

GUILHERME SCARAFIZ

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CICLONES PARA
SEPARAÇÃO DE PARTICULADOS DO FLUXO DE
SYNGAS EM UM REATOR DE GASEIFICAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2026

GUILHERME SCARAFIZ

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE CICLONES PARA SEPARAÇÃO DE
PARTICULADOS DO FLUXO DE SYNGAS EM UM REATOR DE
GASEIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Área de Concentração: Transferência de Calor e
Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges.

Coorientador: Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de
Lima.

UBERLÂNDIA - MG

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S285 Scarafiz, Guilherme, 1994-
2026 Estudo da utilização de ciclones para separação de particulados do fluxo de syngas em um reator de gaseificação [recurso eletrônico] / Guilherme Scarafiz. - 2026.

Orientador: Valério Luiz Borges.

Coorientador: Euclides Antônio Pereira de Lima.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.147>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Borges, Valério Luiz, 1979-, (Orient.).
II. Lima, Euclides Antônio Pereira de, 1964-, (Coorient.). III.
Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 671, PPGEM				
Data:	03/02/2026	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:55
Matrícula:	12322EMC003				
Nome do Discente:	Guilherme Scarafiz				
Título do Trabalho:	Estudo da utilização de ciclones para separação de particulados do fluxo de syngas em um reator de gaseificação				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização de materiais para projeto e construção de ciclone de alta temperatura, pré-aquecedor de ar, lavador de gases de exaustão e câmara de combustão.				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Ricardo de Andrade Medronho - UFRJ; Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho - UFU; Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima - UFU (coorientador) e Prof. Dr. Valério Luiz Borges - UFU; orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Valério Luiz Borges, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Valério Luiz Borges, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/02/2026, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/02/2026, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RICARDO DE ANDRADE MEDRONHO, Usuário Externo**, em 03/02/2026, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Euclides Antônio Pereira de Lima, Usuário Externo**, em 03/02/2026, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6829838** e o código CRC **DB154904**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que fizeram parte e acompanharam a construção deste trabalho, principalmente à minha família e à minha noiva Taicy.

Ao meu orientador Prof. Dr. Valério Luiz Borges, por todo conhecimento e aprendizado repassados, companheirismo e motivação para desenvolvimento desta dissertação.

Ao coorientador Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima e aos professores Dr. Solidônio R. de Carvalho e Dr. Marcelo Braga dos Santos, pela oportunidade e pelo tempo que trabalhamos juntos.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar esta formação.

À CAPES, CNPq, FAPEMIG, FINEP e EMBRAPPII pelo apoio financeiro.

À empresa CALMECON pela oportunidade de participar do projeto de um gaseificador.

RESUMO

Neste trabalho foi estudado o desempenho de um sistema de limpeza de gás de síntese aplicado em um reator de gaseificação, com foco na eficiência de remoção de material particulado por meio de ciclones. Para comparação entre modelos teóricos de predição de eficiência e resultados experimentais foi construída uma bancada, composta por um ciclone protótipo, soprador e sistema de alimentação de partículas, na qual foram realizados ensaios experimentais com partículas de óxido de ferro e areia, considerando suas respectivas distribuições granulométricas. Os resultados experimentais obtidos foram utilizados para comparação com os modelos de coleta propostos por Lapple, Barth, Leith & Licht e Dietz, permitindo analisar a concordância desses modelos com os resultados experimentais. Observou-se que os modelos apresentam diferenças significativas entre si, destacando a importância da validação experimental. Dentre os modelos analisados, o modelo de Leith e Licht apresentou a melhor concordância com os resultados experimentais, tanto para partículas mais finas quanto para partículas mais grossas. Foi desenvolvido um software de dimensionamento e otimização, capaz de avaliar um grande número de geometrias e selecionar configurações de ciclones com melhores desempenho, considerando simultaneamente múltiplos modelos de eficiência e a perda de carga associada. O ciclone selecionado apresentou a eficiência de 80,05% pelo modelo de Leith e Licht. A aplicação de ciclones em série foi analisada como estratégia para o aumento da eficiência de remoção de partículas, considerando a alimentação do ciclone posterior com o material não coletado no ciclone anterior. A associação de dois ciclones em série elevou a eficiência global de coleta para 91,04%, enquanto o arranjo com quatro ciclones em série atingiu 96,67%. Configurações com cinco ou mais ciclones não foram consideradas viáveis devido às limitações de espaço interno do reator. Dessa forma, o arranjo com quatro ciclones em série foi definido como a solução mais adequada, conciliando elevada eficiência de coleta e viabilidade construtiva.

Palavras-chave: Ciclones; Gaseificação; Syngas, Material particulado.

ABSTRACT

This study investigated the performance of a syngas cleaning system applied to a gasification reactor, with a focus on the efficiency of particulate matter removal using cyclones. To compare theoretical efficiency prediction models with experimental results, a test bench was built consisting of a prototype cyclone, a blower, and a particle feeding system. Experimental tests were conducted using iron oxide and sand particles with their respective particle size distributions. The experimental results were compared with the classical collection efficiency models proposed by Lapple, Barth, Leith & Licht, and Dietz, allowing the level of agreement between theoretical predictions and experimental data to be assessed. The analysis showed that the models present significant differences among themselves, highlighting the importance of experimental validation. Among the evaluated models, the Leith and Licht model exhibited the best agreement with the experimental results, both for finer and coarser particles. A sizing and optimization software was developed to evaluate a large number of cyclone geometries and to select configurations with improved performance, considering simultaneously multiple efficiency models and the associated pressure drop. The selected cyclone presented a collection efficiency of 80.05% according to the Leith and Licht model. The application of cyclones operating in series was investigated as a strategy to enhance particle removal efficiency, with each subsequent cyclone fed by the material not collected in the previous stage. The use of two cyclones in series increased the overall collection efficiency to 91.04%, while an arrangement with four cyclones in series reached 96.67%. Configurations with five or more cyclones were not considered feasible due to limitations of the reactor internal space. Therefore, the four-cyclone series arrangement was defined as the most suitable solution, combining high collection efficiency with constructive feasibility.

Keywords: Cyclones; Gasification; Syngas, Particulate Matter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Diagrama do processo de gaseificação.	16
Figura 2.2 – Influência da temperatura do processo nas características do gás de síntese.....	19
Figura 2.3 – Escoamento típico em um ciclone.....	21
Figura 2.4 – Dimensões típicas de um ciclone.	22
Figura 2.5 – Número de voltas que o gás executa no interior do ciclone em função de V_{max}	26
Figura 2.6 – Eficiência fracionária em função de dp/dpc	27
Figura 2.7 – Eficiência fracionária em função de vts/vts^*	30
Figura 2.8 – Eficiência de coleta em função da concentração de alimentação para o ciclone com geometria I.	34
Figura 2.9 – Eficiência de coleta em função da concentração de alimentação para o ciclone com geometria II.	35
Figura 2.10 – Eficiência de coleta em função da concentração de alimentação para o ciclone com geometria III.	36
Figura 2.11 – Eficiência de coleta em função concentração de sólidos para a alumina.	38
Figura 2.12 – Eficiência de coleta em função concentração de sólidos para carvão.....	39
Figura 2.13 – Geometria típica de um soprador.	43
Figura 2.14 – Curva característica de um soprador.	44
Figura 3.1 – Areia e óxido de ferro utilizados nos ensaios experimentais.....	45
Figura 3.2 – Picnômetro Micromeritics AccuPyc 1330.	46
Figura 3.3 – Instrumentação para análise de distribuição granulométrica: 1) Solução de água e amostra, 2) Agitador Hidro 2000 MU, 3) Sistema de circulação da solução, 4) Analisador Mastersize 2000 e 5) Software de leitura Mastersize 2000.	47
Figura 3.4 – Representação esquemática da bancada experimental.....	48
Figura 3.5 – Soprador industrial de 3 cv utilizado na bancada experimental.	49
Figura 3.6 – Medidor de pressão utilizado para caracterização do soprador.	50
Figura 3.7 – Válvula borboleta para controle do fluxo de ar.	50
Figura 3.8 – Esquematização da bancada para coleta da curva característica do soprador – modelo 3D.....	51
Figura 3.9 – Esquematização da bancada para coleta da curva característica do soprador – modelo com cotas.	51
Figura 3.10 – Montagem da bancada para coleta da curva característica do soprador.	52
Figura 3.11 – Montagem da instrumentação da bancada para coleta da curva característica do soprador.....	52
Figura 3.12 – Curva característica do soprador.	53
Figura 3.13 – Geometria do ciclone protótipo.....	55
Figura 3.14 – Construção do ciclone protótipo.	56
Figura 3.15 – Dispositivo de alimentação de material particulado.....	57

