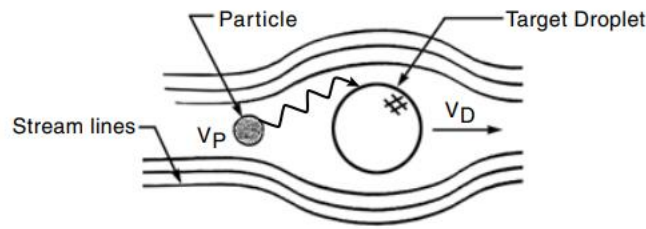


Figura 9: Interceptação de uma partícula em uma gota de líquido (Fonte: Schiffner, 2002)

2.4.4. Configuração e operação do purificador Venturi

Os purificadores Venturi podem ser divididos em três tipos básicos, baseados na energia necessária para purificar o gás residual e movê-lo através da unidade. Estes são classificados em Venturi de baixa, média e alta energia.

2.4.4.1. Venturi de baixa energia

Também denominado Venturi “jato”, o líquido de purificação pressurizado é injetado na garganta. Este tipo de Venturi opera com baixas perdas de carga. Um venturi a jato tem uma menor eficiência de recolha de material particulado fino quando comparado com um Venturi convencional, (Mussatti e Hemmer, 2002).

2.4.4.2. Venturi de média energia

Num Venturi de média energia, um dispositivo externo, normalmente um ventilador de corrente-induzida, transfere energia para o fluxo de líquido-gás. O ventilador pode estar localizado a montante ou a jusante da unidade Venturi. O design básico do purificador Venturi é muito eficiente na remoção de MP_{10} , tanto do ponto de vista de custo como de desempenho, (Mussatti e Hemmer, 2002).

2.4.4.3. Venturi de alta energia

Um Venturi de “alta energia” proporciona uma maior eficiência de recolha para MP fino e submicrométrico. Um sistema de alta energia utiliza um ventilador de grande diâmetro para criar uma elevada queda de pressão do gás até 100 in.WC (24900 Pa). Isto aumenta muito a velocidade do gás residual antes de entrar na garganta e resulta numa elevada eficiência de recolha. No entanto, os custos de capital e os requisitos de energia eléctrica para sistemas de alta energia são muito mais elevados do que os de um venturi convencional. O volume de líquido de “compensação” inclui também o volume de água que é perdido devido à evaporação pelo gás residual quente, (Mussatti e Hemmer, 2002).

2.4.5. Sistema de armazenamento e distribuição de água de purificação

O sistema de armazenamento e distribuição de líquidos é composto por uma estação de tratamento de águas residuais (ETAR), bomba, filtros, válvulas, tubagens, manómetros e medidores de caudal. A maioria dos sistemas funciona em ciclo fechado, o que significa que o líquido de purificação utilizado é recirculado através do sistema de purificação. Como o líquido de purificação é reciclado, o teor de sólidos do líquido aumenta à medida que o MP é recolhido. A concentração de sólidos num sistema de reciclagem deve ser mantida abaixo de um limite de projecto ou as características de pulverização do sistema não podem ser mantidas, (Mussatti e Hemmer, 2002). Como mostra a figura 10, a decantação é uma forma muito usada na indústria açucareira para reduzir a quantidade de particulados e cinzas no líquido de recirculação. Porém quando a quantidade de sólidos no líquido de recirculação torna-se grande o suficiente para comprometer o desempenho do purificador Venturi, parte dele é sangrado do sistema e é adicionado um novo líquido de purificação, (Innocentini et al, 2021).

Mussatti e Hemmer (2002) ainda afirmam que após sair do tanque, o líquido de purificação flui para uma bomba para aumentar a pressão e o caudal até aos valores necessários ao bom

funcionamento do purificador Venturi. Os manómetros e os caudalímetros a jusante da bomba monitorizam o caudal do líquido e o funcionamento da bomba.



Figura 10: Estação de tratamento de águas residuais na FAX (Fonte: autor)

2.4.6. Sistema de injeção de líquido

O sistema de injeção de líquido num purificador tem como objetivo proporcionar uma distribuição uniforme de gotículas de líquido de tamanho adequado para o contacto com partículas na zona de mistura. Para tal, devem ser seleccionados bicos que atomizem adequadamente o líquido. Existem dois sistemas básicos para injetar líquido num purificador Venturi: tubo aberto e bicos de pulverização (EPA, 1982).

2.4.6.1. Tubo aberto

Num sistema de tubo aberto, vários tubos de pequeno diâmetro alimentam o líquido de purificação na secção da conduta. Os tubos injetam o líquido tangencialmente, ao longo das paredes da conduta ou radialmente contra placas defletoras. A água flui para baixo, cobrindo as paredes da conduta. O sistema de tubagem é concebido de forma a que toda a superfície da secção seja inundada com o líquido. Na secção da garganta, o fluxo de gás residual torna-se muito turbulento e o líquido de purificação é cisalhado para formar uma dispersão de gotículas. Os sistemas de tubagem aberta têm custos de capital e de O&M mais baixos do que os bicos de pulverização devido à sua concepção mais simples (EPA, 1982).

2.4.6.2. Bicos de pulverização

Os sistemas de bicos de pulverização são por vezes designados por “Venturi a jacto”. Estes sistemas injectam líquido através de bicos para criar um padrão de pulverização de gotículas finas. As gotas podem ser produzidas pneumaticamente ou hidraulicamente utilizando cabeças de bicos especialmente concebidas para o efeito. Embora os bicos de pulverização melhorem a mistura entre o líquido de purificação e o gás residual, têm geralmente custos de capital e de funcionamento mais elevados do que os sistemas de tubagem aberta, devido à maior potência da bomba necessários para este tipo de sistema, (EPA, 1982).

2.4.7. Secção da garganta do Venturi

Existe enumeras configurações da garganta do Venturi que está comercialmente disponível, as principais são garganta fixa e garganta variável.

2.4.7.1. Garganta fixa

Um Venturi de garganta fixa é o tipo mais simples. A secção da garganta pode ser circular ou retangular, dependendo do formato da conduta do sistema de gás residual atual. As gargantas retangulares estão geralmente limitadas a uma largura de aproximadamente 25 cm. devido a considerações de mistura, as gargantas fixas circulares são normalmente utilizadas em aplicações de alta pressão (EPA, 1982).

2.4.7.2. Garganta variável

Os venturis de garganta variável são mais variados no design, mas cada um possui a mesma função de permitir o ajuste da área da garganta ao operador, (Schiffner e Hesketh, 1996). A queda de pressão e o desempenho do Venturi dependem parcialmente da velocidade do gás através do Venturi. Muitas variações do purificador Venturi padrão foram desenvolvidas para permitir que as dimensões da garganta sejam alteradas à medida que a taxa de fluxo de gás muda. Um sistema de controlo pode ser incorporado no dispositivo de garganta variável. O ajuste automático da garganta é normalmente utilizado onde as condições de fluxo variam muito e são necessários ajustes frequentes. A complexidade de uma garganta variável aumenta os custos de capital e de O&M do Venturi (Mussatti e Hemmer, 2002).

2.4.8. Câmara de recolha e eliminador de gotas

2.4.8.1. Câmara de recolha

Após a coleta do material particulado pelas gotas de líquido no purificador Venturi, deve-se separar estas gotas do gás purificado, ou caso contrário, o material contaminante continuará incorporado nele. Desta forma, é necessário um processo de separação, o qual ocorre pela utilização da câmara de recolha. Devido à câmara possuir uma área de secção transversal grande, a fase gasosa escoar com velocidade baixa o suficiente para que gotas suficientemente grandes não sejam arrastadas, ocorrendo a sedimentação dessas no fundo da coluna, (Mussatti e Hemmer, 2002).

A câmara de recolha pode ser uma torre simples ou um ciclone. Os modelos de ciclones melhoram a remoção de líquidos e partículas do fluxo de gases residuais utilizando a impactação e a gravidade. No entanto, resultam em maiores quedas de pressão dos gases residuais e custam mais do que uma simples torre, (Mussatti e Hemmer, 2002).



Figura 11. Câmara de recolha de gotas do tipo ciclone (Fonte: www.directindustry.com)

2.4.8.2. Eliminador de gotas

Schiffner e Hesketh (1996) afirmam que os eliminadores de gotas removem entre 90% e 99% das gotículas de líquido do fluxo de gás residual. Existem dois modelos básicos: eliminadores de gotas em forma de chevron e de malha conforme mostra a Figura 12, as gotículas acumulam-se e fundem-se nas lâminas ou malhas de chevron. Quando as gotículas se tornam suficientemente

grandes, caem por gravidade ou por ação capilar. Os eliminadores de gotas com malha podem ficar obstruídos pelas partículas, pelo que os designs em chevron são aplicados com mais frequência. Todos os eliminadores de gotas requerem lavagem periódica para remover a acumulação de MP.

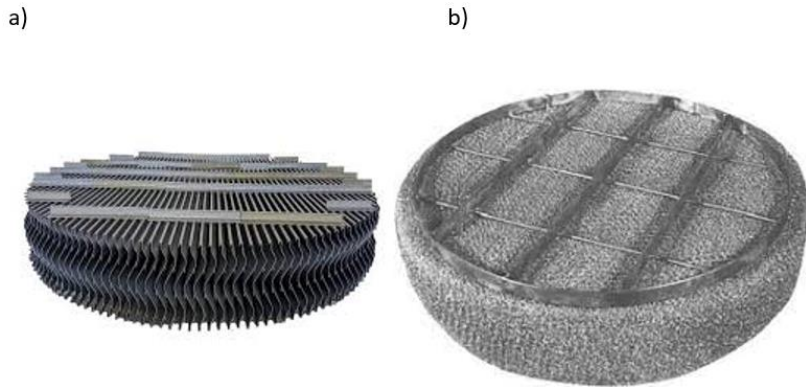


Figura 12. a) Eliminador de gotas Chevron; b) Eliminador de gotas em malha. (Fonte: Google fotos)

2.5. Equipamentos auxiliares

A FAX dispõe actualmente de uma bomba vertical mostrada no anexo 5, que é responsável por bombear líquido da ETAR para o sistema de Multiciclone. Também dispõe de ventiladores de corrente forçada e induzida que é mostrada na Figura 13, estes são responsáveis por introduzir ar na caldeira e acelerar os gases de exaustão respectivamente.



Figura 13: a) ventilador de corrente-forçada ; b) ventilador de corrente-induzida. (Fonte: autor)

2.6. Materiais de construção

Segundo a EPA (1982), Os materiais de construção para aplicações de purificadores devem ser cuidadosamente seleccionados para resistir a agentes corrosivos e abrasivos nos gases ou líquidos e para suportar quaisquer temperaturas elevadas que possam ocorrer. Se as condições do processo forem corretamente definidas antes do início do projecto, o fabricante experiente de purificadores pode conceber um que resista ao seu ambiente de serviço. No entanto, muitos purificadores falham porque são seleccionados materiais inadequados após uma investigação superficial das condições do processo, ou porque são substituídos materiais insuficientemente resistentes para reduzir os custos.

A investigação de cada aplicação de purificador deve incluir a análise química das matérias-primas, dos produtos de combustão e dos líquidos de purificação. Os históricos de funcionamento de quaisquer instalações de depuradores em aplicações semelhantes também devem ser revistos. Finalmente, recomenda-se a revisão da literatura sobre desempenho dos materiais, (EPA, 1982).

Após a recolha de todas as informações relevantes, o projectista prepara uma lista de materiais adequados para o serviço previsto. A seleção dos materiais de construção a partir desta lista de candidatos basear-se-á, em parte, nos custos relativos, (EPA, 1982).

Tabela 1. Materiais usados para o fabrico de Purificadores húmidos e suas propriedades.

Material	Propriedades/utilidades	Resistência a corrosão
Aço carbono	Boa resistência, ductilidade e trabalhabilidade; baixo custo	De razoável a mau em muitos ambientes; pH baixo e/ou elevado teor de sólidos dissolvidos em serviço húmido ou de imersão levam à corrosão; os revestimentos protetores aplicados corretamente proporcionam uma proteção adequada em muitas aplicações; suscetível à corrosão galvânica quando

		acoplado a ligas de cobre ou aços inoxidáveis
Aço inoxidável martensítico (410, 416, 420, 440c)	Liga de cromo, temperável por tratamento térmico; normalmente utilizado para peças de máquinas; custa 2 a 5 vezes mais que o aço carbono	Bom
Aço inoxidável austenítico	Liga de cromo e níquel; não endurecível pelo calor; endurecível por trabalho a frio; não magnético	Excelente; melhor que o aço inoxidável martensítico ou ferrítico.
304L	Modificado para soldabilidade	Resistência superior à corrosão; boa resistência aos ácidos; resistente para ácidos orgânicos quentes;
316L	Utilizado em ambientes corrosivos	Resistência superior à corrosão; boa resistência aos ácidos; resistente para ácidos orgânicos quentes;

3. DIMENSIONAMENTO DO PURIFICADOR VENTURI

A engenharia de aplicação de equipamentos de controlo de poluição atmosférica exige um conhecimento do processo ao qual o sistema será aplicado e do equipamento específico que será utilizado para controlar as emissões. A engenharia de aplicações precisa ter em conta determinados cálculos, estes cálculos servem para fornecer dados de vazão de gás a partir dos quais a vazão de líquido, a queda de pressão, a remoção de gotículas, a taxa de evaporação e os dados de proporção do equipamento são derivados.

A FAX possui actualmente um sistema de controle de emissão de partículas do tipo multiciclone. O multiciclone apresenta baixa eficiência para colectar partículas finas ($<5 \mu m$), que ao serem expulsas pela chaminé ficam suspensas no ar atmosférico aumentando substancialmente a poluição

atmosférica e perigando a saúde dos operários da fábrica e população que reside nas vizinhanças tendo efeitos no sistema respiratório.

Portanto neste trabalho propõe-se a substituição do multiciclone em funcionamento na FAX por um purificador húmido do tipo Venturi, para tal deverá se proceder com:

- Determinação das Propriedades dos gases de exaustão no interior e na saída do sistema venturi;
- Cálculo e análise dos parâmetros de desempenho;
- Cálculo e análise da eficiência de colecta;
- Cálculo dos Custos de aquisição, instalação e operação;

Além dos cálculos acima apresentados, deverão ser definidos os procedimentos de manutenção.

3.1. Parâmetros de dimensionamento do sistema venturi

Os parâmetros que afectam o desempenho global de um purificador Venturi são:

- Distribuição do tamanho de partículas;
- Velocidade do gás e queda de pressão;
- Rácio líquido-gás;
- Tamanho da gota.

3.1.1. Distribuição do tamanho de partículas

Mussatti e Hemmer (2002) afirmam que a eficiência de um purificador Venturi depende altamente da distribuição de tamanho de partículas no fluxo dos gases de exaustão por conta das características fundamentais da impactação inercial intercepção e difusão. A distribuição determina o mecanismo de captura que será dominante. Qualquer dispositivo de controle de partículas é mais eficiente colectando as partículas de maiores dimensões, e isso não é excepção para os purificadores Venturi, no qual se verifica um crescimento exponencial da eficiência com o aumento do tamanho da partícula. A Tabela 2, mostra a distribuição do tamanho de partículas e os cumulativos referentes a fábrica açucareira de Xinavane.

Tabela 2: Distribuição real de tamanho das partículas nos gases de exaustão correspondente a FAX (Fonte: Howden Energy Systems).

Faixa de Tamanhos (μm)	Cumulativo (%)		
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
0 - 0,6	0	0,15	0,39
0,6 - 1,0	0	0,15	0,42
1,0 - 3,0	0,03	0,36	0,74
3,0 - 5,0	0,07	0,9	1,37
5,0 - 10,0	1,59	3,47	4,13
10,0 - 20,0	9,17	12,4	13,32
20,0 - 30,0	20,38	24,26	25,28
30,0 - 40,0	33,15	37,21	38,26
40,0 - 50,0	46,16	50,11	51,13
50,0 - 60,0	58,59	62,26	63,12
60,0 - 70,0	74,96	77,9	78,7
75,0 - 150,0	90,4	90,67	90,87
>150	100	100	100

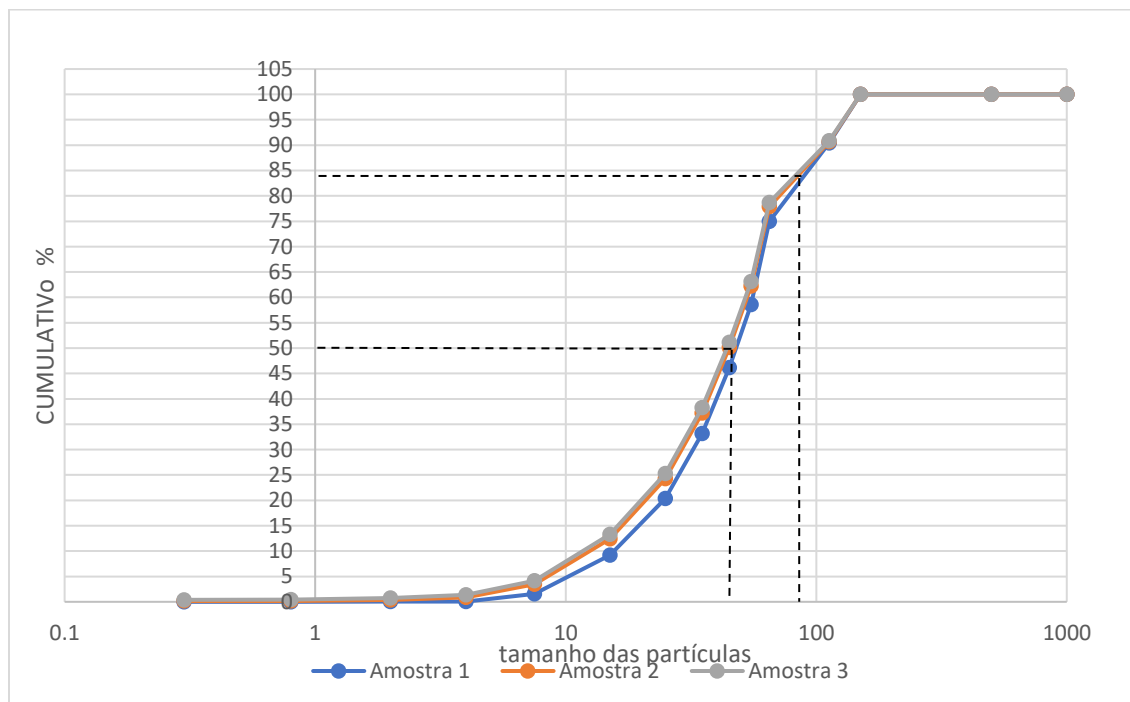


Gráfico 3: Distribuição de tamanho das partículas nos gases na saída da caldeira correspondente a fábrica açucareira de Xinavane (Fonte: Autor).

3.1.2. Razão líquido-gás

A razão líquido-gás também expressa como $\left(\frac{Q_L}{Q_G}\right)$, é o volume de líquido de purificação injectado por volume de gás que passa pelo tubo Venturi. Em geral níveis altos de $\left(\frac{Q_L}{Q_G}\right)$ aumentam a eficiência de colecta do sistema Venturi, uma vez que a densidade das gotas do líquido de purificação é maior. A razão líquido-gás em purificadores Venturi varia de 2 a 20 gal/1000ft³ (0,267 a 2,67 l/m³), Conforme mostra a Tabela 3. A medida que se aumenta o rácio líquido-gás, aumenta também os custos de operação devido a um maior uso do líquido de purificação e da bomba, por isso é de extrema importância a devida escolha desse parâmetro porque existirá sempre um valor de $\left(\frac{Q_L}{Q_G}\right)$ acima do qual a performance do sistema Venturi deixará de aumentar significativamente, (Mussatti e Hemmer, 2002).

Tabela 3: Parâmetros de operação para purificadores húmidos (Fonte: Mussatti, 2002)

Scrubber Type	Pressure Drop (in. H ₂ O)	L/G Ratio (gal/1000 acf)	Liquid Pressure (psig)	Gas Velocities (ft/sec)	Cut Diameter (µm)
Spray Tower	0.5-3	0.5-20	10-400	10	2-8
Cyclonic	2-10	2-10	10-400	105-140b	2-3
Venturi	10-150	2-20	0.5-2	90-400c	0.2

3.1.3. Velocidade do gás e queda de pressão

O aumento da velocidade relativa entre o gás de exaustão e o líquido de purificação aumenta o momento das partículas permitindo que as partículas mais pequenas sejam colectadas por impactação. A velocidade normalmente é aumentada estreitando a garganta, injectando o líquido no sentido contrário à corrente de gás, ou pulverizando o líquido na garganta (Mussatti e Hemmer, 2002). Dependendo do tipo de sistema Venturi, a velocidade do gás na garganta pode variar de 45 a 150 m/s.

A queda de pressão é um factor crucial na operação de um purificador Venturi, ela refere a redução da pressão no momento em que o gás passa pela garganta do purificador onde a velocidade do gás é mais alta. A queda de pressão é diretamente ligada a velocidade do gás e quanto maior for a queda maior será a velocidade do gás que passa pela garganta. Entretanto a queda de pressão é essencial para criar o diferencial de velocidade necessário para uma maior eficiência na remoção

das partículas, conforme mostra o Gráfico 4, a queda de pressão está directamente ligada aos requisitos de potência dos ventiladores para manter o escoamento (Fox, Robert W. et al, 2006). Na prática são usados purificadores Venturi que operam com queda de pressão na faixa de 10 a 100 in. H_2O (2490 a 24900 Pa).

A queda de pressão em um purificador Venturi industrial pode ser estimada pela equação de Yung et al. (1977):

$$\Delta P = 2 * \rho_L * V_G^2 * \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) * \left(1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right), \quad Pa \quad (1.2)$$

Para deixar a equação menos tediosa considera-se X igual a:

$$X = \frac{3 * l_g * C_D * \rho_g}{16 * d_d * \rho_L} + 1$$

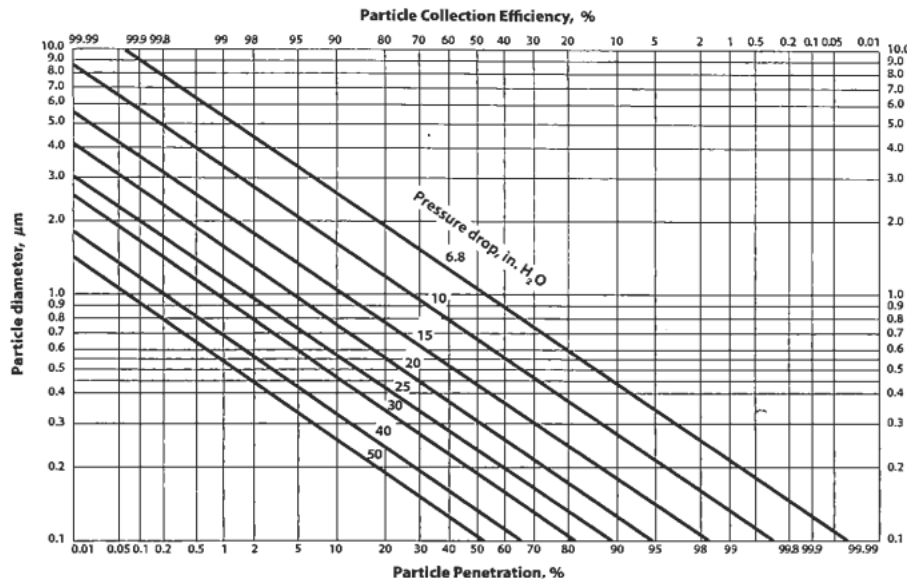


Gráfico 4: Eficiência de colecta como função do tamanho da partícula e queda de pressão em purificadores Venturi (Fonte: Lawrence, 2004)

3.1.4. Tamanho da gota

Mussatti e Hemmer (2002) afirmam que existe um tamanho da gota ideal na qual a eficiência de colecta das partículas é máxima, as gotas mais pequenas capturam mais partículas por volume de líquido injectado, entretanto, se o tamanho da gota for demasiado pequeno o momento do gás de exaustão pode ser transmitido às gotas que irão reduzir a velocidade relativa entre as gotas e as

partículas. Em purificadores Venturi o tamanho das gotas são controlados através do rácio líquido-gás e da velocidade do gás na garganta. O diâmetro médio da gota d_d pode ser determinado pela relação de Nukiyama-Tanasawa:

$$d_d = \frac{58600}{u_g} * \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho_L}\right)} + 597 * \left[\frac{\mu_L}{\sqrt{(\sigma * \rho_L)}}\right]^{0,45} * \left(1000 * \frac{Q_L}{Q_G}\right)^{1,5}, \quad \mu m \quad (1.3)$$

3.2. Cálculo do purificador Venturi

3.2.1. Propriedades dos gases de exaustão

As propriedades físicas e químicas dos gases de exaustão são dados para o devido dimensionamento de um sistema de purificação e para a escolha adequada dos materiais de fabricação. Mussatti e Hemmer (2002) afirmam que as propriedades físicas e químicas dos gases de exaustão tem um impacto directo nos custos de capital e anuais relacionados ao purificador. A Tabela 4, mostra os dados de entrada necessários para o cálculo das propriedades dos gases de exaustão na saída do purificador Venturi.

Tabela 4: Dados de entrada para o cálculo das propriedades dos gases de exaustão.

Parâmetro	Significado	Unidade no SI	Unidade para efeitos de cálculo
$Q_{G(ent)}^a$	Vazão volumétrica do gás na entrada	136,8 Am ³ /s	289862,78 acfm $\cong$ 197945,76 scfm
$T_{entrada}^a$	Temperatura de entrada	148,5 °C	300 °F
M_{ar}^b	Massa molar do ar	28,97 kg/kmol	28,97 lbm/lbmol
M_{va}^b	Massa molar do Vapor de água	18,015 kg/kmol	18,015 lbm/lbmol
V_{mol}^b	Volume de um lb-mole de ar		385 ft ³
$\theta_{H_2O}^a$	Teor de humidade	29,1%	

(a) Parâmetros reais da FAX;

(b) Parâmetros obtidos em literatura.

Vazão mássica do ar seco ($\dot{m}_{a(ent)}$) e vazão mássica do vapor de água ($\dot{m}_{va(ent)}$)

$$\dot{m}_{a(ent)} = [Q_{G(ent)} * (1 - \theta_{H_2O(ent)})] * \frac{M_{ar}}{V_{mole}}, \quad lb/min \quad (2.0)$$

$$\dot{m}_{va(ent)} = [Q_{m(in)} \times \theta_{H_2O(in)}] \times \frac{MW_{wv}}{V_{mole}}, \quad lb/min \quad (2.1)$$

A humidade absoluta na entrada do venturi (ω) é dada pela razão entre a massa do vapor de água pelo ar seco:

$$\omega = \frac{\dot{m}_{va(ent)}}{\dot{m}_{a(ent)}}, \quad adimensional \quad (2.2)$$

Pela carta psicrométrica para altas temperaturas da Figura 14, retira-se os valores de *Temperatura de saturação* (T_{sat}), *humidade absoluta na saturação* (ω_{sat}) e *volume húmido* (V_H).

As propriedades dos gases de exaustão na saída do venturi podem ser determinadas. Atravé do volume húmido determina-se a vazão volumétrica do gás na saída do scrubber ($Q_{G(saída)}$):

$$Q_{G(saída)} = V_H \times \dot{m}_{a(ent)}, \quad scfm \quad (2.3)$$

Por sua vez tendo a humidade absoluta na saturação procede-se com a determinação da vazão mássica do vapor de água na saída do sistema Venturi ($\dot{m}_{va(saída)}$):

$$\dot{m}_{va(saída)} = \omega_{sat} * \dot{m}_{a(ent)}, \quad lb/min \quad (2.4)$$

A água evaporada do líquido de purificação, causada pela saturação adiabática dos gases de exaustão é determinada pela equação ($\dot{m}_{va(evap)}$):

$$\dot{m}_{va(evap)} = \dot{m}_{va(saída)} - \dot{m}_{va(ent)}, \quad lb/min \quad (2.5)$$

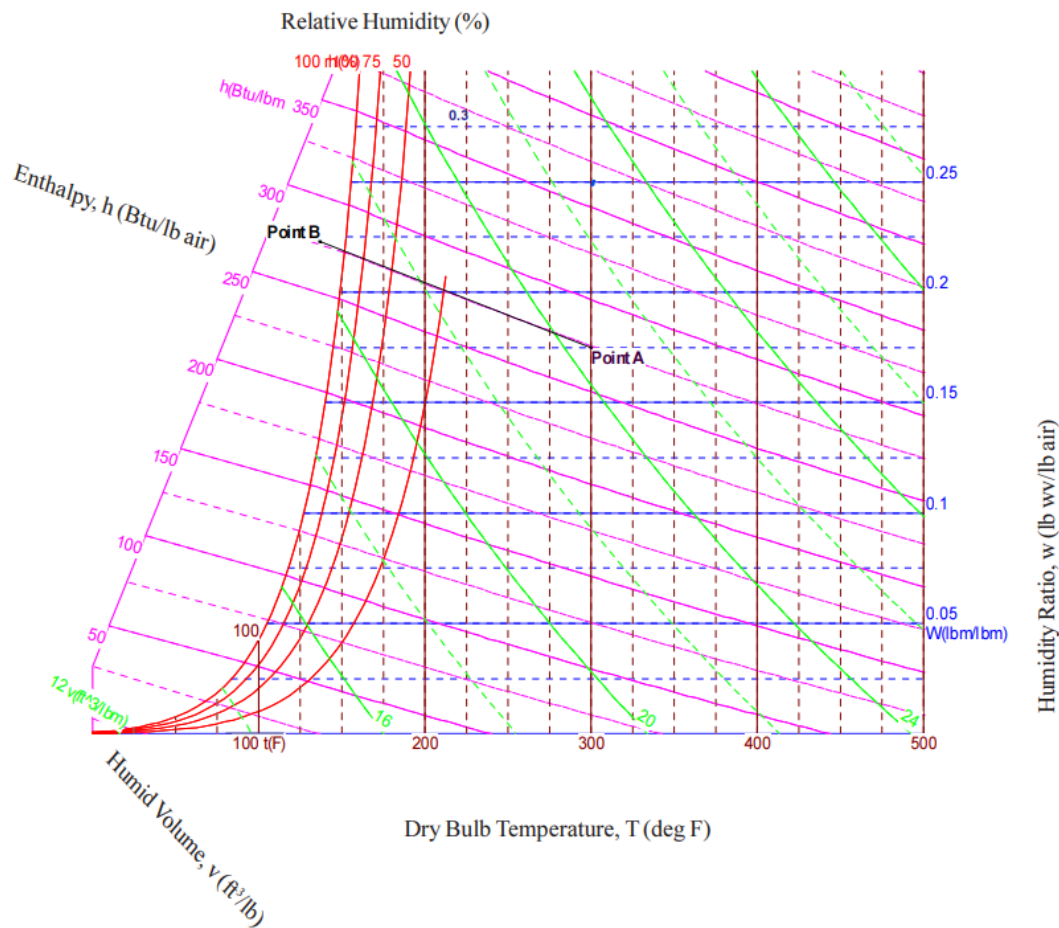


Figura 14. Carta Psicrométrica para altas temperaturas (Fonte: Mussatti, 2002).