Figura 3.16 – Geometria do tubo Venturi para sucção do material particulado.....	58
Figura 3.17 – Construção do tubo Venturi para sucção do material particulado.	59
Figura 3.18 – Projeto da bancada experimental.....	60
Figura 3.19 – Construção da bancada experimental.....	60
Figura 3.20 – Manômetro de coluna de água em U.	61
Figura 3.21 – Padrão de nomenclatura dos experimentos.....	64
Figura 3.22 – Reator de gaseificação.....	66
Figura 4.1 – Distribuição granulométrica - Areia.	70
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica – Óxido de ferro.	71
Figura 4.3 – Distribuição granulométrica acumulada - Areia.....	72
Figura 4.4 – Distribuição granulométrica acumulada – Óxido de ferro.....	72
Figura 4.5 – Comparação dos resultados dos modelos teóricos com os resultados experimentais para a eficiência de coleta do ciclone – Areia.	77
Figura 4.6 – Comparação dos resultados dos modelos teóricos com os resultados experimentais para a eficiência de coleta do ciclone – Óxido de ferro.....	77
Figura 4.7 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Óxido de ferro V10.	80
Figura 4.8 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Óxido de ferro V15.	81
Figura 4.9 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V10.....	83
Figura 4.10 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V10 – zoom próximo ao diâmetro de corte.....	84
Figura 4.11 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V15	85
Figura 4.12 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V15 – zoom próximo ao diâmetro de corte.....	86
Figura 4.13 – Distribuição granulométrica de cinzas de gaseificação provenientes de palha de milho.	87
Figura 4.14 – Curvas: entrada, <i>underflow</i> e <i>overflow</i> para o modelo de Leith e Licht – Ciclone de primeiro estágio.	92
Figura 4.15 – Curvas: entrada, <i>underflow</i> e <i>overflow</i> para o modelo de Leith e Licht – Ciclone de segundo estágio.	94
Figura 4.16 – Esquematização do reator com quatro ciclones em série e suas respectivas eficiências.	98
Figura 4.17 – Modelo 3D do reator de gaseificação com quatro ciclones em série.	99

LISTA DE SÍMBOLOS

CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica do ciclone
D_d	Diâmetro do tubo inferior do ciclone (<i>underflow</i>)
D_e	Diâmetro do tubo de saída superior do ciclone (<i>overflow</i>)
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica do ciclone
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica do ciclone
d_{in}	Diâmetro hidráulico
d_p	Diâmetro da partícula
d_{pc}	Diâmetro de corte
F_c	Força centrífuga
g	Aceleração da gravidade
H_2	Hidrogênio
H	Altura do duto de entrada do ciclone
K_v	Coeficiente de vazão
L_b	Altura da parte cilíndrica do ciclone
L_t	Altura do ciclone
m_c	Massa de partículas coletada pelo ciclone
m_{ent}	Massa de partículas que entra no ciclone
m_p	Massa da partícula
N_s	Número de voltas que o gás executa no interior do ciclone
Q	Vazão do fluido
v_c	Velocidade do gás no cilindro do ciclone
v_{exit}	Velocidade do gás na saída do ciclone
v_{in}	Velocidade de entrada do gás no ciclone
v_r	Velocidade radial relativa da partícula em relação ao gás
v_t	Velocidade tangencial da partícula
W	Largura do duto de entrada do ciclone
f	Fator de atrito
ρ_f	Densidade do fluido

ρ_p	Densidade da partícula
μ	Viscosidade do fluido
η	Eficiência de coleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	15
2.2	CICLONES	20
2.2.1	Famílias de Ciclones	21
2.2.2	Eficiência de Coleta	23
2.2.2.1	Modelo de Lapple	25
2.2.2.2	Modelo de Barth	28
2.2.2.3	Modelo de Leith e Licht	30
2.2.2.4	Modelo de Dietz	32
2.2.3	Influência da concentração de partículas na eficiência de coleta	33
2.2.4	Queda de pressão em ciclones	39
2.3	CURVA CARACTERÍSTICA DOS SOPRADORES	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	MATERIAL PARTICULADO	45
3.1.1	Determinação da densidade dos materiais particulados	46
3.1.2	Determinação da granulometria dos materiais particulados	46
3.2	SISTEMA EXPERIMENTAL	47
3.2.1	Obtenção da curva característica do soprador	48
3.2.2	Ciclone protótipo	53
3.2.3	Sistema de alimentação de material particulado	57
3.2.3.1	Tubo Venturi para sucção de material particulado	58
3.3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	61
3.3.1	Velocidade do fluxo de ar	61
3.3.2	Perda de pressão no ciclone	62
3.3.3	Testes experimentais	62
3.3.4	Eficiência de coleta	65
3.4	DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESTIMAR A GEOMETRIA MAIS EFICIENTE DE UM CICLONE APLICADO AO UM GASEIFICADOR	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS	69
4.1.1	Densidade	69
4.1.2	Granulometria	69
4.2	PERDA DE CARGA NO CICLONE PROTÓTIPO	74
4.3	EFICIÊNCIAS DE COLETA	75
4.3.1	Comparação dos modelos teóricos X experimentos – Óxido de ferro	78
4.3.2	Comparação dos modelos teóricos X experimentos – Areia	81

4.4	GEOMETRIA DO CICLONE PARA O REATOR DE GASEIFICAÇÃO....	86
4.4.1	Arranjo de ciclones em série para o reator de gaseificação	90
4.4.1.1	Dois ciclones em série para o reator de gaseificação	90
4.4.1.2	Quatro ciclones em série para o reator de gaseificação.....	96
5	CONCLUSÃO	100
6	REFERÊNCIAS.....	102
7	APÊNDICE A – SOFTWARES DESENVOLVIDOS NA DISSERTAÇÃO	
	104	

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crescente demanda por fontes alternativas de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento energético de biomassa e resíduos sólidos. Nesse contexto, a gaseificação destaca-se como um processo termoquímico capaz de converter materiais que contêm carbono em um gás combustível, conhecido como gás de síntese ou *syngas*, composto principalmente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄) (BASU, 2006; CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Durante o processo de gaseificação, ocorre a formação de material particulado constituído por cinzas, partículas de material não convertido e fragmentos minerais, que pode ser arrastado pelo escoamento gasoso. A presença desse particulado no gás de síntese representa um fator limitante para sua utilização em equipamentos de conversão energética, como motores, turbinas e caldeiras, podendo provocar desgaste mecânico, erosão, incrustações e falhas operacionais.