3.2.2. Determinação dos parâmetros relacionados ao desempenho do Purificador Venturi

Na presente etapa pretende-se determinar os parâmetros que mais directamente afectam a eficiência de colecta e os custos de aquisição e operação do sistema Venturi. É importante acrescentar que as fórmulas usadas são resultado de aproximações e assumpções portanto é recomendável que se use as unidades de medida propostas de modo a obter resultados mais precisos. A tabela 5, ilustra os dados tomados como entrada para o cálculo dos parâmetros de desempenho.

Tabela 5. Dados de entrada para cálculo dos parâmetros de desempenho do sistema Venturi.

Parâmetro	Significado	Valor/Unidade no SI	Valor/Unidade para efeitos de cálculo
ρ_L^b	Massa específica da água a temperatura de 25°C	1000 Kg/m ³	1 g/cm ³
ρ_G^a	Massa específica do gás de exaustão a temperatura de 148,5°C	0,744 Kg/m ³	0,000744 g/cm ³
μ_L^b	Viscosidade da água a temperatura de 25°C	8,93 * 10 ⁻⁴ Ns/m ²	0,00893 poise
μ_G^a	Viscosidade do gás de exaustão a temperatura de 148,5°C	2,41 * 10 ⁻⁵ Ns/m ²	0,000241 poise
σ^b	Tensão superficial da água a temperatura de 25°C	0,0720 N/m	72 dyne/cm
Q_G/Q_L^b	Razão líquido-gás	1,3 l/m ³	0,0013 m ³ /m ³

(a) Parâmetros reais da FAX;

(b) Parâmetros obtidos em literatura.

3.2.2.1. Cálculo da queda de pressão

Uma das formas de estimar o desempenho de um sistema Venturi é através da queda de pressão que pode ser estimada pela equação (1.2):

$$\Delta P = 2 * \rho_L * V_G^2 * \left(\frac{Q_L}{Q_G} \right) * \left(1 - X^2 + \sqrt{X^4 - X^2} \right), \quad Pa$$

$$X = \frac{3 * l_g * C_D * \rho_g}{16 * d_d * \rho_L} + 1$$

O primeiro parâmetro por determinar na busca da queda de pressão é o diâmetro médio da gota (d_d), dada pela equação (1.3)

$$d_d = \frac{58600}{u_g} * \sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho_L}\right)} + 597 * \left[\frac{\mu_L}{\sqrt{(\sigma * \rho_L)}}\right]^{0,45} * \left(1000 * \frac{Q_L}{Q_G}\right)^{1,5}, \quad \mu m$$

A seguir determina-se o número de Reynoulds (R_e), é importante frisar que é favorável ao processo de colecta que gás de exaustão que é escoado pelo tubo Venturi esteja em regime turbulento $R_e > 2300$. O fluxo de ar mais turbulento ajuda a fragmentar a água em gotículas mais pequenas, resultando num aumento da superfície de contacto líquido-gás (Lawrence, 2004).

$$R_e = \frac{d_d * u_g * \rho_G}{\mu_G}, \quad \text{adimensional} \quad (4.0)$$

Tendo o número de Reynoulds pode-se determinar o Coeficiente de arrasto para gotas com diâmetro médio Sauter (C_D):

$$C_D = \frac{24}{R_e} + \frac{4}{(R_e)^{1/3}}, \quad \text{adimensional} \quad (4.1)$$

3.2.2.2. Cálculo da eficiência fracçãoária e geral do purificador Venturi

A eficiência de colecta do sistema Venturi para partículas com diâmetro (d_p) é dada por:

$$\eta_{dp} = (1 - Pt_d) * 100\% \quad (4.2)$$

1) Penetração da partícula com um determinado diâmetro

Penetração da partícula é definido como a fracção de partículas de um diâmetro específico que não é colectado pelo processo de purificação, (Cooper e Alley, 2010). É expressa pela equação (4.3):

$$Pt_{dp} = \exp \left\{ \frac{Q_L}{Q_G} * \frac{u_g * \rho_L * d_d}{55 * \mu_G} * \left[-0,7 - K_p * F + 1,4 * \ln \left(\frac{K_p * F + 0,7}{0,7} \right) + \frac{0,49}{0,7 + K_p * F} \right] * \frac{1}{K_p} \right\} \quad (4.3)$$

F = factor empírico de afinidade da partícula à água $\begin{cases} F = 0,5 \text{ para partículas hidrofílicas} \\ F = 0,25 \text{ para partículas hidrofóbicas} \end{cases}$

Para calcular a penetração da partícula é necessário obter o parâmetro de impactação inercial, este foi apresentado no capítulo 2, que representa as partículas com tamanho suficientemente grande para resistir inercialmente às divergências do fluxo de gás à gota, expressa pela equação (1.0)

$$K_p = \frac{\rho_L * d_p^2 * u_g}{9 * \mu_G * d_d}$$

Para determinar a eficiência geral de colecta do purificador Venturi é necessário obter a fracção mássica na gama de tamanho, que é retirada do cumulativo percentual das amostras da distribuição do tamanho das partículas presente na Tabela 1.

A eficiência geral de colecta é calculada multiplicando a fracção mássica pela eficiência de colecta relativa a cada tamanho de partícula como mostra a equação (4.4), e o resultado é apresentado na Tabela 10:

$$\eta_{geral} = \sum m_d * \eta_{dp} \quad (4.4)$$

Onde: m_d = fracção mássica na gama de tamanho de partículas

η_{geral} = eficiência geral de colecta do purificador Venturi

3.3. Simulação numérica pelo software ANSYS-FLUENT

Uma modelação é necessária para uma melhor compreensão dos processos de escoamento no purificador Venturi. Experimentos de Dinâmica de Fluidos Computacional serão realizados em diferentes condições de entrada para obter medições de referência para validação do modelo. Isto incluiu medições de velocidade e pressão do fluxo dos gases de exaustão. É importante destacar que apenas será feita simulação do escoamento dos gases através do tubo venturi, portanto não incluirá a colisão dos gases com o líquido de purificação.

3.3.1. Modelo do Purificador Venturi

A modelação do purificador Venturi será somente a representado pela convergência, garganta e divergência do tubo. A geometria construída no software segue as especificações da Tabela 6. A malha computacional da geometria, conforme apresentada na Figura 15, foi construída com recurso a ferramenta Meshing do ANSYS e possui 7480 elementos.

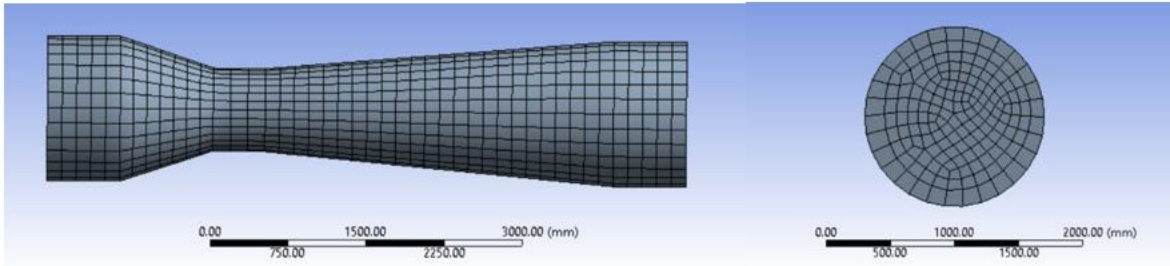


Figura 15. Malha computacional na superfície do purificador Venturi (Fonte: Autor).

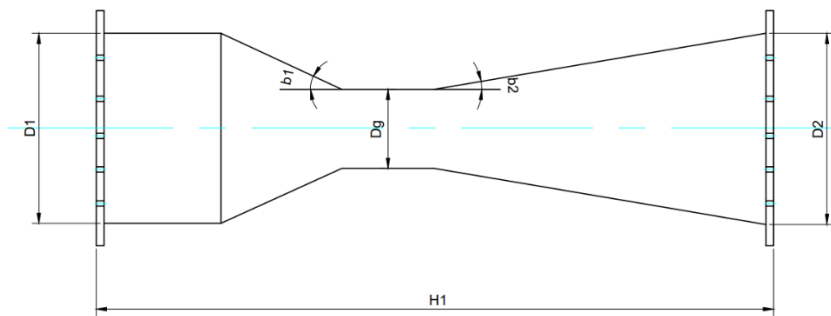


Figura 16. Desenho técnico do tubo Venturi (Fonte: Autor).

Tabela 6. parâmetros dimensionais do tubo Venturi.

Parâmetro	D1	D2	Dg	B1	B2	H1
Medida (mm)	Ø1400	Ø1400	Ø800	25°	10°	6385

Para a determinação da velocidade de entrada e de saída será usada a velocidade na garganta como base, será selecionado aço como material do tubo. Os parâmetros dos gases de exaustão são os mesmos da tabela 5.

4. ANÁLISE DE CUSTOS DO SISTEMA DE PURIFICAÇÃO VENTURI

Neste capítulo serão apresentados de forma estimativa os custos de capital (custos de aquisição e instalação), e os custos anuais (custos de operação). É importante realçar que somente os custos de aquisição e instalação são apresentados valores monetários concretos. Sendo a FAX auto-sustentável na geração de energia eléctrica os custos operação do sistema Venturi serão apresentados em termos de potência necessária para a sua operação.

4.1. Custos de aquisição do sistema venturi (CA)

Para quantificar os custos de aquisição do sistema Venturi foram considerados os seguintes elementos:

- Tubo Venturi + Ciclone;
- Sistema de injeção de líquido;
- Eliminador de gotas.

foi feito um pedido de cotação a empresa indiana Keshav Engineering e o custo de um purificador venturi com as especificações exigidas no presente trabalho é (CA=115.000,00 USD), aproximadamente 7.347.740,00 Mt. O documento emitido pela empresa Keshav Engineering é apresentado no anexo 4.

4.1.1. Custos de Instalação do sistema Venturi (CI)

Os custos de instalação incluem os materiais e os custos de mão-de-obra associados à instalação da unidade Venturi. Estes custos incluem: equipamentos auxiliares (condutas, compressor), fundação e suportes, manuseamento e montagem, tubagem, isolamento. O custo de instalação do sistema Venturi teve em consideração a seleção da opção mais económica baseada num estudo de engenharia detalhado e nos orçamentos dos fornecedores de sistemas Venturi fornecidos pela EPA norte americana. A Tabela 7, apresenta factores de custos de instalação para um purificador Venturi, no qual considera-se (CA) o preço do purificador Venturi, (CA =115.000,00 USD).

Tabela 7. Custos de instalação do purificador Venturi.

Serviços/equipamento	Factor
Fundação e suportes	0,06*CA
Manuseamento e montagem	0,4*CA
Tubulações	0,05*CA
Isolamento para condutas	0,03*CA
TOTAL	CI =0,54*115,000 = 62100 USD ≈ 3,912,000.00 MT

4.1.2. Investimento total de capital

O Investimento Total de Capital (ITC) inclui os custos associados à compra da unidade Venturi e os custos associados à instalação da unidade. A equação para o ITC é dada por:

$$ITC = CA + CI = 7,347,740.00 + 3,912,000,00 = \mathbf{11,259,740.00 \text{ MT}}$$

4.2. Custos de operação

Para analisar os custos de operação do sistema Venturi foram calculadas as potências da bomba e do ventilador de corrente-induzida.

4.2.1. Consumo do líquido de purificação

O purificador venturi que está a ser projectado terá um sistema de recirculação do líquido de purificação (água), e para reduzir a quantidade de sólidos no líquido de purificação, parte do líquido será drenada e em seguida será reposta água fresca à estação de tratamento de águas residuais.

A quantidade de água de reposição é dada pela equação:

$$Q_{T(H_2O)} = Q_{va(evap)} + Q_{dren} \quad (5.0)$$

Onde: $Q_{va(evap)}$ = água perdida por evaporação no purificador Venturi

Q_{dren} = água com excesso de sólidos drenada da ETAR.

O volume de água fresca para substituir a água perdida por evaporação é:

$$Q_{va(evap)} = \frac{\dot{m}_{va(evap)}}{\rho_{H_2O}} \quad (5.1)$$

$$Q_{va(evap)} = \frac{261,56}{62,4} = 4,19 \text{ cfm} = 31,34 \text{ gpm}$$

Quantidade de água drenada da ETAR:

$$Q_{dren} = \frac{\dot{m}_{PM}}{f_{sólidos} * \rho_{H_2O}}, \quad \text{gpm} \quad (5.2)$$

Onde: $\dot{m}_{PM}$ = é a vazão mássica das partículas nos gases de exaustão.

$f_{\text{sólidos}} = \text{fracção mássica dos sólidos no líquido de recirculação}$

$\rho_{H_2O} = \text{fracção mássica dos sólidos no líquido de recirculação}$

Tendo como dado de entrada a carga de particulados na entrada do Venturi ($L_{PM} = 5,46 \text{ gr/scf}$), pode-se calcular a $\dot{m}_{PM}$, pela equação:

$$\dot{m}_{PM} = \frac{L_{PM} * Q_G}{7000 \text{ gr/lb}}, \quad \text{lb/min} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{PM} = \frac{5,46 * 197945,76}{7000 \text{ gr/lb}} = 154,39 \text{ lb/min} = 4204,38 \text{ kg/h}$$

A fracção mássica dos sólidos no líquido de recirculação é dada pela equação:

$$f_{\text{sólidos}} = \frac{\dot{m}_{PM}}{\dot{m}_{\text{água}}} * 100, \quad [\%] \quad (5.4)$$

Onde: $\dot{m}_{\text{água}} = Q_{va(evap)} * 8,3 \text{ lb/gal} = 31,34 * 8,3 = 260,22 \text{ lb/min} = 7075,64 \text{ kg/h}$

$$f_{\text{sólidos}} = \frac{154,39}{260,22} * 100 = 59\%$$

A quantidade de água drenada do líquido de purificação é:

$$Q_{\text{dren}} = \frac{154,39}{0,59 * 8,3} = 31,52 \text{ gpm} = 119,3 \text{ l/min}$$

Agora pode se calcular a quantidade de água necessária para compensar as perdas por evaporação e pela drenagem pela equação (5.0):

$$Q_{T(H_2O)} = 31,34 + 31,52 = 62,86 \text{ gpm} = 237,96 \text{ l/min}$$

4.2.2. Consumo de Electricidade

O sistema venturi irá consumir directamente energia eléctrica através da bomba que bombeia água para o bocal do purificador, e do ventilador de corrente-induzida que acelera os gases de exaustão para o Venturi. a FAX possui uma bomba vertical com 76 kw de potência e 60% de eficiência e

ventilador com 400 KW de potência e 60% de eficiência. As equações a seguir serão para averiguar se a bomba e ventilador são suficientes para alimentar o sistema Venturi.

$$P_{bomba} = \frac{\Delta P_{bomba} * (Q_L/Q_G) * (Q_G/1000) * 1,125}{3952.6 * \eta_{bomba}}, \quad hp \quad (5.5)$$

$$P_{vent} = \frac{\Delta P * Q_G}{6356 \eta_{vent}}, \quad hp \quad (5.6)$$

5. MANUTENÇÃO DO PURIFICADOR VENTURI

Em muitas instalações de purificação húmida não é necessária a presença constante do operador, podendo este recorrer ao uso de instrumentação e pela implementação da manutenção preventiva (Schiffner, 2002). Os purificadores Venturi podem prestar um serviço contínuo e fiável quando são operados adequadamente e mantidos regularmente. A má operação e manutenção levam à falha dos componentes, e a maioria das falhas do purificador resulta da abrasão, corrosão, acumulação de sólidos e desgaste das peças rotativas. Os modos de falha comuns para componentes individuais apresentados abaixo foram extraídos da EPA (1982).

5.1. Entupimento dos bicos

Os bicos obstruídos reduzem a relação líquido-gás ou causam uma má distribuição do líquido. O entupimento do bico resulta de excesso de sólidos nos líquidos de purificação, avaria da bomba e mau design do reservatório de recirculação.