A limpeza do gás de síntese é, portanto, uma etapa fundamental em sistemas de gaseificação. Entre as tecnologias empregadas para a separação sólido-gás, destacam-se os separadores ciclônicos. Cooper e Alley (2011) abordam algumas vantagens dos separadores ciclônicos em comparação com outros equipamentos de separação sólidos-fluido: o particulado coletado permanece seco; baixo investimento inicial e menores custos de manutenção; estrutura compacta em grande parte das aplicações; capacidade de operar sob condições extremas, como altas temperaturas, pressões elevadas e ambientes quimicamente agressivos; ausência de partes móveis; podem ser fabricados com uma ampla variedade de materiais, como ligas metálicas, plásticos, cerâmicas, entre outros; possibilidade de revestimento interno com materiais resistentes à erosão; superfícies internas podem ser polidas para reduzir o acúmulo de resíduos.

O princípio de funcionamento dos ciclones baseia-se na indução de um escoamento helicoidal, no qual as partículas são submetidas a força centrífuga que promovem sua migração em direção à parede do equipamento, sendo posteriormente coletadas. A eficiência desse processo está diretamente relacionada à geometria do

ciclone, às propriedades do gás, ao tamanho e à densidade das partículas, bem como à vazão do escoamento (LAPPLE, 1951; STAIRMAND, 1951; LEITH; LICHT, 1972).

Devido à sua versatilidade, os ciclones são amplamente utilizados nas indústrias, com aplicações tais como secadores, reatores, recuperadores catalíticos e separadores centrífugos.

Setores como mineração e metalurgia também podem fazer o uso de ciclones para a separação de partículas sólidas durante a extração e beneficiamento mineral, além do controle de poeira em operações metalúrgicas (como por exemplo, poeiras resultantes de cortes e desbastes de metais). Na indústria de cimento, esses equipamentos são aplicados no controle de emissões durante processos de calcinação e moagem, devido à sua robustez e capacidade de operar em altas temperaturas. Essas características tornam os ciclones adequados para aplicações em processos termoquímicos, nos quais filtros convencionais podem apresentar limitações operacionais.

Além da função principal de remoção de partículas, o escoamento helicoidal induzido pelos ciclones resulta em um aumento do percurso do gás e das partículas no sistema, que resulta no aumento do tempo de residência do escoamento. Em processos de gaseificação, maiores tempos de residência são frequentemente relacionados à redução da formação de alcatrões e à melhoria da conversão termoquímica (STEVENS, 2001; CORELLA; AZNAR; GIL, 2004).

Nesse cenário, torna-se evidente a importância de estudos voltados ao dimensionamento de separadores ciclônicos aplicados à limpeza do gás de síntese, considerando as condições reais de operação de reatores de gaseificação.

1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal dimensionar um sistema de limpeza do gás de síntese proveniente de um reator de gaseificação, utilizando ciclones para remoção do material particulado gerado no processo. O estudo visa critérios de projeto e avaliação de desempenho considerando as condições reais de operação do sistema.

O trabalho tem também como objetivo a construção de uma bancada experimental com a finalidade de avaliar o desempenho de ciclones em condições

controladas, possibilitando a obtenção de dados experimentais de eficiência de coleta e perda de carga. Esses resultados experimentais serão utilizados para comparação com resultados obtidos a partir dos modelos de Lapple (1951), Barth (1956), Leith & Licht (1972) e Dietz (1981).

Outro objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um software em Matlab para otimização e dimensionamento de ciclones, a partir de dados de entrada como: vazão do gás, propriedades físicas do escoamento, características do material particulado e restrições geométricas do ciclone. O software tem como finalidade testar diferentes geometrias e calcular sua eficiência de coleta a partir dos quatro modelos teóricos, auxiliando a identificação da geometria mais adequada às condições impostas pelo processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é um processo termoquímico empregado na conversão de materiais que possuem carbono em um gás combustível, por meio de sua oxidação parcial em condições controladas de temperatura e atmosfera (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Diferentemente da combustão, na qual o material é completamente oxidado, a gaseificação ocorre com o fornecimento restrito de agente oxidante, em quantidades inferiores à estequiométrica. Esse agente pode ser ar atmosférico, oxigênio puro, vapor d'água superaquecido ou combinações entre esses (BASU, 2006). A limitação de oxidante é intencional e fundamental para a formação dos gases combustíveis, pois impede a oxidação total do carbono presente na matéria-prima.

O produto principal do processo é uma mistura gasosa conhecida como gás de síntese, ou *syngas*, composta predominantemente por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), podendo conter ainda dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor d'água em diferentes proporções. A composição e poder calorífico do *syngas* depende de diversos fatores, como as características da matéria prima, as condições operacionais e o agente oxidante empregado (BASU, 2006).

O gás de síntese apresenta ampla gama de aplicações, podendo ser utilizado tanto para a geração direta de calor quanto para a produção de energia mecânica e elétrica, por meio de sua queima em motores de combustão interna, turbinas a gás ou caldeiras (BASU, 2006). Ainda, o *syngas* pode ser empregado como insumo em processos de síntese química, possibilitando a produção de combustíveis líquidos e de diversos produtos químicos de interesse industrial, como metanol, etanol, amônia e hidrogênio (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Além disso, a queima do gás de síntese em fornos e fornalhas originalmente projetados para operar com combustíveis fósseis líquidos ou gasosos pode ser realizada sem a necessidade de grandes alterações no equipamento (HOSS; GROENEVELD, 1987).

Em diversas situações a gaseificação mostra-se tecnicamente mais vantajosa do que a combustão direta ou o uso de combustíveis fósseis. Um exemplo é a produção de energia elétrica em sistemas de pequena escala, a qual pode ser realizada sem a necessidade da utilização de um ciclo a vapor, por meio do aproveitamento direto do gás gerado, em motores de combustão interna ou turbinas a gás (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). No entanto, para viabilizar essas aplicações, torna-se imprescindível a realização da limpeza do gás, especialmente quando destinado ao uso em motores e turbinas, de modo a evitar danos nestes equipamentos (BEENACKERS; MANIATIS, 1993).

Do ponto de vista operacional, o processo de gaseificação pode ser descrito como a sucessão de etapas que ocorrem no interior do gaseificador. Segundo Molino; Chianese; Musmarra (2016), as principais etapas que compõem o processo são a secagem, a pirólise, a oxidação e a redução. Dentre essas etapas, a secagem, a pirólise e a redução são processos endotérmicos, e necessitam do fornecimento de energia para ocorrer, a qual é normalmente fornecida pelas reações exotérmicas associadas à etapa de oxidação. De forma esquemática, o processo de gaseificação pode ser representado conforme ilustrado na Figura 2.1.

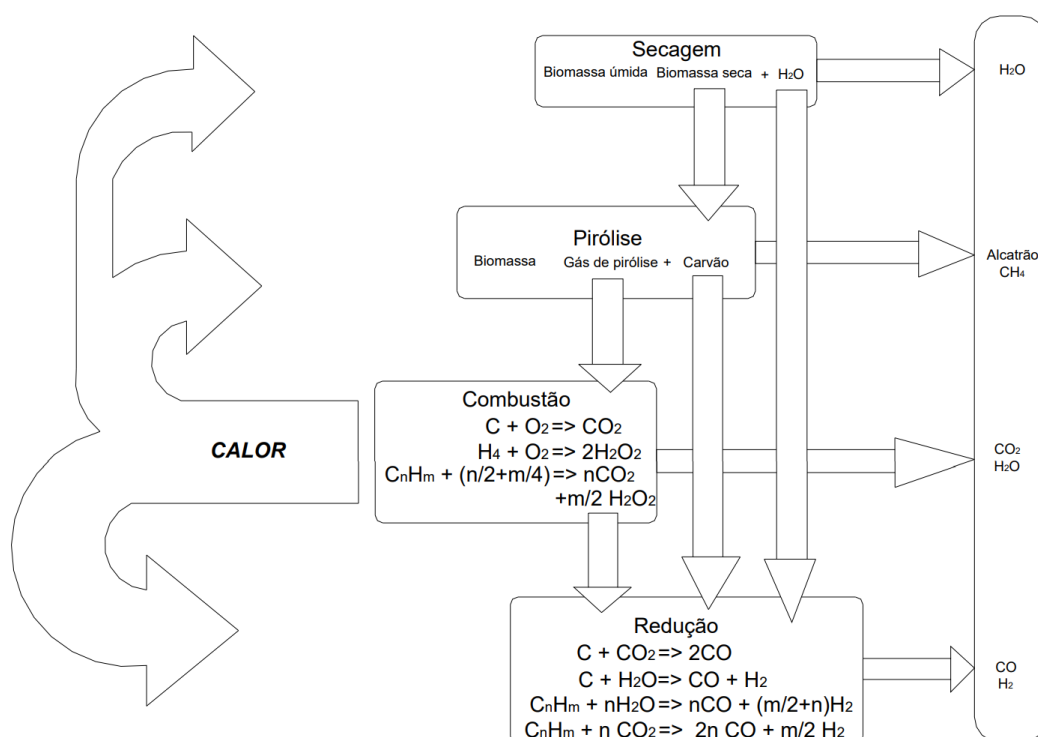


Figura 2.1 – Diagrama do processo de gaseificação.

Fonte: Andrade (2007).

A etapa de secagem consiste no aquecimento do combustível sólido com o objetivo de reduzir seu teor de umidade. Essa fase requer uma quantidade significativa de energia, uma vez que parte do calor fornecido ao sistema é consumida na evaporação da água presente no material. O controle inadequado da umidade é um dos principais fatores associados ao insucesso na produção de gás de síntese, uma vez que combustíveis excessivamente úmidos tendem a gerar um *syngas* de baixa qualidade, com elevado teor de vapor d'água, menor poder calorífico e problemas operacionais, como a formação excessiva de fumaça (BASU, 2010).

Além do teor de umidade, a velocidade de secagem é um parâmetro relevante para a eficiência do processo. Segundo Cardoso (2014), essa velocidade está associada a diversas variáveis, como a umidade inicial do combustível e sua área de superfície. Em materiais sólidos, o aumento da superfície de contato favorece as trocas térmicas e intensifica as reações envolvidas, reduzindo o tempo necessário para a secagem. Dessa forma, a adequação da granulometria do combustível sólido é essencial para melhorar a eficiência do processo de gaseificação.

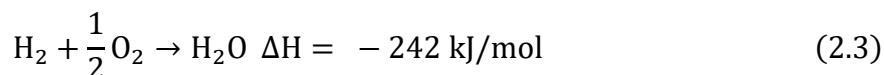
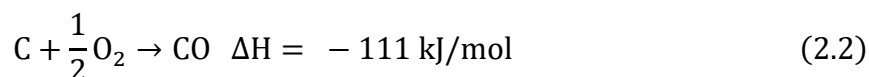
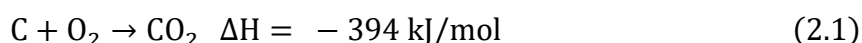
Após a secagem, o material segue para a zona de pirólise. A pirólise é um processo que ocorre na ausência de agente oxidante, ou com fornecimento extremamente limitado, de modo a inibir a oxidação do combustível. Esse estágio ocorre em temperaturas geralmente entre 250 °C e 700 °C (MOLINO; CHIANESE; MUSMARRA, 2016). Durante a pirólise, o calor absorvido provoca o aumento da temperatura das partículas, desencadeando reações responsáveis pela liberação de compostos voláteis.

Como resultado da pirólise, formam-se produtos sólidos ricos em carbono, como o carvão, além de frações líquidas e gasosas. A fase gasosa é composta principalmente por dióxido de carbono, monóxido de carbono e metano, podendo conter ainda pequenas quantidades de hidrogênio e outros hidrocarbonetos leves. As proporções entre as frações sólida, líquida e gasosa dependem tanto das características do material pirolisado quanto das condições operacionais do processo (MOLINO; CHIANESE; MUSMARRA, 2016). Por se tratar de uma etapa endotérmica, a pirólise também requer energia proveniente da etapa de oxidação.

Já a oxidação é responsável por fornecer a energia necessária para as demais etapas do processo, por meio de um conjunto de reações exotérmicas que ocorrem

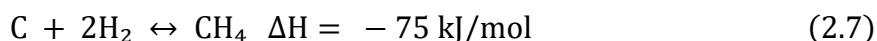
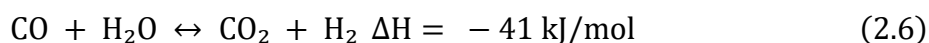
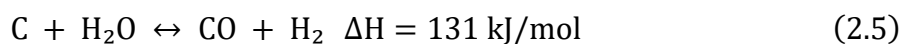
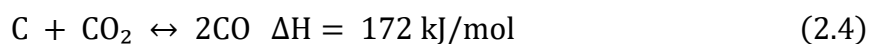
com deficiência de oxigênio em relação à quantidade estequiométrica, de modo que apenas parte da matéria-prima seja oxidada.

Embora a oxidação parcial envolva todos os compostos que possuem carbono, incluindo os alcatrões, é possível simplificar a análise do processo assumindo que apenas o carvão sólido (*char*) e o hidrogênio presente no gás de síntese participem efetivamente das reações de oxidação parcial (MOLINO; CHIANESE; MUSMARRA, 2016). Considerando apenas a oxidação do hidrogênio e da parte sólida, as reações são descritas de acordo com as Eq. 2.1 a 2.3.



O principal resultado desta etapa é a geração da energia térmica necessária nas demais etapas do processo de gaseificação (secagem, pirólise e redução). Como produto da combustão, forma-se uma mistura composta por monóxido de carbono, dióxido de carbono e vapor d'água. O nitrogênio pode estar presente quando a oxidação da biomassa é realizada com ar atmosférico, mas quando se utiliza oxigênio puro como agente oxidante, a presença de nitrogênio torna-se praticamente desprezível.

A etapa de redução envolve todos os produtos gerados nas fases de pirólise e oxidação. Nessa fase, a mistura gasosa formada e o carvão residual (*char*) reagem entre si, resultando na produção do gás de síntese. As principais reações que ocorrem durante a etapa de redução são apresentadas a seguir (BASU, 2006):



As reações 2.4 e 2.5 são endotérmicas, enquanto as reações 2.6 e 2.7 são exotérmicas. Entretanto, a contribuição energética destas reações exotérmicas torna a etapa de redução globalmente endotérmica, exigindo, portanto, o fornecimento de energia proveniente das reações de oxidação.

As reações endotérmicas 2.4 e 2.5 são favorecidas com o aumento da temperatura, deslocando o equilíbrio no sentido da formação dos produtos, enquanto as reações exotérmicas 2.6 e 2.7 são favorecidas em temperaturas mais baixas.