O entupimento dos bicos pode ser detectado observando o padrão de spray da água produzido pelos bicos. Se os bicos não estiverem acessíveis enquanto as bombas estiverem em funcionamento, deverão ser verificados durante as paragens do purificador quanto a evidências de aglomeração nas aberturas dos bicos. Uma diminuição do caudal de água durante o funcionamento do purificador é um sinal adicional de entupimento do bico.

As soluções para o entupimento dos bicos incluem a substituição por bicos de um tipo diferente, limpeza frequente e redução do teor de sólidos na água, aumentando a purga da água e consequentemente o aumento da água de reposição.

5.2. Acúmulo de sólidos

A acumulação de sólidos é outro problema comum em purificadores húmidos no geral e muitas vezes difícil de controlar. O tipo de acumulação de sólido mais comum na indústria açucareira é a sedimentação. A sedimentação ocorre quando uma camada de partículas se fixa a uma superfície ou se deposita em zonas de baixa turbulência. A sedimentação pode provocar o entupimento de tubagens e condutas ou acúmulo em peças internas.

A acumulação de sólidos pode ocorrer em tubagens, reservatórios, juntas do purificador, linhas de instrumentação ou condutas e pode levar à redução da eficiência do purificador e a falhas graves do equipamento.

A acumulação de sólidos pode ser detetada pela inspeção de componentes de fácil acesso e pela inspeção das superfícies internas de tubagens e condutas em acessórios amovíveis e escotilhas.

As técnicas para controlar a incrustação incluem o aumento da relação líquido-gás, o controlo do pH, e a disponibilização de um maior tempo de permanência da água no tanque de retenção.

5.3. Desgaste por corrosão

Os problemas de corrosão surgem frequentemente em purificadores húmidos, especialmente quando os gases que estão a ser limpos contêm compostos formadores de ácido ou compostos eletrolíticos solúveis.

A recirculação das águas de purificação aumenta muito as concentrações de quaisquer agentes corrosivos que contenham.

A prevenção da corrosão é melhor realizada através da escolha adequada dos materiais de construção e do controlo do pH.

Outro problema operacional comum ocorre quando as taxas de drenagem da água de purificação são reduzidas para limitar a emissão de poluentes nas águas superficiais. Reduzir ou eliminar a drenagem pode aumentar tanto as concentrações de ácido e eletrólito na água que os materiais de construção de outra forma aceitáveis tornam-se ineficazes contra a corrosão.

5.4. Desgaste por abrasão

A abrasão pode ocorrer onde os gases ou líquidos que contêm elevadas concentrações de partículas abrasivas estão no modo turbulento ou são submetidos a uma mudança repentina na direção do fluxo.

As áreas de desgaste típicas em sistemas venturi incluem a garganta, próximo da conduta de entrada e cotovelos na canalização.

As soluções para o desgaste por abrasão incluem a utilização de dispositivos que fazem a pré-limpeza e a utilização de curvas de grande raio em condutas.

5.5. Desgaste de equipamentos rotativos

Os equipamentos rotativos, incluindo ventiladores, bombas e clarificadores, devem receber especial atenção no serviço do purificador devido à potencial abrasão, entupimento e corrosão. As principais áreas de desgaste nestes componentes incluem os rolamentos e quaisquer componentes que rodem no fluxo de fluido.

5.6. Ventiladores

5.6.1. Ventiladores de corrente-forçada

Os ventiladores de corrente-forçada sofrem frequentemente abrasão devido à exposição a gases carregados de partículas. Os problemas de desgaste em ventiladores de corrente-forçada podem ser resolvidos através da utilização de ligas especiais resistentes ao desgaste, da redução das velocidades de rotação do ventilador ou instalação de um ventilador maior.

5.6.2. Ventiladores de corrente-induzida

Os ventiladores de corrente-induzida podem sofrer corrosão ou acumulação de sólidos nas lâminas. Os problemas dos ventiladores de corrente-induzida podem ser resolvidos através da utilização de materiais resistentes à corrosão ou melhorando a separação do arrasto de líquidos.

5.6.3. Bombas

O desgaste da bomba é também um problema comum nos sistemas venturi. As carcaças das bombas, os impulsores e os vedantes estão sujeitos à abrasão e à corrosão por conta das lamelas do

purificador. Revestimentos de borracha e os materiais de bombas de liga especial são frequentemente utilizados para reduzir a abrasão e a corrosão das carcaças ou dos impulsores.

5.7. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é uma importante ferramenta para garantir a contínua operação dos sistemas venturi. Os programas de manutenção preventiva para sistemas venturi incluem aspectos apresentados nos capítulos seguintes.

5.7.1. Inspeção periódica do equipamento

Todos os equipamentos devem ser inspecionados regularmente a intervalos regulares, determinados pela severidade do serviço e pela probabilidade de falha do componente. Os itens propensos a falhas incluem bicos e bombas que lidam com lamas, ventiladores de corrente-forçada que lidam com gases carregados de partículas, ventiladores de corrente-induzida a jusante de separadores de arrastamento de líquidos, placas de desgaste, sondas de pH e rolamentos. Estes dispositivos devem ser inspecionados uma vez por turno, dependendo da probabilidade de falha. Componentes como condutas e ventiladores de corrente-induzida que manuseiam gases limpos e secos devem ser inspecionados mensalmente.

5.7.2. Substituição de peças desgastadas

Todas as peças desgastadas e equipamentos com defeito devem ser alvo de manutenção assim que forem descobertos, para evitar a deterioração do desempenho do sistema e evitar danos no equipamento.

5.7.3. Manutenção de um inventário adequado de peças sobressalentes

Deve ser mantido em stock um inventário de peças sobressalentes para substituição de bocais, rolamentos, vedantes da bomba, camisas para bombas com camisas substituíveis, impulsores da bomba, placas de desgaste para rodas de ventiladores com placas de desgaste, sondas de pH e peças de válvulas.

5.7.4. Registo de toda a manutenção efectuada no equipamento de purificação.

Devem ser feitos registos de todas as manutenções efetuadas e de todas as peças substituídas. Esta informação é útil no planeamento de programas de manutenção preventiva subsequentes e na determinação do tipo e número de peças de substituição necessárias.

6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são interpretados e discutidos os resultados obtidos no capítulo 3, será feita uma examinação à luz dos objectivos do trabalho identificando as limitações do estudo e também relacionando-os com a literatura.

6.1. Análise das propriedades dos gases de exaustão

Realizados os cálculos para averiguar principalmente a vazão mássica e volumétrica dos gases de exaustão na saída do purificador, e sua temperatura de saturação, verifica-se que é necessário controlar a temperatura dos gases de modo que não baixem para menos que 71 °C. Também um dado importante é que do total de líquido de purificação injectado no venturi, existe uma porção que evapora por conta da temperatura inicial dos gases de exaustão representado por $\dot{m}_{va(evap)}$, conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8. Resultados da determinação das propriedades do gás de exaustão.

Parâmetros	Resultados
$\dot{m}_{a(ent)}$	79,81 kg/s
$\dot{m}_{va(ent)}$	20,38 kg/s
ω	0,25
T_{sat}	71,11 °C
ω_{sat}	0,28
V_H	1,33 m ³ /kg
$Q_{G(saída)}$	114,67 m ³ /s
$\dot{m}_{va(saída)}$	80511 kg/h
$\dot{m}_{va(evap)}$	7119,6 kg/h

6.2. Análise do desempenho do purificador Venturi

Os gráficos 5 e 6 foram gerados para a partícula com menor diâmetro ($0,6 \mu m$) registada na FAX, importante realçar que este dado também converge com os dados típicos da indústria açucareira encontrados em literatura.

A partir da análise do Gráfico 5 e 6 pode-se concluir que:

1. O aumento da razão líquido-gás proporciona aumento substancial da eficiência de colecta do sistema Venturi, entretanto existe um valor da razão líquido-gás na qual o sistema Venturi deixa de funcionar eficientemente. Por sua vez verifica-se também que existe uma relação de proporcionalidade directa entre a razão líquido-gás e a queda de pressão no purificador.
2. A partir da análise do Gráfico 6, é possível verificar que existe uma proporcionalidade directa da velocidade do gás na garganta, tanto para a eficiência de colecta, como para a queda de pressão.

É importante que ao dimensionar o sistema Venturi se faça a escolha da velocidade do gás e da razão líquido-gás de modo a maximizar a eficiência de colecta, porém mantendo a queda de pressão em parâmetros que não comprometa negativamente os custos de operação e manutenção do sistema Venturi.

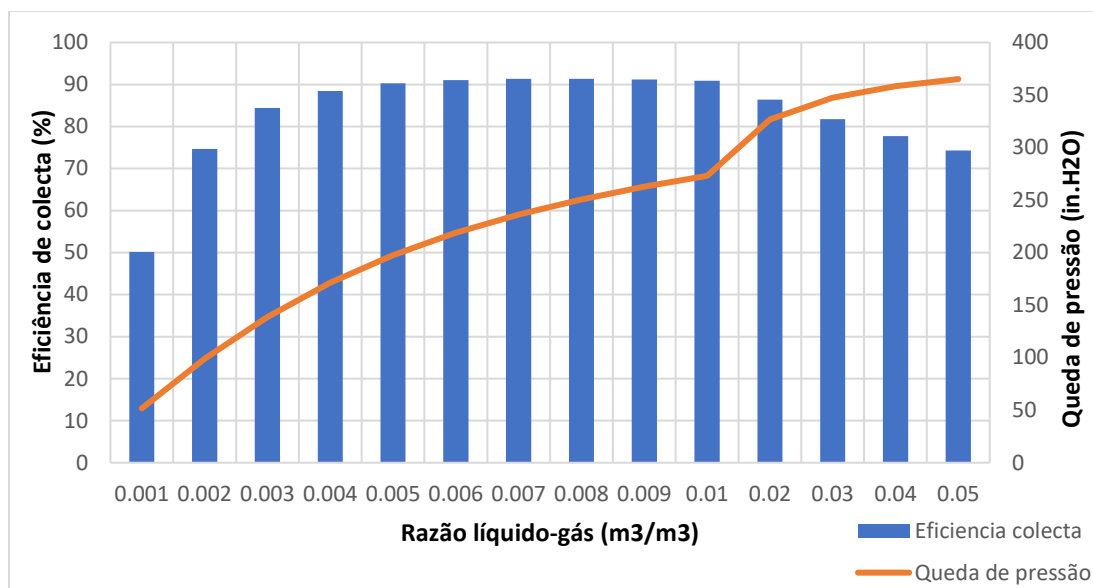


Gráfico 5. Relação entre a razão líquido-gás, eficiência de colecta e a queda de pressão (Fonte: Autor).

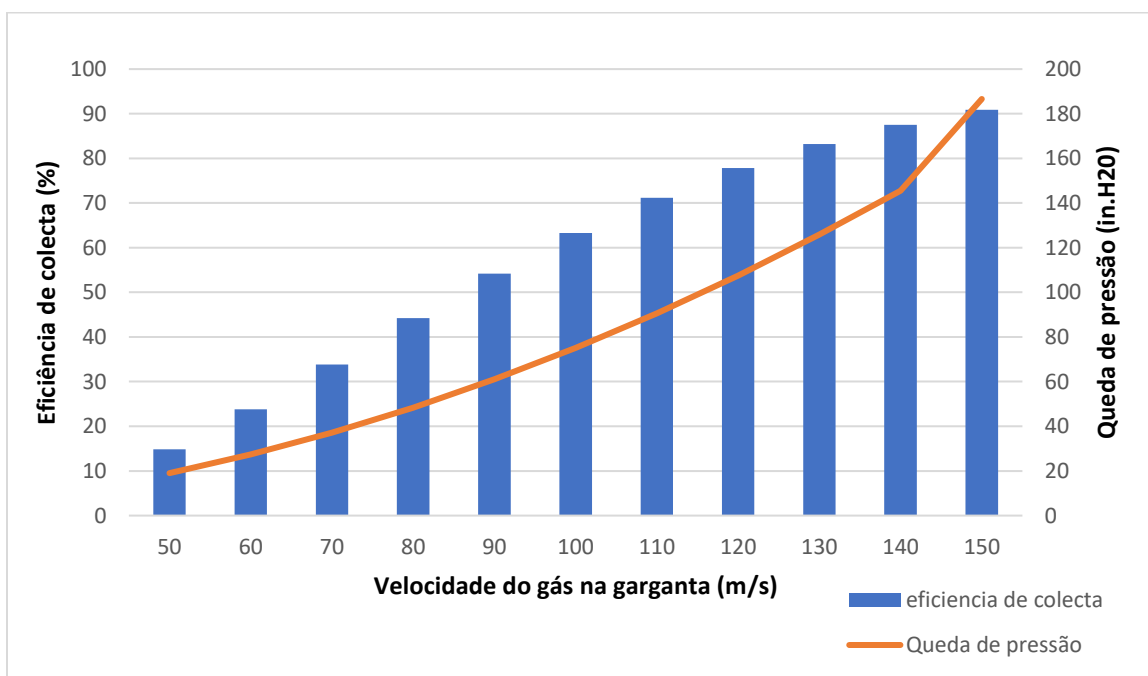


Gráfico 6. Relação entre a velocidade do gás na garganta, eficiência de colecta e queda de pressão (Fonte: Autor).

Depois da análise dos gráficos 5 e 6, é possível escolher os parâmetros ideais de modo que o desempenho do sistema Venturi seja maximizado, estes são apresentados na Tabela 9. Abaixo:

Tabela 9. Resultados do cálculo do desempenho do sistema Venturi.

<i>Parâmetros</i>	<i>Resultados</i>
d_d	122,3 μm
R_e	415,59
C_D	0,28
ΔP	22579,12 Pa
K_p	1,49
Pt_d	0,106
$\eta_{0.6}$	71,2%

Pode-se também verificar que o purificador Venturi alcançará eficiência de colecta de 71,2 % para as partículas submicrométricas de diâmetro 0,6 μm , que facilmente atravessariam pelas 140 células do multiciclone actualmente em actividade na FAX. Analisando a Tabela 10, verifica-se uma eficiência geral de colecta de 99,12%, o que significa que o dispositivo cumpre com os requisitos e consegue colectar de modo geral a maior parte das partículas presentes nos gases exaustão.

Tabela 10. Eficiência de colecta do purificador Venturi.

d_p (μm)	CUMULATIVO (%)	K_p	$K_p * F$	Pt_{dp}	η_{dp} (%)	m_d	η_{geral} (%)
0.6	0.39	1.491	0.745	0.287	71.208	0.0039	0.256
1	0.42	4.143	2.071	0.037	96.224	0.0003	0.026
3	0.74	37.295	18.647	0.000337	99.966	0.0032	0.315
5	1.37	103.598	51.799	0.0001109	99.988	0.0063	0.623
10	4.13	414.392	207.196	5.5466E-05	99.994	0.027	2.737
20	13.32	1657.57	828.785	4.347E-05	99.995	0.091	9.120
30	25.28	3729.532	1864.766	4.1082E-05	99.995	0.119	11.870
40	38.26	6630.280	3315.140	4.01811E-05	99.995	0.129	12.883
50	51.13	10359.81	5179.906	3.97387E-05	99.996	0.128	12.775
60	63.12	14918.13	7459.065	3.94868E-05	99.996	0.119	11.901
70	78.7	20305.23	10152.61	3.9329E-05	99.996	0.155	15.465
75	90.87	23309.57	11654.78	3.92712E-05	99.996	0.1217	12.080
150	100	93238.31	46619.16	3.89577E-05	99.996	0.091	9.063
							TOTAL = 99.120

6.3. Análise da simulação dinâmica de fluidos computacional

6.3.1. Curvas de velocidade

A Figura 17, confirma que devido à parte convergente, a velocidade do caudal sofre uma alteração. Como a dimensão geométrica do tubo diminui rapidamente, a velocidade do caudal aumenta. Quando está na garganta, atinge a velocidade máxima. Depois da garganta do tubo, a velocidade reduz-se rapidamente à medida que a dimensão do tubo aumenta. Um dado importante que se obtém da simulação é a velocidade do gás de entrada do venturi de aproximadamente 35 m/s, dado importante para prever a eficiência da câmara de recolha de gotas que fará a separação líquido-gás. A velocidade de entrada dos gases apresentada é a necessária para que a velocidade na garganta atinja o pico ideal de 110 m/s, assim podendo alcançar valores máximos de desempenho.

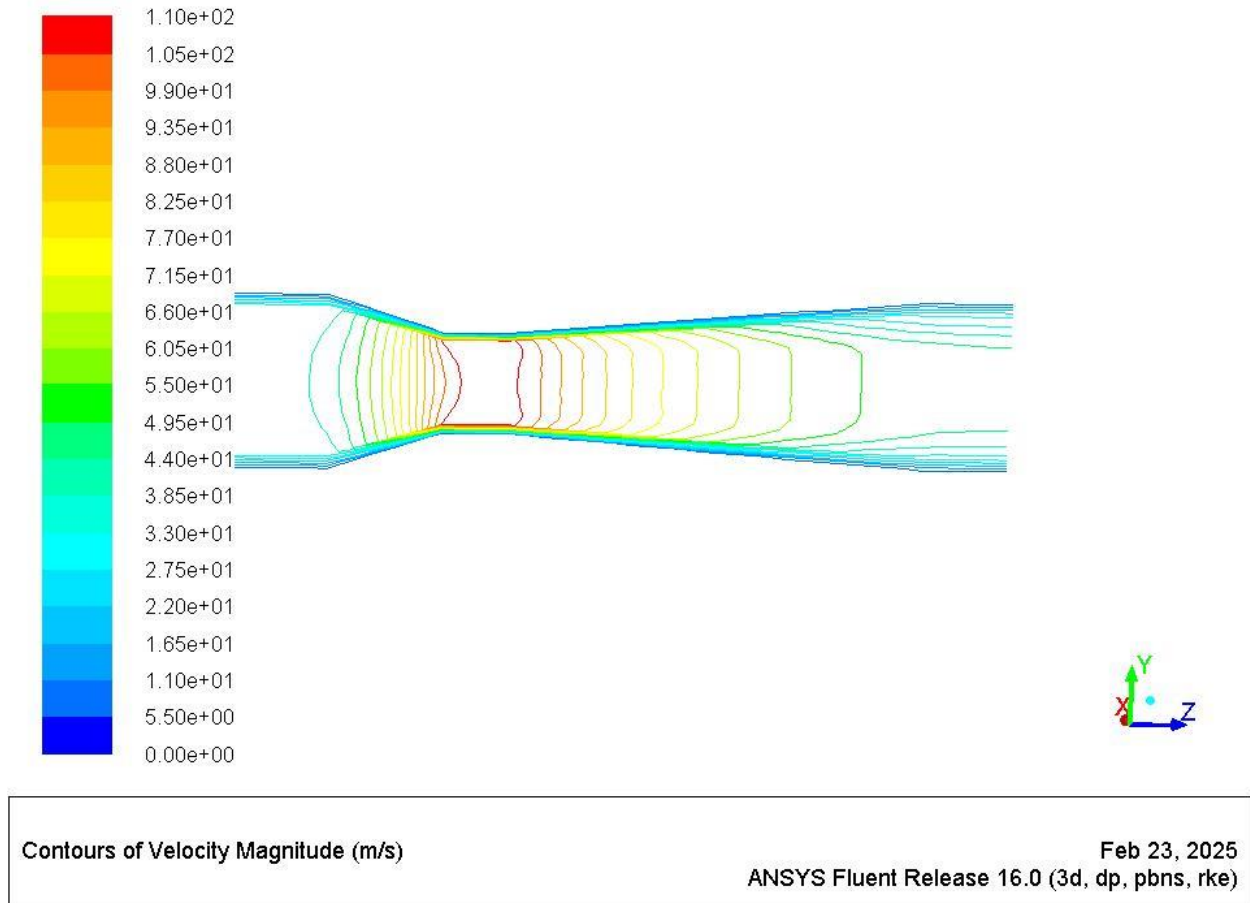


Figura 17. Variação da velocidade no tubo Venturi (Fonte: Autor).

6.4. Apresentação do purificador venturi proposto.

Depois de dimensionado o purificador os dados mostrados na Tabela 11, serão os mesmos apresentados à empresa fabricante do purificador Venturi. As dimensões do sistema Venturi foram selecionadas a partir de tabelas normalizadas e para tal teve-se como ponto de partida os parâmetros apresentados na Tabela 12. A Figura 18, mostra o sistema Venturi proposto, e as respectivas dimensões são ilustradas na Tabela 11.

Tabela 11. Especificações do purificador Venturi dimensionado

Tipo de purificador: purificador Venturi anular vertical com separador ciclônico.
Secção da garganta: garganta fixa.
Material: Aço inoxidável 304L, chapa de 6 mm de espessura.
Portas de acesso: cotovelo de varrimento ou cotovelo inundado.
Queda de pressão: 22579,12 Pa (Venturi de alta energia).
Temperatura de entrada: sem economizador 365°F, com economizador 298 °F, o sistema aguenta até 1472 °F.
Razão líquido-gás: $2l/m^3$, <i>aproximadamente</i> $15gal/1000ft^3$.
Controle de gotas: separador ciclônico com eliminador de gotas Chevron.
Velocidade: na garganta 110 m/s, na saída 18 m/s.
Eficiência geral de colecta: 99%.
Potência dos equipamentos auxiliares: bomba vertical (22 Kw), ventilador de corrente-induzida a montante do purificador (400 Kw).

Tabela 12. Características dimensionais do purificador venturi(Fonte: Aliyev, 1988; Timonin, 2002).

Parâmetro	Medida (mm)
L	5720
L1	4400
L2	2660
L3	1430
L4	1650
H	10860
H1	6385
H2	10506
H3	3600
D	500
Dg	Ø800
D1	Ø1400
D2	Ø1400
D3	Ø2050
Dk	Ø3000
D5	Ø300
h1	3600
A	1250
B	1860

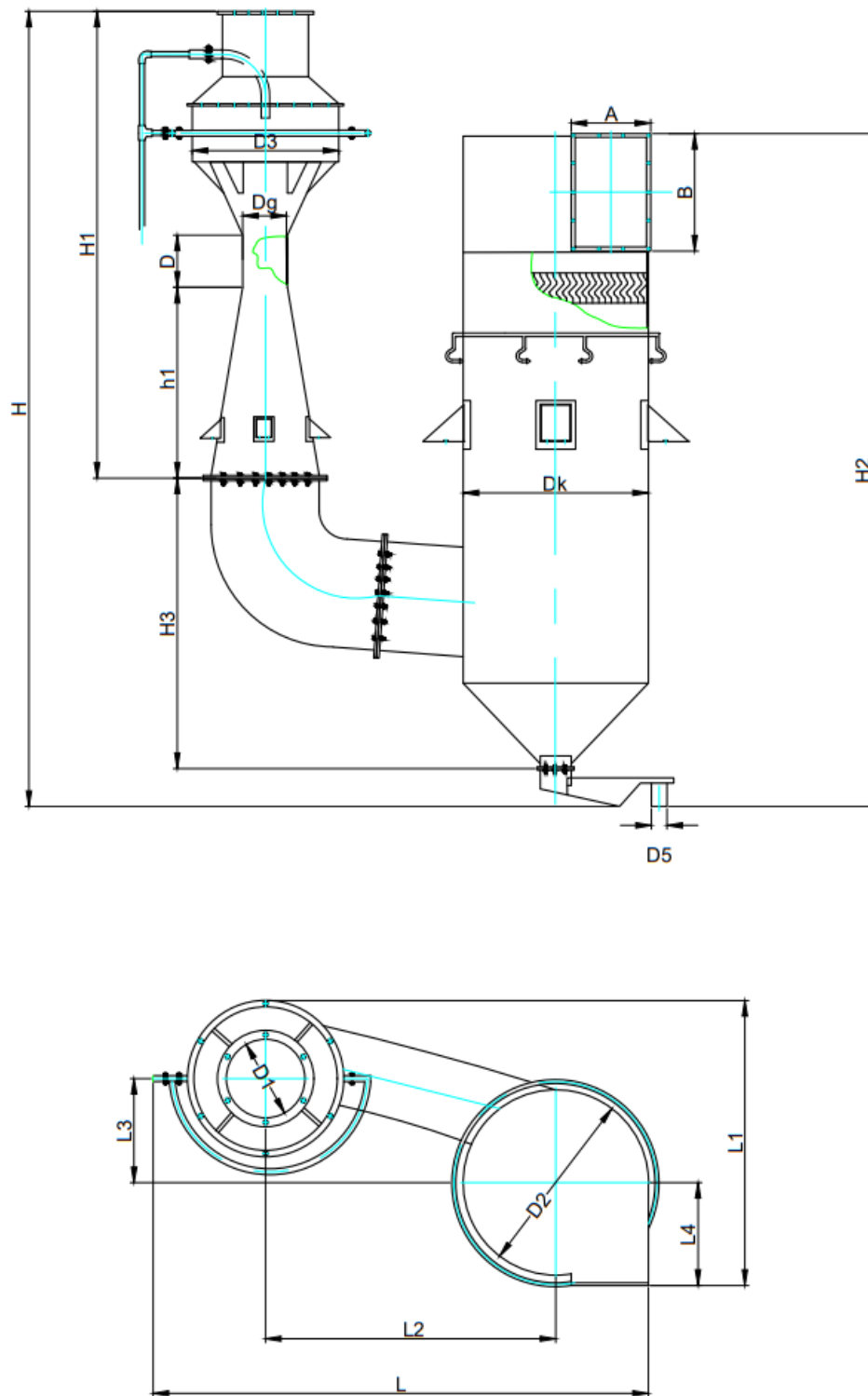


Figura 18. Desenho técnico do sistema venturi proposto no presente trabalho (Fonte: Autor).

7. Conclusões e recomendações

7.1. Conclusões

Tendo em conta os objectivos traçados e os resultados obtidos conclui-se que:

Quando comparado o purificador Venturi dimensionado neste trabalho com os dados colhidos na entrevista feita na FAX acerca do multiciclone actualmente em operação, conclui-se que o sistema venturi como um todo trará melhorias no funcionamento do sistema de exaustão podendo colectar partículas finas com maior eficiência, e trazendo benefícios à saúde humana.

O purificador venturi é um dispositivo com maiores custos de operação que o multiciclone, consumindo mais água pelo seu princípio de funcionamento e consumindo mais energia eléctrica por este ser um dispositivo de alta energia. Em contrapartida o purificador Venturi verifica-se menos trabalhoso na sua manutenção pela sua concepção mais simples.

Analizados todos aspectos colocados e parâmetros calculados no presente trabalho, observou-se que o purificador venturi dimensionado cumpre com os requisitos de eficiência de colecta expectados e resolverá a grande questão da poluição atmosférica por meio de material particulado.

7.2. Recomendações

Recomenda-se que se faça um estudo sobre o impacto da instalação do purificador venturi na redução das doenças causadas por inalação de MP.

Que se estime de forma mais aprofundada os custos de instalação do purificador Venturi tendo em conta a moeda actual em Moçambique.

Recomenda-se ainda que se faça um estudo da qualidade do ar na saída da chaminé da FAX, de modo a avaliar a possibilidade de instalar ajusante ao multiciclone em actividade na FAX um sistema venturi de baixa energia.

Por fim recomenda-se que se faça um estudo mais profundo sobre o fluxo dos gases de exaustão nos tubos do purificador Venturi, com recurso ao simulador ANSYS Fluent de modo a se observar com mais clareza o mecanismo de colecta do MP.

8. Referências Bibliográficas

- [1] MUSSATTI, Daniel and HEMMER, Paula – Particulate Matter Controls. Section 6, 2002, EPA/452/B-02-001
- [2] GODE, Constantino Jaime – Industria Açucareira em Moçambique: Produção versus Importação do Açúcar. UEM, Agosto 1997, P. 3.
- [3] SCHIFFTNER, Kenneth C. – Air Pollution Control Equipment Selection Guide: Venturi Scrubbers. CRC Press LLC 2002.
- [4] SCHIFFTNER, K.C. and H.E. Hesketh, Wet Scrubbers. Technomic Publishing, Lancaster, PA, 2nd Edition, 1996.
- [5] COOPER, C.D. and F.C. Alley - Air Pollution Control: A Design Approach. 4th Edition, 2010.
- [6] BONNA, Rafaela de – Dimensionamento de um Sistema de Exaustão para a Industria de Processamento de Plástico. Porto Alegre, 2021.
- [7] DELGADO, Valdes Antonio and CASANOVA, Carlos de Armas – Sugar Processing and by-products of the Sugar Industry. Rome 2001, ISBN 92-5-1 04570-4.
- [8] REIN, Peter - Cane sugar engineering. Verlag Dr Albert Bartens KG, Berlin 2007.
- [9] INNOCENTINI Murilo et al - Environmental and Economic Issues Concerning the Use of Wet Scrubbers Coupled to Bagasse-fired Boilers: a Case Study in the Brazilian Sugarcane Industry, 2021.
- [10] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - Control Techniques for Particulate Emissions from Stationary Sources. North Carolina, 1982, Volume 1, EPA-450/3-81-005a.
- [11] FOX, Robert W. et al – Introdução a Mecânica dos Fluidos. 6^a Edição, 2006.
- [12] MAKAROV, V. V – Fundamentos Sobre Protecção Atmosférica. Editora SevNTU, , Sebastopol 2003, ISBN 966 – 7473 – 40 – 6.
- [13] DA SILVA, Ângela Maria Esteves - Numerical and Experimental Study of Venturi Scrubbers. Universidade do Minho, 2008.

- [14] DA SILVA, Bruno Menezes – Avaliação de um Lavador Venturi na Coleta de Material Particulado Fino Emitido Pela Queima de Biomassa. Araraquara - SP 2020.
- [15] YUNUS, A. Ç. e BOLES, Michael A. – Termodinâmica (Tabelas e Diagramas de Propriedades). ISBN 9788586804663.
- [16] LAWRENCE K. Wang et al – Air Pollution Control Engineering. New Jersey 2004, Volume.
- [17] ZERWAS, Alexander Ariyoshi - Modelagem e simulação do escoamento em um sistema de lavagem de gases por técnicas de fluidodinâmica computacional. São Paulo 2017.
- [18] ALIYEV A. - Construção e Manutenção de Instalações de Limpeza de Gás e Recolha de Pó (УСТРОЙСТВО И ОБСЛУЖИВАНИЕ ГАЗООЧИСТНЫХ И ПЫЛЕ-УЛАВЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК). 2ª edição, Moscovo, 1988.
- [19] TIMONIN A. S. - Fundamentos de Projecto e Cálculo de Sistemas Químico-Tecnológicos e Equipamentos de Protecção Ambiental (ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО И ПРИРОДОСХРАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ). Volume 2, Kaluga 2002.
- [20] COHEN, A. J. et al. - Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. The Lancet, v. 389, 2017
- [21] DECRETO 18/04 – Poluição Atmosférica. Lei do Ambiente, Moçambique, 2004.
- [22] Características Técnicas Dos Purificadores Venturi Disponível em: https://www.emtver.ru/catalog/pyleulovitel_kmp
- [23] Taxa de cobrança de água pela empresa Ara-sul, disponível em: <https://aranorteip.gov.mz/wp-content/uploads/2021/03/Regulamento-de-Fixacao-de-Taxas-de-Agua-Bruta-em-Cada-Area-de-Jurisdicao-das-ARA%C2%B4s.pdf>
- [24] Pequeno resumo sobre a Produção de açúcar em Moçambique disponível em: <https://www.tongaat.com/our-business/sugar/mozambique/>
- [25] Dados relativos aos países agro-processadores de cana-de-açúcar: <https://ourworldindata.org/>

Anexo 1. Propriedades e parâmetros dos gases de exaustão extraídos na FAX e na literatura.