De acordo com Molino; Chianese; Musmarra (2016), a temperatura em que ocorre a etapa de redução exerce papel determinante na composição do gás de síntese e, conseqüentemente, em suas propriedades, como o poder calorífico e concentração de alcatrão. Temperaturas elevadas promovem maior conversão do *char*, reduzindo a quantidade de resíduo sólido, além de minimizar a formação de alcatrões. Por outro lado, temperaturas muito elevadas aumentam o risco de sinterização das cinzas dentro do reator e podem diminuir o poder calorífico do *syngas*.

Portanto, a temperatura de redução é extremamente relevante para processo, influenciando na qualidade do gás de síntese produzido. Os efeitos da temperatura de redução são ilustrados na Figura 2.2.

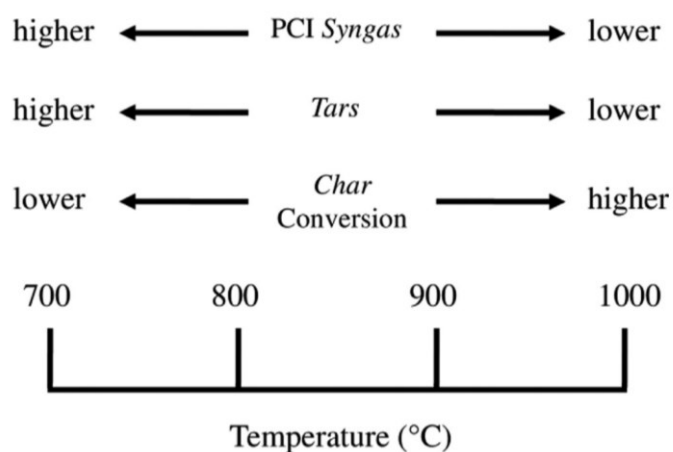


Figura 2.2 – Influência da temperatura do processo nas características do gás de síntese.

Fonte: Molino; Chianese; Musmarra (2016).

2.2 CICLONES

Os separadores ciclônicos apresentam, em geral, uma configuração clássica composta por uma seção cilíndrica acoplada a um cone, caracterizando o formato cone-cilindro. Trata-se de equipamentos de construção simples, robustos e sem partes móveis, o que lhes confere elevada confiabilidade e baixo custo de manutenção. O ciclone possui uma entrada lateral, por onde o fluido que contém partículas é admitido, e duas saídas dispostas ao longo de seu eixo. A saída inferior (*underflow*), localizada na base do cone, conduz os sólidos separados até o reservatório coletor, enquanto a saída superior (*overflow*) conduz o gás “limpo”, mas que ainda contém uma fração de partículas finas que não foram coletadas pelo ciclone (CREMASCO, 2018).

Segundo Cremasco (2018), devido sua configuração construtiva e da dinâmica de escoamento em seu interior, o ciclone é classificado como um separador centrífugo, uma vez que o fluido, ao ingressar tangencialmente no equipamento, é forçado a seguir um movimento helicoidal descendente ao longo das paredes internas, formando um vórtice. A força centrífuga atua sobre as partículas sólidas e direciona-as para a parede do ciclone. Quando tocam à superfície, as partículas perdem energia cinética por atrito e são conduzidas para a base do cone, onde se acumulam e são descarregadas no coletor.

Já a fase gasosa, após atingir a região cônica inferior, inverte o sentido e passa a ascender em espiral. Esse movimento ascendente conduz o fluido até a saída do ciclone (*overflow*), arrastando as partículas mais finas que não foram separadas. O processo de separação, portanto, resulta da interação entre forças centrífugas, resistências aerodinâmicas e efeitos gravitacionais, sendo fortemente influenciado pela geometria do ciclone e pelas condições de operação. O escoamento do sistemas fluido-partículas, típico em um ciclone é ilustrado na Figura 2.3.

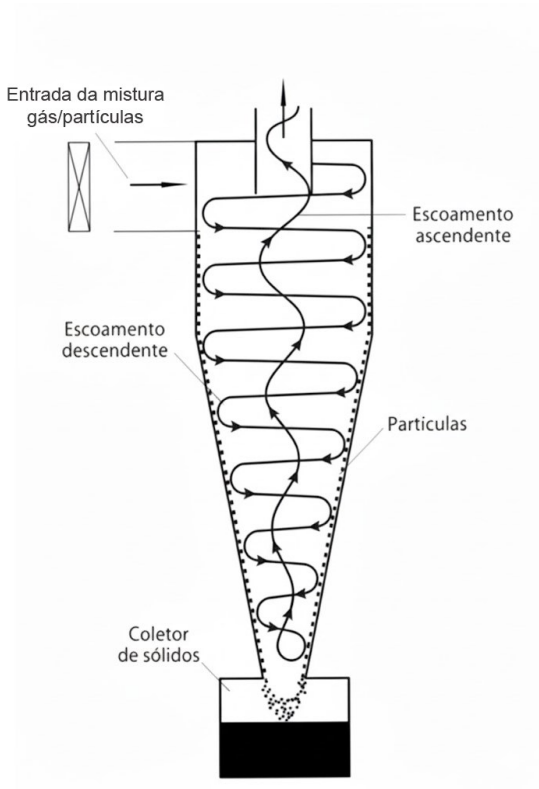


Figura 2.3 – Escoamento típico em um ciclone.

Fonte: Cremasco (2018).

2.2.1 Famílias de Ciclones

Os ciclones são agrupados em famílias que mantêm proporções geométricas constantes entre suas dimensões e o diâmetro da parte cilíndrica (D_c).

De forma geral, os ciclones possuem quatro componentes principais: entrada tangencial, corpo cilíndrico, parte cônica e tubo de saída do gás limpo, além do coletor de sólidos na base. Apesar desta estrutura básica ser comum, as proporções entre essas partes variam conforme a família adotada.

Entre as configurações mais conhecidas estão as famílias propostas por Lapple (1951) e Stairmand (1951).

As relações geométricas dessas famílias são expressas em função de D_c , determinando as dimensões de entrada, do tubo de saída e do comprimento do cilindro e do cone. A manutenção dessas proporções garante que ciclones de uma mesma família apresentem desempenho semelhante, mesmo em diferentes escalas.

A Figura 2.4 exibe as configurações geométricas de um ciclone a gás, enquanto a Tabela 2.1 exibe as principais proporções de cada família.

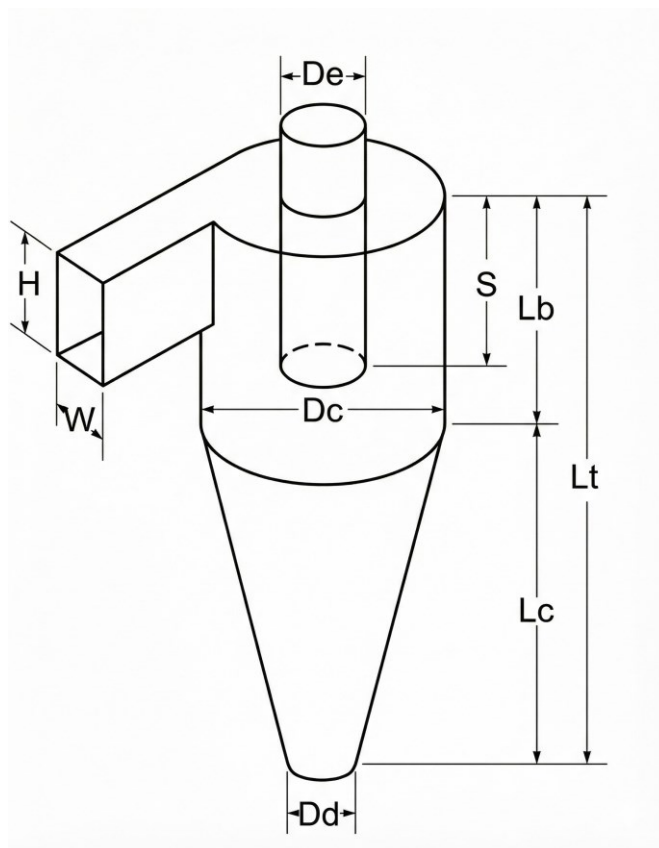


Figura 2.4 – Dimensões típicas de um ciclone.