Figura A1. Parâmetros dos gases de exaustão obtidos na FAX para o dimensionamento do purificador Venturi (Howden Energy Systems).

Howden Energy Systems			 Howden	
47376	OPERATING AND MAINTENANCE MANUAL		SECTION 2 PAGE 1 OF 3	
2.1 DESIGN PARAMETERS				
		Bagasse 100% MCR	Coal 100% MCR	
Load				
Gas inlet flow	kg/h	354 199	231 971	
	Am3/s	136.8	87.7	
Gas inlet temperature	degC	185	189	
Gas inlet density @ 95.5kPa	kg/Am3	0.719	0.779	
Gas inlet composition by volume				
CO2	%v	11.5	11.6	
N2	%v	56.2	75.4	
SO2	%v	0.00	0.0008	
H2O	%v	29.1	5.9	
Gas inlet dust burden @ 0 °C, 101.3 kPa, 7% O2 dry	mg/Nm3	12500 - 20 000	6 000	
Required Collector Efficiency				
Gas outlet burden max @ 0 °C, 101.3 kPa, 7% O2 dry	mg/Nm3	2500	2500	
Maximum permissible draught loss	kPa	0.75	0.75	
Predicted draught loss	kPa			
Single stage		0.52	0.21	
Twin		0.52	0.21	

Figura A2. Distribuição do tamanho das partículas quando combustível é o bagaço vs carvão mineral (Howden Energy Systems).

Howden Energy Systems		 Howden
47376	OPERATING AND MAINTENANCE MANUAL	SECTION 2 PAGE 2 OF 3

PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS – BAGASSE

Size Range (Micron)	Cumulative %		
	Grading 1	Grading 2	Grading 3
> 0 up to 0.6	0	0.15	0.39
> 0.6 up to 1	0	0.15	0.42
> 1 up to 3	0.03	0.36	0.74
> 3 up to 5	0.07	0.9	1.37
> 5 up to 10	1.59	3.47	4.13
> 10 up to 20	9.17	12.4	13.32
> 20 up to 30	20.38	24.26	25.28
> 30 up to 40	33.15	37.21	38.26
> 40 up to 50	46.16	50.11	51.13
> 50 up to 60	58.59	62.26	63.12
> 60 up to 70	74.96	77.9	78.7
> 75 up to 150	90.4	90.67	90.87
> 150	100	100	100

PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS – COAL

Size Range (Micron)	Cumulative %		
	Grading 1	Grading 2	Grading 3
> 0 up to 0.6	1.43	2.56	4.61
> 0.6 up to 1	2.25	3.37	10.04
> 1 up to 3	6.18	7.31	19.41
> 3 up to 5	9.87	11	32.47
> 5 up to 10	18.13	19.26	53.79
> 10 up to 20	27	27	56.5
> 20 up to 30	35	35	61
> 30 up to 40	44	44	66.5
> 40 up to 50	53	53	72
> 50 up to 60	60	60	77
> 60 up to 70	70	70	84
> 75 up to 150	85	85.00	91.50
> 150	100	100	100

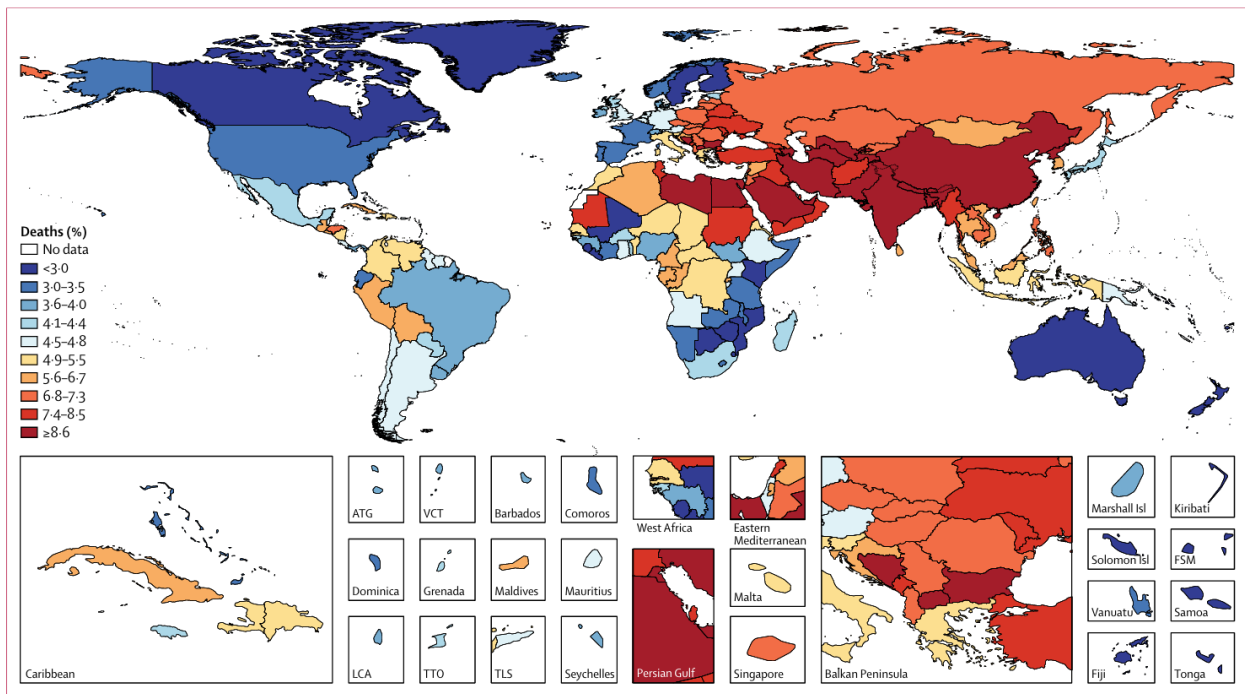
Anexo 2. Análise dos dados do Estudo da Carga Global de Doença de 2015

Tabela A1. Mortes globais, anos de vida ajustados por incapacidade e taxas padronizadas por idade atribuíveis à poluição ambiental por partículas em 2015 (Fonte: Cohen et al, 2015).

	Deaths, in thousands (95% UI)	Age-standardised deaths per 100 000 people (95% UI)	DALYs, in thousands (95% UI)	Age-standardised DALYs per 100 000 people (95% UI)
All causes	4241.1 (3698.0–4776.7)	66.0 (57.2–74.8)	103 066.2 (90 829.6–115 072.6)	1490.9 (1312.4–1665.6)
Disease				
Lower respiratory infection	675.0 (491.9–889.0)	10.1 (7.4–13.4)	28 359.9 (21 141.8–35 796.9)	390.9 (290.9–494.3)
Lung cancer	283.3 (178.4–398.7)	4.4 (2.7–6.1)	6 209.1 (3934.9–8689.3)	90.9 (57.5–127.3)
Ischaemic heart disease	1521.1 (1231.7–1821.2)	23.6 (18.9–28.5)	32 406.0 (27 078.2–37 427.4)	470.7 (394.6–543.0)
Cerebrovascular disease	898.1 (717.6–1083.6)	14.0 (11.0–17.1)	19 242.8 (16 095.9–22 679.7)	281.2 (234.4–331.4)
Chronic obstructive pulmonary disease	863.6 (538.5–1212.8)	14.0 (8.7–19.6)	16 848.2 (10 517.4–23 590.0)	257.2 (160.3–360.6)
Sex				
Male	2455.4 (2140.2–2752.9)	83.9 (72.5–94.7)	62 894.7 (55 545.7–70 098.2)	1888.8 (1659.4–2113.6)
Female	1785.7 (1546.2–2049.2)	50.8 (44.0–58.4)	40 171.5 (35 205.5–45 382.8)	1127.4 (986.6–1275.4)
Age				
Children <5 years	202.6 (152.7–254.6)	30.1 (22.7–37.8)	17 431.1 (13 139.7–21 906.3)	2585.9 (1949.1–3249.5)
Elderly >70 years	2228.3 (1842.0–2653.9)	562.7 (465.1–670.8)	25 073.0 (20 775.2–29 511.1)	6302.2 (5226.3–7419.8)

DALY=disability-adjusted life-year. UI=uncertainty interval.

Figura A3. Mortes atribuíveis à poluição ambiental por partículas em 2015 (Fonte: Cohen et al, 2015).



Anexo 3. Características dimensionais do purificador Venturi e câmara de recolha de gotas.

Tabela A2. Dimensões do purificador venturi e câmara de recolha de gotas (Fonte: www.em-tver.ru/catalog/pyleulovitel_kmp).

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS COLETORES DE PÓ KMP									
Nome	Produtividade, m3/h	eu	L1	L2	L3	L4	L5	E	H1
Coletor de pó KMP-2.5	7000-14000	2314	1506	1120	450	600	660	4306	2556
Coletor de pó KMP-3.2	12000-22000	2790	1900	1230	590	765	660	5010	3020
Coletor de pó KMP-4.0	18000-35000	3540	2305	1600	720	905	660	5850	3580
Coletor de pó KMP-5.0	28000-55000	3980	3045	1800	900	1080	660	7416	4536
Coletor de pó KMP-6.3	45000-86000	4620	3468	2150	1090	1300	875	8641	5265
Coletor de pó KMP-7.1	58000-110000	5240	3890	2470	1270	1500	875	9591	5825
Coletor de pó KMP-8.0	70000-140000	5720	4400	2660	1430	1650	875	10506	6385

Nome	H2	H3	d1/d2	d3/d4	Dg	D1	D2	D3	h1
Coletor de pó KMP-2.5	3933	1270	50/25	50/20	250	450	450	740	240
Coletor de pó KMP-3.2	4820	1510	70/32	80/20	320	560	560	980	240
Coletor de pó KMP-4.0	5630	1790	70/32	80/20	400	700	700	1240	250
Coletor de pó KMP-5.0	7064	2400	80/40	80/20	500	900	900	1450	525
Coletor de pó KMP-6.3	7871	2860	100/40	100/25	630	1120	1120	1600	335
Coletor de pó KMP-7.1	9806	3250	125/40	100/25	710	1250	1250	1850	370
Coletor de pó KMP-8.0	10860	3600	125/40	100/25	800	1400	1400	2050	350

Nome	h2	h3	R	Dk	D4	h4	um	V	Peso, kg
Coletor de pó KMP-2.5	620	1120	300	1000	1200	780	350	620	1060
Coletor de pó KMP-3.2	620	1440	450	1200	1440	1000	410	750	1260
Coletor de pó KMP-4.0	750	1800	540	1500	1800	1030	530	930	1848
Coletor de pó KMP-5.0	1140	2250	600	1900	2120	1450	670	1180	4010
Coletor de pó KMP-6.3	1140	2830	700	2300	2520	1700	810	1430	5310
Coletor de pó KMP-7.1	1140	3190	800	2700	2920	1960	950	1680	7308
Coletor de pó KMP-8.0	1140	3600	900	3000	3220	2140	1250	1860	10477

Anexo 4. Custos de aquisição e operação do purificador Venturi.

Figura A4. Factura referente ao custo de aquisição do purificador Venturi emitida pela empresa Keshav Engineering.



KESHAV ENGINEERING

Subject: 2,90,000 CFM MS Wet Scrubber

Date- 30/01/2025

Surat, Gujarat, India.

2,90,000 CFM Wet Scrubber in MS make, with Crompton pump with spray nozzle ➤ Without Blower provide. ➤ 2,90,000 CFM provide. ➤ 800 C Temperature capable. ➤ Shall thickness 6mm. ➤ Bottom Thickness 8mm. ➤ 5 coating High temperature Epoxy paint Provide. ➤ 2000mm diameter. ➤ 5500 height. ➤ 3 Nos scrubber system provide. [it is distribute to 96,700 CFM X 3 = 2,90,000 CFM] ➤ packing Material provide. ➤ Upper Side SS 304 3mm wire 1" X 1" sieves with ceramic Packing provide.	1,15,000/- USD
Packing	200/- USD
Freight and insurances	Buyer scope
Ducting and all Wood	Buyer scope

Tabela A3. Preço da água por metros cúbicos cobradas pela Ara Sul na bacia do Rio Incomati (Fonte: www.ara-sul.gov.mz).

Taxas de Água Bruta Regularizada (MT/m³)

Tipo de Actividade	Tipo de Uso	Taxa Fixa		Taxa de Uso UGB Regularizada (MT/m ³)			
		Tf1 (Concessão)	Tf2 (MT/mês)	UGBU	UGBI	UGBL	UGBS
(I) Agricultura de Rendimento	Sector Familiar ≤ 1 ha	0	0	0	0	0	0
	Sector Comercial ≤ 50 ha	1 500.00	300.00	0.18	0.18	0.09	0.09
	Sector Comercial 50 < ha ≤ 1000	5 000.00	1 000.00	0.26	0.26	0.19	0.16
	Sector Comercial > 1000 ha	7 500.00	2 500.00	0.39	0.39	0.39	0.16
(II) Industria	Processamento/Transformadora	7 500.00	2 500.00	0.44	0.44	0.26	0.26
	Extractiva	25 000.00	5 000.00	0.47	0.47	0.47	0.47
(III) Abastecimento de Água	Pequenos Sistemas (≤ 5000 ligações)	1 000.00	750.00	0.21	0.15	0.09	0.09
	Grandes Sistemas (> 5000 ligações)	5 000.00	2 000.00	0.46	0.35	0.18	0.18
(IV) Termoeléctricas	Central Termoeléctrica ≤ 2 MW	5 000.00	1 500.00	0.10	0.10	0.10	0.10
	Central termoeléctrica 2 ≤ 10 MW	8 000.00	3 000.00	0.18	0.18	0.18	0.18
	Central termoeléctrica > 10 MW	25 000.00	6 000.00	0.26	0.26	0.26	0.26
(V) Outros Usos		1 500.00	300.00	0.18	0.18	0.09	0.09

Anexo 5. Resultados dos testes de dinâmica de fluidos computacional no simulador ANSYS-FLUENT.

Figura A5. Condições de entrada e curvas de pressão estática (Fonte: Autor).