Fonte: Autor (2025).

Tabela 2.1 – Proporções geométricas de famílias de ciclones.

Fonte	Aplicação Recomendada	Dc	H/Dc	W/Dc	De/Dc	S/Dc	Lb/Dc	Lt/Dc	Dd/Dc
STAIRMAND (1951)	Alta eficiência	1	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	4	0,38
SWIFT (1969)	Alta eficiência	1	0,4	0,21	0,4	0,5	1,4	3,9	0,4
LAPPLE (1951)	Uso geral	1	0,5	0,25	0,5	0,63	2	4	0,25
SWIFT (1969)	Uso geral	1	0,5	0,25	0,5	0,6	1,8	3,8	0,4
STAIRMAND (1951)	Alta vazão	1	0,8	0,38	0,75	0,88	1,5	4	0,38
SWIFT (1969)	Alta vazão	1	0,8	0,35	0,75	0,85	1,7	3,7	0,4

2.2.2 Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta em ciclones, η , é definida como a fração de partículas que é retida no *underflow* em relação à quantidade de partículas que entraram no equipamento, de acordo com a Eq. (2.8). Trata-se de um dos principais parâmetros de um ciclone, sendo utilizada tanto para análise comparativa de geometrias quanto para a previsão do comportamento operacional em diferentes condições de escoamento. Esta eficiência de coleta depende de variáveis operacionais, como a velocidade de entrada do fluido, além das propriedades físicas das partículas, como diâmetro e densidade e propriedades físicas do fluido (densidade e viscosidade) (PERRY; GREEN, 2008).

$$\eta = \frac{m_c}{m_{ent}} \quad (2.8)$$

Onde: η , é a eficiência de coleta; m_c é a massa de partículas coletadas pelo ciclone; m_{ent} é a massa de partículas que entraram no equipamento.

A influência da geometria do ciclone, contudo, possui maior complexidade para previsão da eficiência de coleta. Enquanto alguns modelos teóricos incluem as diversas dimensões do equipamento como altura e diâmetro do cilindro, altura do cone, dimensões do duto de saída, entre outras, outros modelos consideram apenas algumas destas variáveis, simplificando o modelo matemático. Essa divergência reflete a dificuldade em estabelecer um único conjunto de hipóteses que modele adequadamente a eficiência de um ciclone em variadas condições operacionais e mostra a importância de testes experimentais.

O princípio de funcionamento de um ciclone baseia-se no balanço da força centrífuga, gerada pelo movimento rotacional do gás, que projeta as partículas para a parede do equipamento e a força de arraste, resultante do escoamento interno em direção ao eixo, que atua mantendo parte das partículas em suspensão e conduzindo-as para o *overflow*. A separação, portanto, depende da predominância da força centrífuga sobre a de arraste (HOFFMANN; STEIN, 2008). A força centrífuga atuante na partícula pode ser calculada conforme Eq. (2.9).

$$F_c = \frac{m_p v_t^2}{r} \quad (2.9)$$

Onde: m_p é a massa da partícula; v_t é a velocidade tangencial da partícula; r é o raio da trajetória da partícula.

Aproximando as partículas como sendo esféricas, a massa da partícula pode ser determinada pela Eq. (2.10).

$$m_p = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \quad (2.10)$$

Onde: d_p é o diâmetro da partícula e ρ_p é a densidade da partícula.

Logo, a força centrífuga pode ser reescrita como:

$$F_c = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{v_t^2}{r} \quad (2.11)$$

Já a força de arrasto, pode ser determinada pela Eq. (2.12).

$$F_d = 3\pi\mu d_p v_r \quad (2.12)$$

Onde: μ é a viscosidade do fluido, v_r é a velocidade radial relativa da partícula em relação ao gás.

Analisando as Eq. (2.11) e Eq. (2.12), fica evidente que F_c e F_d são funções do diâmetro da partícula, porém F_c cresce muito mais rápido que F_d com o aumento do diâmetro, uma vez que F_d é proporcional ao diâmetro da partícula ao cubo. Portanto, partículas maiores são mais facilmente capturadas; partículas muito finas, por outro lado, tendem a escapar pelo fluxo ascendente.

A eficiência de coleta ainda pode ser dividida de duas maneiras: A eficiência individual, que corresponde à probabilidade de captura de partículas com um diâmetro específico, e a eficiência global corresponde à razão entre a massa total de sólidos

coletada e a massa total de sólidos alimentada, considerando a distribuição granulométrica completa do material particulado (MASSARANI, 2001). Dessa forma, ainda que partículas finas apresentem baixa probabilidade de captura individual, sua contribuição para a eficiência global dependerá da proporção em que aparecem na alimentação (PERRY; GREEN, 2008).

Dada a complexidade do escoamento e da interação da partícula-fluido, diversos modelos teóricos foram propostos ao longo das últimas décadas. Essa diversidade de modelos evidencia que a previsão da eficiência de coleta envolve hipóteses específicas e que os resultados podem variar significativamente em função da geometria e das condições de operação.

2.2.2.1 Modelo de Lapple

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para a estimativa da eficiência em ciclones foi proposto por Lapple (1951). Esse modelo se tornou referência, uma vez que buscava estabelecer uma correlação simples entre a geometria do ciclone e as condições operacionais.

O modelo de Lapple parte do conceito de diâmetro de corte, d_{pc} , definido como o diâmetro da partícula que possui 50% de probabilidade de ser coletada. A ideia central do modelo é que as partículas entram no ciclone a uma certa distância radial do eixo central e, para serem coletadas, devem percorrer essa distância até a parede do ciclone durante o tempo de residência do escoamento no ciclone.

Lapple (1951) assumiu que o material particulado na entrada do ciclone está uniformemente distribuído e definiu que a partícula que parte da metade da largura da entrada até a parede interna do ciclone, no tempo de residência do gás, corresponde ao diâmetro de corte. O diâmetro de corte proposto por Lapple é calculado através da Eq. (2.13).

$$d_{pc} = \frac{9 \mu W}{\pi \cdot N_s \cdot V_i (\rho_p - \rho_f)} \quad (2.13)$$

Onde:

μ é a viscosidade do gás;

W é a largura do duto de entrada;

ρ_p é a densidade das partículas;

ρ_f é a densidade do fluido;

N_s é o número de voltas que o gás executa no interior do ciclone.

Lapple estimou $N_s = 5$ como valor médio.

Perry e Green (2008), exibem um gráfico para encontrar o número de voltas que o gás executa no interior do ciclone, em função da velocidade máxima, V_{max} (entrada ou saída) do fluído no ciclone (Figura 2.5).

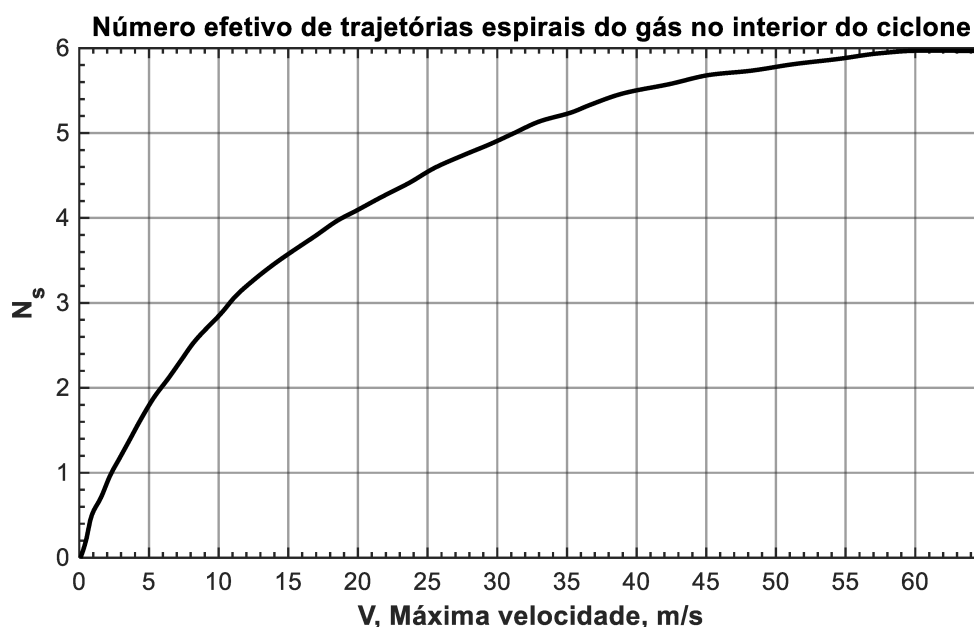


Figura 2.5 – Número de voltas que o gás executa no interior do ciclone em função de V_{max} .

Fonte: Adaptado de Perry e Green (2008).

A partir do cálculo do diâmetro de corte, a eficiência individual para qualquer partícula pode ser determinada pela razão entre seu diâmetro e o diâmetro de corte através da curva de eficiência de Lapple (Figura 2.6).

O eixo horizontal da curva representa a razão entre o diâmetro da partícula e o diâmetro de corte (d_p/d_{pc}), enquanto o eixo vertical indica a eficiência individual de coleta, definida como a fração de partículas daquele tamanho efetivamente coletadas. Valores de d_p/d_{pc} inferiores à 1 correspondem a partículas menores que o diâmetro de corte e, portanto, apresentam probabilidades menores que 50% de serem

coletadas. À medida que essa razão se aproxima de 1, ou seja, $d_p = d_{pc}$, a probabilidade de coleta se aproxima de 50%, característica fundamental da definição do diâmetro de corte.

Para valores de d_p/d_{pc} superiores a 1, a eficiência de coleta cresce rapidamente, tendendo assintoticamente a 100% para partículas significativamente maiores que o diâmetro de corte. Esse comportamento reflete o aumento das forças centrífugas atuantes sobre partículas de maior diâmetro, que favorecem seu deslocamento em direção à parede do ciclone e sua coleta.

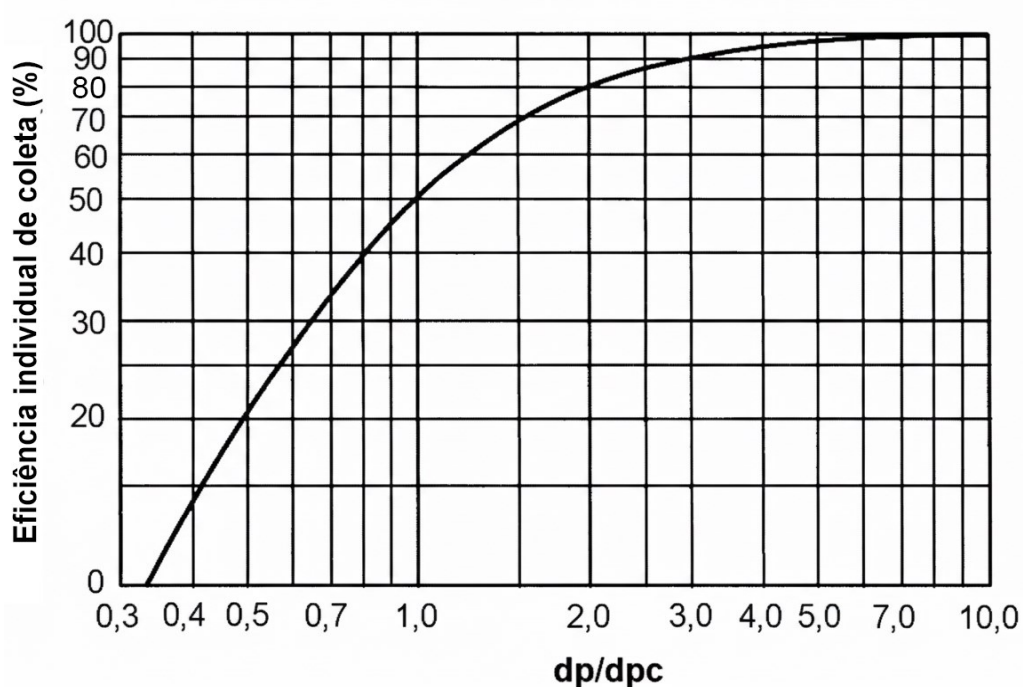


Figura 2.6 – Eficiência fracionária em função de d_p/d_{pc} .

Fonte: Adaptado de Lapple (1951).

A partir dessa relação, a eficiência global do ciclone pode ser determinada pela integração da curva de eficiência individual em função do diâmetro das partículas do material. A eficiência individual também pode ser obtida através da Eq. (2.14) (MASSARANI, 2001).

$$\eta(d_p) = \frac{\left(\frac{d_p}{d_{pc}}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_p}{d_{pc}}\right)^2} \quad (2.14)$$

2.2.2.2 Modelo de Barth

No modelo de Barth (1956), a eficiência de coleta é descrita a partir da chamada abordagem da partícula estática. Nesse método, o diâmetro crítico da partícula é definido como aquele para o qual a força centrífuga é exatamente equilibrada pela força de arraste.

De acordo com este modelo, partículas menores que o diâmetro crítico são dominadas pela força de arraste, sendo transportadas em direção ao eixo central e, conseqüentemente, eliminadas pelo duto de saída de gás. Já partículas maiores que o valor crítico sofrem predominância da força centrífuga, migrando para a parede do ciclone, onde são coletadas.

O modelo prevê uma transição abrupta na eficiência: de praticamente zero para partículas com diâmetro inferior ao crítico, para eficiência unitária no caso de partículas superiores. Entretanto, na prática, essa descontinuidade não é observada, em virtude das flutuações nas velocidades radiais e tangenciais do escoamento ao longo do corpo e do cone do ciclone.

O autor definiu o núcleo do ciclone como a extensão cilíndrica imaginária da saída de gás até o fundo do cone ou até a parede onde o escoamento se fecha e propôs o cálculo da velocidade terminal da partícula estática, que serve como base para a estimativa do diâmetro de corte em seu modelo.

Barth calculou a velocidade terminal para a partícula estática através da Eq. (2.15).

$$v_{ts}^* = \frac{Qg}{2\pi h^* v_t^2} \quad (2.15)$$

Onde g é a aceleração da gravidade [m/s²].