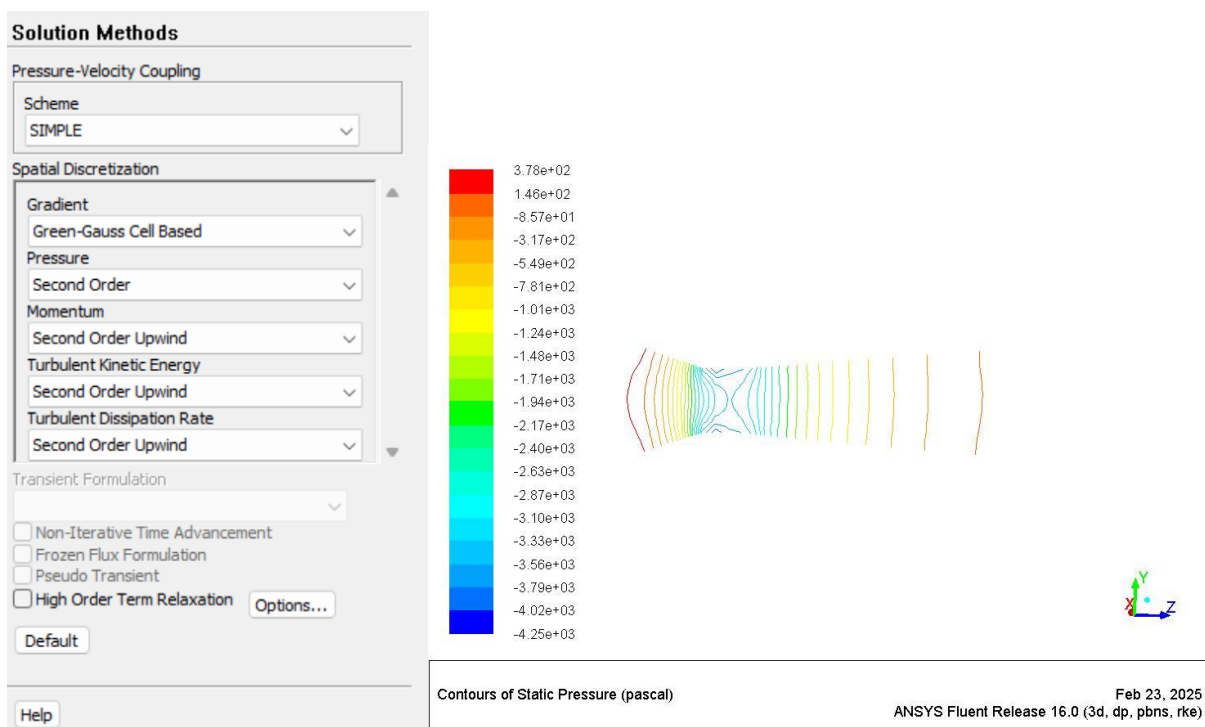
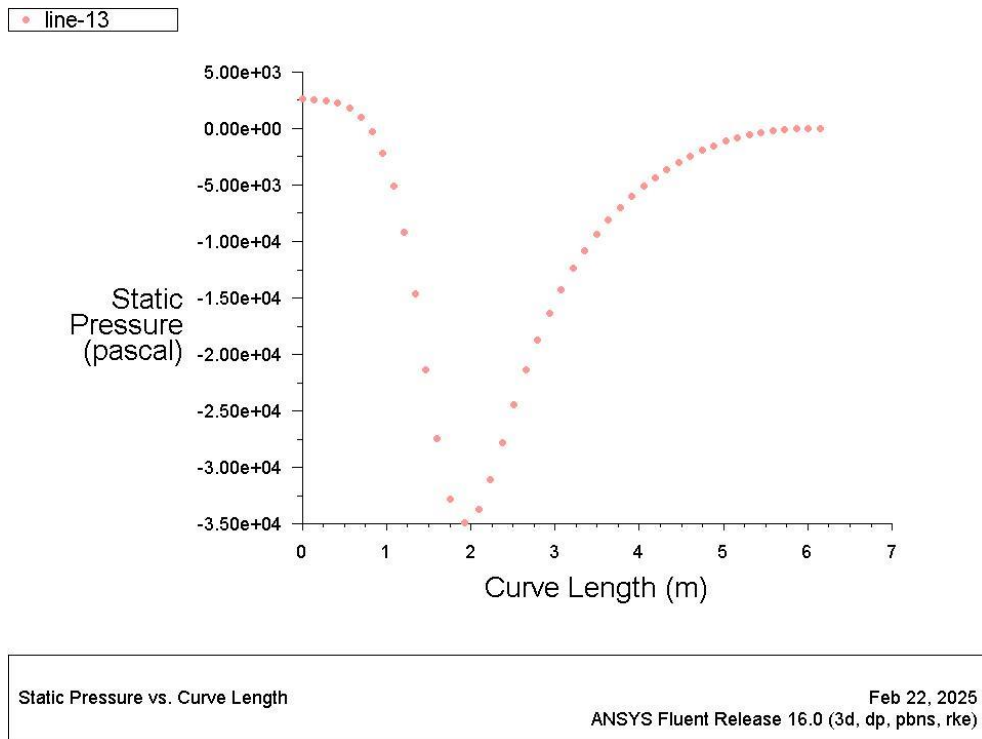


Gráfico A1. Pressão estática vs comprimento do tubo Venturi (Fonte: Autor).



Anexo 6. Padrões de emissão poluentes gasosos pelas diferentes indústrias (Decreto N° 18/04-lei do ambiente).

Tipo de actividade	PTS	SO _x	NO _x	Outros
Manufatura alumínio	30			Flúor total = 2// Hf =1//VOCs 20
Manufatura cimento	50	400	600	
Industria cloro- alcalina				Cl=3
Produção e extração de carvão	50			
Manufatura de coque	50			Benzene=5//VOCs=20// recuperação de enxofre pelo menos 97%
Fundição de cobre	Fundições=20 Outros =50	1000(SO ₂)		As=0,5// Cd=0,05// Cu=1// Pb=0,2// Hg=0,05
Industria de leite	50			odor aceitável para os vizinhos
Manufatura de tinturas (tingir)				Cl=10// VOCs= 20
Manufatura electrónica				VOCs=20, //phosphine 1// arsine 1// HF = 5 // HCl = 10
Fundições	20 onde há presença de metais tóxicos 50 em outros			
Processamento de fruta e vegetais Guiões ambientais gerais.	-50 se >50 Mwe 100 se <50 Mwe	2000 (SO ₂)	Carvão=750 Oleo = 460 Gaz =320	Dioxinas = maximo 1 ng/Nm ³
Manufatura de vidro	-20 o-nde há presença de metais tóxicos -50 em outros	-Queima óleo 1800 -Queima gás 700	1000-2000	Pb+Cd =5// total de metais pesados =5// As=1// F=1// HCl= 50

Papel e polpa	100 (forno de recuperação)		2 Kg/t ADP	H ₂ S=15 (forno de cal) //S total 1,0-1,5 Kg/t
Açúcar	100 150 para pequenos fornos >8,7 MW	2000	Combustível liquido 460 Combustível Solido 750	Odor aceitável para vizinhança
Industria de peles (curtumes)				Odor aceitável
Industria têxtil				VOCs 20
Estações termoeléctricas. (novas)	50	0.2tpdia (500MW) 0.1tpd (<500 MW)	Carvão 750 Diesel = 460 Gas 320	
Oleo vegetal	50			Odor aceitável
Preservação de madeira	50			VOCs 20

- O&G -óleos e grease, SST- sólidos suspensos totais, AOX- halides orgânicos absorvíveis, MM- media mensal
- Valores em (mg/Nm³)Nm³ – metro cúbico normal (0° C, 101.3 Kpa);
- PTS = Total de particulas em suspensão.

Anexo 7. Desenho técnico do Multiciclone e Bomba Em
fucionamento na Fábrica Açucareira de Xinavane.

DETAIL OF DISCHARGE FLANGE
SCALE 1:10

ASSEMBLY OF REPLACEABLE CELL
SCALE 1:10

DETAIL OF SLICING WATER
NOZZLE
SCALE 1:10

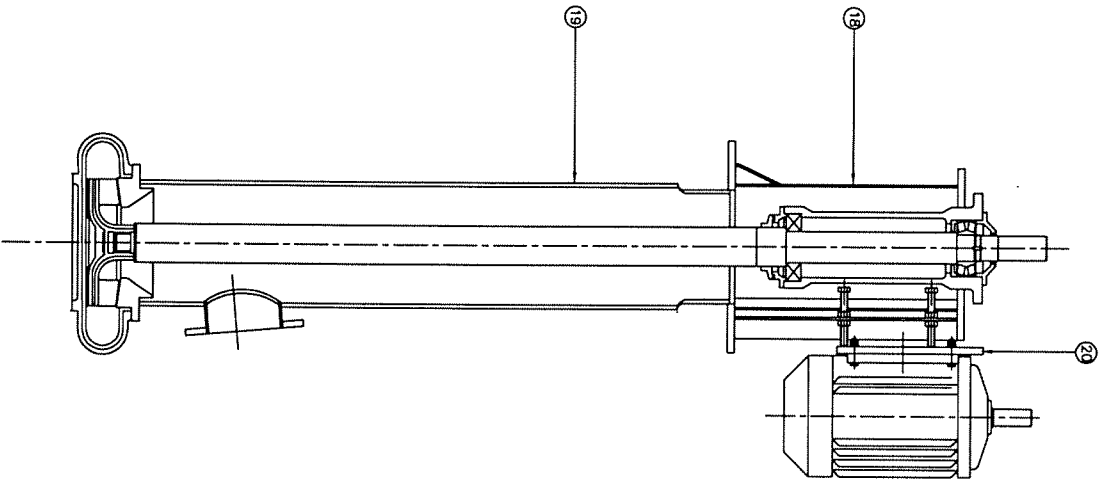
VIEW ON INLET
SCALE 1:30

PLAN VIEW
SCALE 1:30

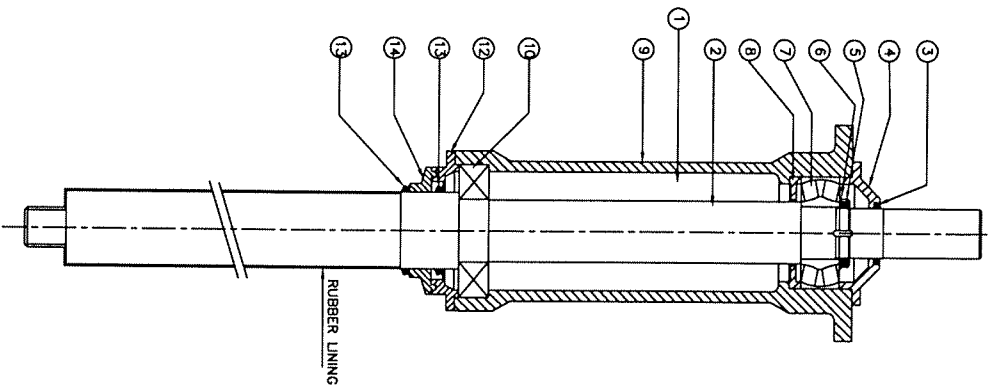
NOTE:
DUCTING TO BE SUPPORTED
INDEPENDENT OF CELL CASING

TOTAL MASS: 18200 Kg.

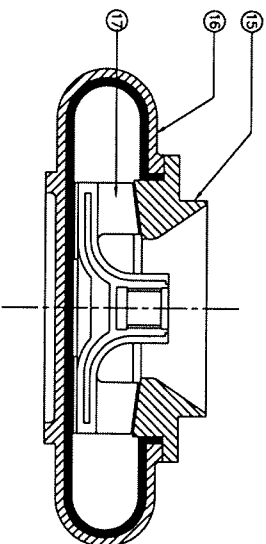
FIRST ISSUE		DATE		27/1/79		BY		RRL		CHECKED		APPROVED																																																																															
<table><tr><th colspan="4">GENERAL TOLERANCES</th><th colspan="2">1 ST ANGLE PROJECTION</th><th colspan="2">CLIENT</th><th colspan="2">JOHN THOMPSON (PTY) LTD</th><th colspan="2">DRAWING NO.</th></tr><tr><th colspan="2">MACHINE</th><th colspan="2">TOLERANCES</th><th colspan="2">INCL. FABRIC</th><th colspan="2">SITE</th><th colspan="2">MOBENI DURBAN</th><th colspan="2">07 B 47376</th></tr><tr><td>0.1</td><td>0.5</td><td>5</td><td>0.25</td><td colspan="2" rowspan="5"></td><td colspan="2" rowspan="5">THIS DRAWING IS CONFIDENTIAL AND IS THE PROPERTY OF JOHNSON ENERGY SYSTEMS SOUTH AFRICA. NO PARTS ARE TO BE REPRODUCED OR COPIED WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF JOHNSON ENERGY SYSTEMS SOUTH AFRICA. ORDER PART, OR USED FOR MANUFACTURE, WITHOUT THE EXPRESSED PERMISSION OF THE COMPANY.</td><td colspan="2" rowspan="5">12/11/07 DWN BY APPROVED PASC. ENL.</td><td colspan="2" rowspan="5">140 CELL R-TYPE GRIT COLLECTOR MOD. A</td></tr><tr><td>0.2</td><td>1</td><td>10</td><td>0.5</td></tr><tr><td>0.5</td><td>10</td><td>315</td><td>1.5</td></tr><tr><td>0.8</td><td>315</td><td>1000</td><td>0.3</td></tr><tr><td>1.2</td><td>1000</td><td>5000</td><td>0.5</td></tr><tr><td>2</td><td>2000</td><td>4000</td><td>3</td><td colspan="2" rowspan="5">ENGINEERING DRAWING PRACTICE ISO 306 PARTS 1, 2 & 3 (LATEST) REPRODUCED OR ENLARGED TO JUST FIT BR 499: PART 2 (LATEST)</td><td colspan="2" rowspan="5">SCALE</td><td colspan="2" rowspan="5">A1</td></tr><tr><td>3</td><td>4000</td><td>8000</td><td>5</td></tr><tr><td>5</td><td>8000</td><td>16000</td><td>6</td></tr><tr><td>6</td><td>16000</td><td>20000</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>														GENERAL TOLERANCES				1 ST ANGLE PROJECTION		CLIENT		JOHN THOMPSON (PTY) LTD		DRAWING NO.		MACHINE		TOLERANCES		INCL. FABRIC		SITE		MOBENI DURBAN		07 B 47376		0.1	0.5	5	0.25			THIS DRAWING IS CONFIDENTIAL AND IS THE PROPERTY OF JOHNSON ENERGY SYSTEMS SOUTH AFRICA. NO PARTS ARE TO BE REPRODUCED OR COPIED WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF JOHNSON ENERGY SYSTEMS SOUTH AFRICA. ORDER PART, OR USED FOR MANUFACTURE, WITHOUT THE EXPRESSED PERMISSION OF THE COMPANY.		12/11/07 DWN BY APPROVED PASC. ENL.		140 CELL R-TYPE GRIT COLLECTOR MOD. A		0.2	1	10	0.5	0.5	10	315	1.5	0.8	315	1000	0.3	1.2	1000	5000	0.5	2	2000	4000	3	ENGINEERING DRAWING PRACTICE ISO 306 PARTS 1, 2 & 3 (LATEST) REPRODUCED OR ENLARGED TO JUST FIT BR 499: PART 2 (LATEST)		SCALE		A1		3	4000	8000	5	5	8000	16000	6	6	16000	20000					
GENERAL TOLERANCES				1 ST ANGLE PROJECTION		CLIENT		JOHN THOMPSON (PTY) LTD		DRAWING NO.																																																																																	
MACHINE		TOLERANCES		INCL. FABRIC		SITE		MOBENI DURBAN		07 B 47376																																																																																	
0.1	0.5	5	0.25			THIS DRAWING IS CONFIDENTIAL AND IS THE PROPERTY OF JOHNSON ENERGY SYSTEMS SOUTH AFRICA. NO PARTS ARE TO BE REPRODUCED OR COPIED WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF JOHNSON ENERGY SYSTEMS SOUTH AFRICA. ORDER PART, OR USED FOR MANUFACTURE, WITHOUT THE EXPRESSED PERMISSION OF THE COMPANY.		12/11/07 DWN BY APPROVED PASC. ENL.		140 CELL R-TYPE GRIT COLLECTOR MOD. A																																																																																	
0.2	1	10	0.5																																																																																								
0.5	10	315	1.5																																																																																								
0.8	315	1000	0.3																																																																																								
1.2	1000	5000	0.5																																																																																								
2	2000	4000	3	ENGINEERING DRAWING PRACTICE ISO 306 PARTS 1, 2 & 3 (LATEST) REPRODUCED OR ENLARGED TO JUST FIT BR 499: PART 2 (LATEST)		SCALE		A1																																																																																			
3	4000	8000	5																																																																																								
5	8000	16000	6																																																																																								
6	16000	20000																																																																																									
HOWDEN ENERGY SYSTEMS : JOHANNESBURG																																																																																											
																																																																																											



ARRANGEMENT



BEARING ASSEMBLY

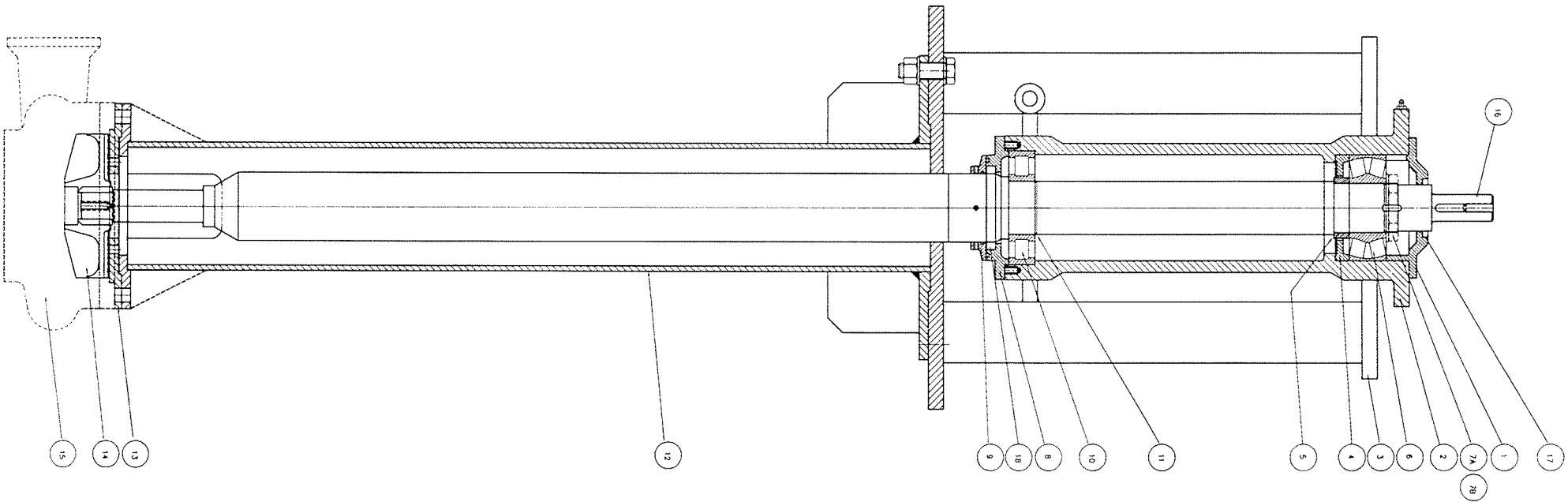


WEAR PARTS

ITEM No.	PART No.	DESCRIPTION	MATERIAL	QTY
1	PM030404	BEARING ASSEMBLY		1
2	PHR03022	SHAFT (SCREWED)	EN8	1
3	PHR950206	V-RING V70		1
4	PHR93789	COVER	CAST STEEL	1
5	RL954181	LOCK NUT	STEEL	1
6	RL954132	LOCK WASHER	STEEL	1
7	PHR953967	UPPER BEAR. (SPHERICAL ROL.)		1
8	PHR115472	SPACER	CAST STEEL	1
9	PHR93788	BEARING HOUSING	CAST STEEL	1
10	PHR954037	LOWER BEAR.(CYLINDRICAL ROL.)		1
11				
12	PHR93792	COVER WITH LABYRINTH	CAST STEEL	1
13	PHR953332	V-RING V710	RUBBER	2
14	PHR93791	SLINGER	CAST STEEL	1
15	PHR10278	INLET		1
16	PHR128354	CASING		1
17	PMR030584	IMPELLER SCREWED		1
18	PHR93793	TOP FRAME	GR 300 WA	1
19	PMR030231	BOTTOM FRAME	GR 300 WA	1
20	PHR93797	MOTOR BED PLATE	GR 300 WA	1
21				
22				

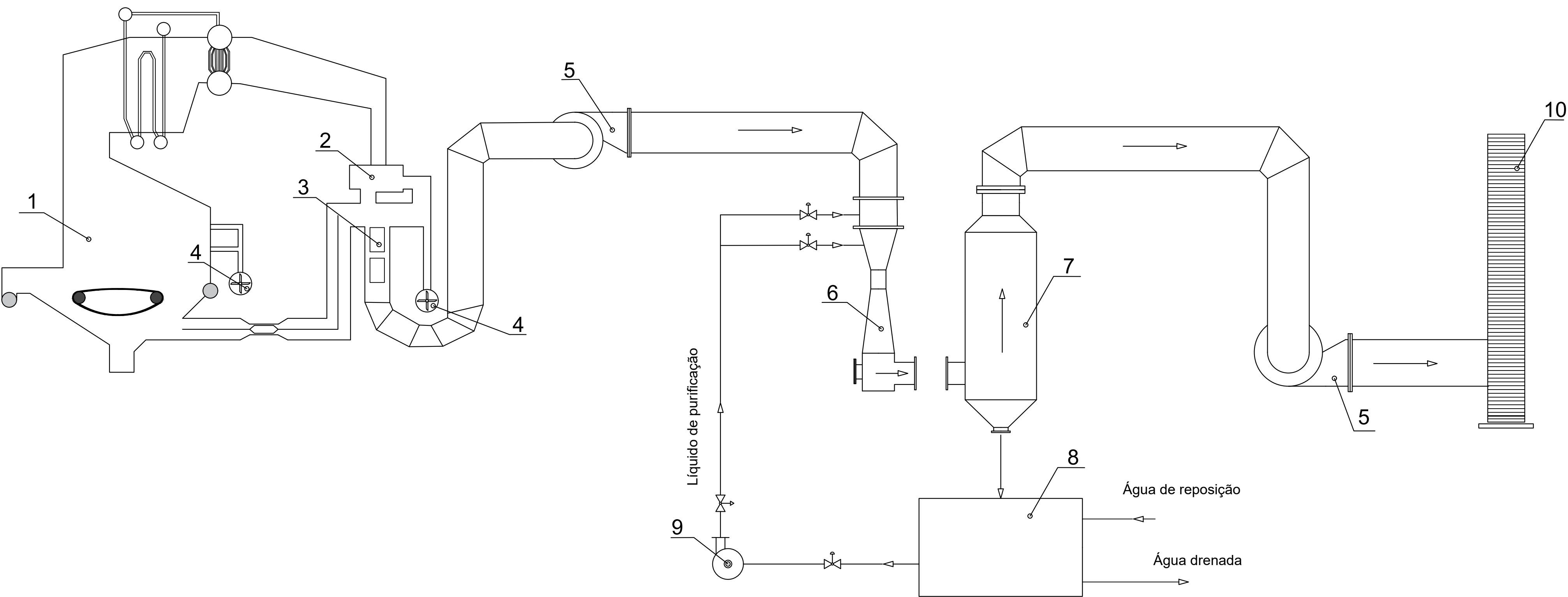
LAKESIDE EQUIPMENT CO. Industrial Estate, 2nd Fl. P.O. Box 508, New Germany 3620		Title VERTICAL PUMP - PARTS	
Date	8-7-2011	Drawn:	BA.WORTH
Scale:	1 : 1	Sheet No:	1 of 1
		Design No	
		WESTLAND PROJECTS	(01) 267-2328

ITEM	DESCRIPTION	No Req
1	COVER / LOCK	1
2	BEARING HOUSING	1
3	TOP FRAME ASSEMBLY	1
4	SPACER	1
5	SPACER RING	1
6	BEARING	1
7A	KL. NUT	1
7B	MB. WASHER	1
8	LABYRINTH COVER	1
9	SEALING RING	1
10	BEARING	1
11	ORCLIP	1
12	LOWER FRAME ASSEMBLY	1
13	CASING COVER	1
14	IMPELLER	1
15	VOLUTE CASING	1
16	SHAFT	1
17	SEAL	1
18	SEAL	1



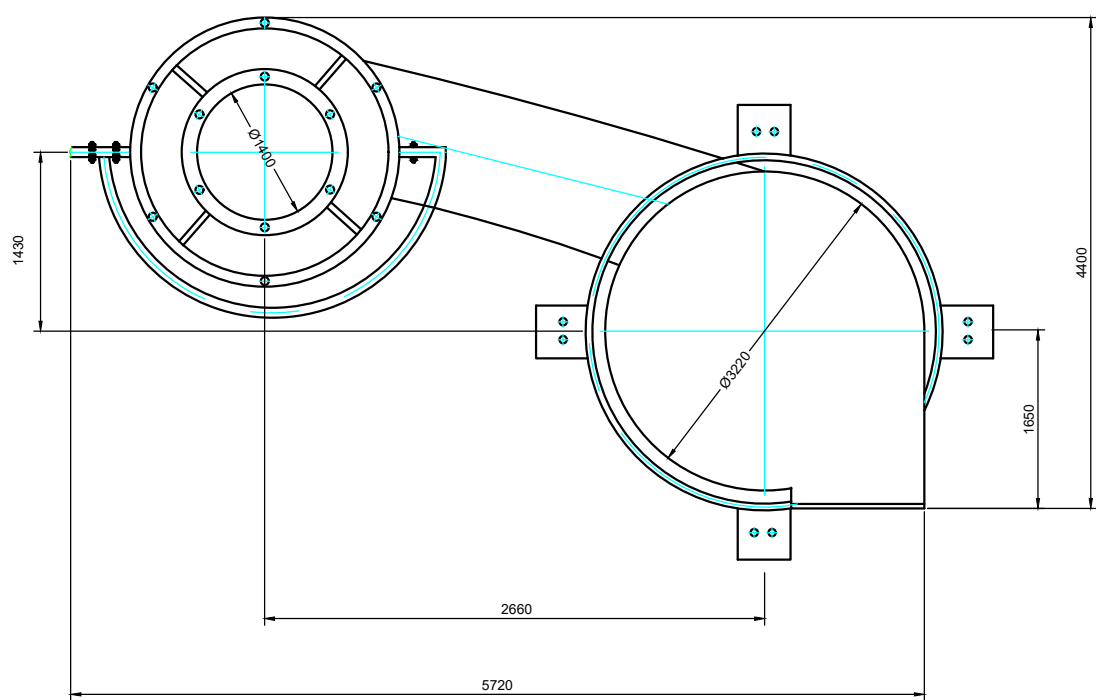
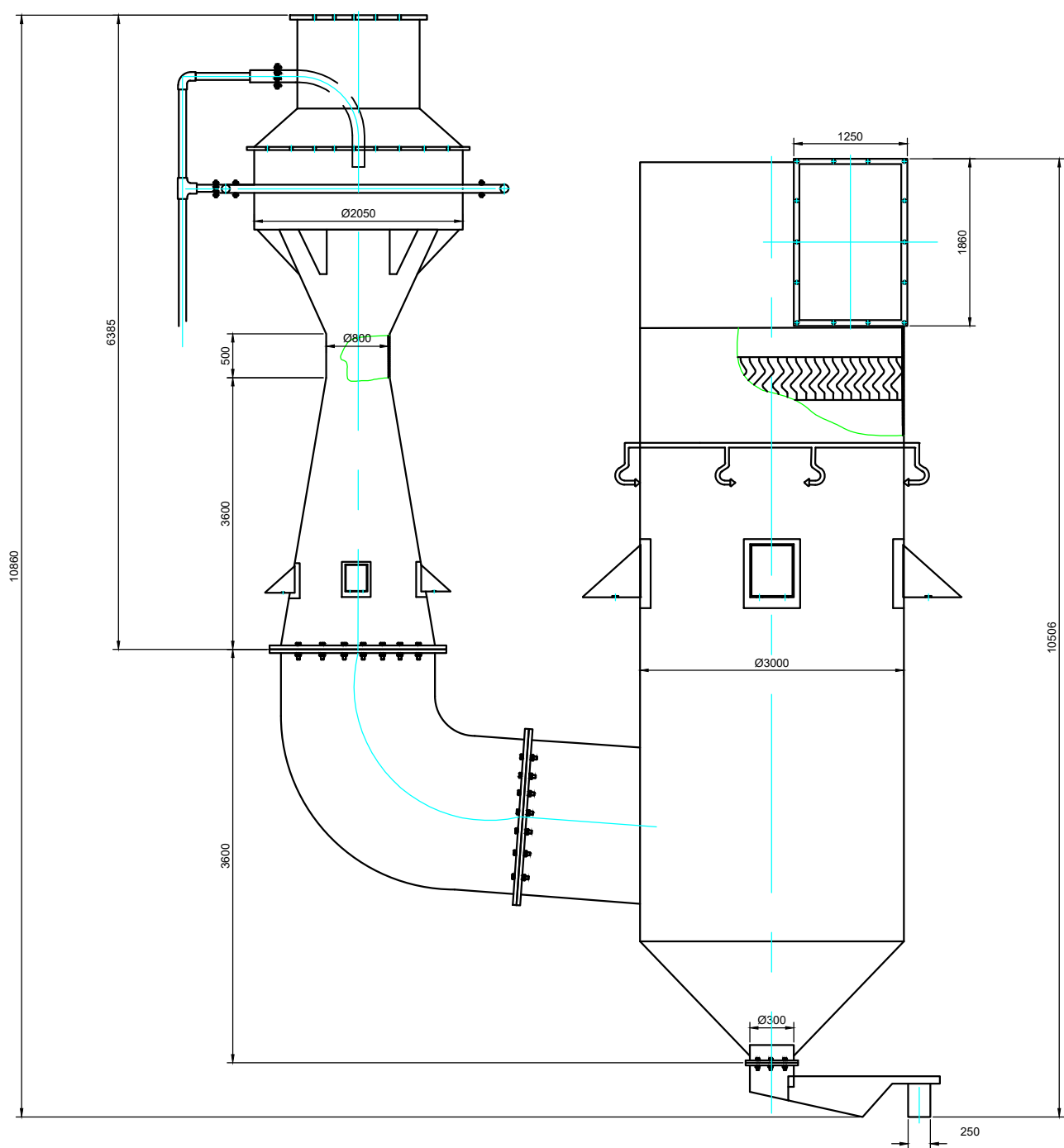
 LAKESIDE EQUIPMENT cc 8 Monaco Place Westmead Pinetown 3610 P.O. Box 500 New Germany 3620		TEL: (031) 7002137 FAX: (031) 7002034		Title STGVA VERTICAL PUMP- PARTS	
Date 4-2-2014		Drawn: B.A.WORTH		Tel/Fax: WESTLAND PROJECTS (031) 267-2328	
Scale: 1 : 1		Sheet No: 1 of 1		Dwg No	

Anexo 8. Desenho técnico do purificador Venturi e esquema do sistema de exaustão proposto para a FAX.



Folha	Zona	Ref.	Designação	Nome	Quant.	Observações
A2			TL.01.2025.VG	Esquema		
				Elementos		
		01		Caldeira Aquatubular	01	
		02		Aquecedor de Ar	01	
		03		Economizador	01	
		04		Ventilador de corrente forçada	02	
		05		Ventilador de corrente induzida	02	
A2		06		Purificador venturi	01	
A2		07		Câmara de recolha de gotas	01	
		08		Estação de tratamento de águas residuais	01	
		09		Moto-bomba vertical	01	
		10		Chaminé	01	

				TL.01.2025.VG				
Alt.	Fol.	Num. Doc.	Data	Esquema do Sistema de Exaustão proposto para a FAX		Codigo	Peso	Escala
DESEN.		António Massossote Jr.	20/02/25					1:10
VERIF.								
						Folha	Folhas	
						UEM-FE-DEMA		



Alt.	Fol.	Num. Doc.	
DESEN.		António Massossote Jr.	
VERIF.			

TL.02.2025.VG				
Purificador Venturi + Câmara de Recolha de Gotas	Codigo		Peso(Kg)	Escala
			10477	1:10
	Folha		Folhas	
Aço Inoxidável 316L	UEM-FE-DEMA			