A eficiência de coleta para qualquer outro tamanho de partícula é determinada pela razão entre sua velocidade de sedimentação e v_{ts}^* conforme Eq. (2.16)

$$\frac{v_{ts}}{v_{ts}^*} = \frac{\pi h^* v_t^2 \rho_p d_p^2}{9\mu Q} \quad (2.16)$$

A altura do núcleo do ciclone é calculada através da Eq (2.17) se $D_e \leq D_d$ ou Eq. (2.18) se $D_e > D_d$:

$$h^* = Lt - S \quad \text{se } D_e \leq D_d \quad (2.17)$$

$$h^* = \frac{(Lt - h)(D_c - D_e)}{(D_c - D_d)} + (Lb - S) \quad \text{se } D_e > D_d \quad (2.18)$$

Barth calculou a velocidade tangencial do gás na borda do núcleo do ciclone de acordo com a Eq. (2.19).

$$v_t = v_0 \left[\frac{(D_e/2)(D_c - W)\pi}{2HW\alpha + h^*(D_c - W)\lambda\pi} \right] \quad (2.19)$$

Onde λ é um fator de atrito assumido por Barth como 0,02, e α é calculado pela Eq. (2.20)

$$\alpha = 1 - 1.2 \left(\frac{W}{D_c} \right) \quad (2.20)$$

A Figura 2.7 mostra a curva de eficiência de Barth em função da razão v_{ts}/v_{ts}^* ; ela é baseada em resultados experimentais de vários projetos de ciclones.

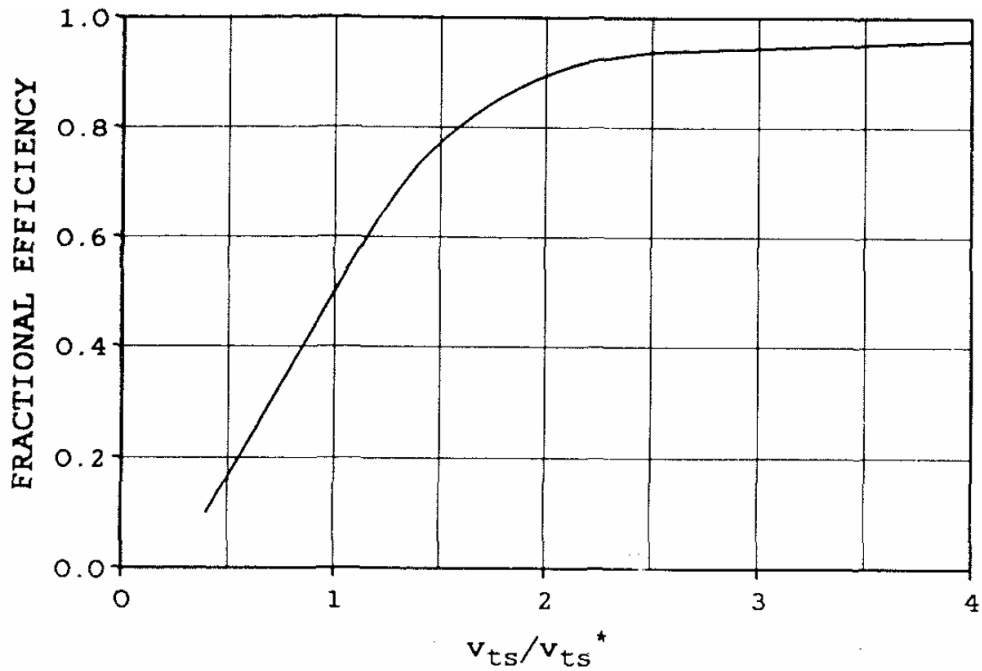


Figura 2.7 – Eficiência fracionária em função de v_{ts}/v_{ts}^* .

Fonte: Barth (1956).

A curva de Barth é bem aproximada pela Eq. (2.21).

$$\eta = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{ts}^*}{v_{ts}}\right)^{3.2}} \quad (2.21)$$

2.2.2.3 Modelo de Leith e Licht

O modelo de Leith e Licht (1972) considera os efeitos da turbulência do escoamento. Considerando que o regime em ciclones de escala industrial é sempre turbulento, os autores propuseram que, em qualquer parte do ciclone, o material particulado não coletado encontra-se completamente e uniformemente misturado ao gás. A partir dessa hipótese, definiram um tempo médio de residência do fluxo, dependente das dimensões do ciclone e da vazão de gás de alimentação, como base para o cálculo da eficiência, calculada através da Eq. (2.22).

$$\eta = 1 - \exp \left[-2(C \Psi)^{\frac{1}{2n+2}} \right] \quad (2.22)$$

Onde a eficiência depende de dois parâmetros principais: O parâmetro Ψ (Eq. (2.23)) reúne em uma única expressão as propriedades físicas das partículas e do gás, além da velocidade de entrada no ciclone:

$$\Psi = \frac{\rho_p d_p v_i (n + 1)}{18 \mu D_c} \quad (2.23)$$

Onde: ρ_p é a densidade da partícula, d_p seu diâmetro, v_i a velocidade de entrada, μ a viscosidade do gás e D_c o diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone.

O parâmetro C , depende exclusivamente da geometria do ciclone, sendo função das oito medidas que descrevem sua geometria. Dessa forma, cada projeto apresenta um valor único de C , que é calculado pela Eq. (2.24).

$$C = \frac{\pi D_c^2}{HW} \left[2 \left(1 - \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^2 \right) \left(\frac{S}{D} - \frac{H}{2D_c} \right) \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{S + l - Lb}{D_c} \right) \left(1 + \frac{d_c}{D_c} + \frac{d_c^2}{D_c^2} \right) + \frac{Lb}{D_c} - \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^2 \frac{l}{D_c} - \frac{S}{D_c} \quad (2.24)$$

O comprimento natural do ciclone, l , foi definido por Alexander (1949) como a maior distância que o gás girando se estende abaixo do tubo de saída do ciclone e é encontrado pela Eq. (2.25).

$$l = 2,3 D_e \left(\frac{D_c^2}{HW} \right)^{1/3} \quad (2.25)$$

E d_c , é calculado pela Eq. (2.26).

$$d_c = D_c - (D_c - D_d) \frac{(S + l - Lb)}{(Lt - Lb)} \quad (2.26)$$

Se d_c for maior que $(Lt - S)$, então l é substituído por $(Lt - S)$ nas Eq. (2.24) e Eq. (2.26).

Outro aspecto central no modelo é o expoente n , que descreve a forma como a velocidade tangencial do gás varia com o raio interno do ciclone, seguindo a relação imposta pela Eq. (2.27).

$$v_t r^n = \text{constante} \quad (2.27)$$

Onde: v_t é a velocidade tangencial e r é a posição radial.

Alexander (1949), propôs uma expressão empírica que relaciona n ao diâmetro do ciclone e à temperatura do gás, calculado a partir da Eq. (2.28).

$$n = 1 - \left[(1 - 0,67 D_c^{0,14}) \left(\frac{T}{283} \right)^{0,3} \right] \quad (2.28)$$

Onde: T é a temperatura do gás [K].

o modelo de Leith–Licht constitui uma das formulações mais completas para a predição da eficiência de coleta, pois combina variáveis geométricas, propriedades do escoamento turbulento e características físico-químicas das partículas em um único conjunto de equações.

2.2.2.4 Modelo de Dietz

O modelo de Dietz (1981) divide o ciclone em três regiões distintas:

- região de entrada, correspondente ao espaço anular ao redor da saída de gás no topo do ciclone;
- região do vórtice descendente, referente à parcela do escoamento que se desenvolve abaixo do nível da saída de gás;
- região do núcleo, definida como a extensão da saída até o fundo do ciclone.

Assume-se que a turbulência é responsável por gerar um perfil de concentração radial uniforme para as partículas não coletadas dentro de cada uma dessas regiões. Além disso, para representar de forma mais realista a distribuição do tempo de residência das partículas, o modelo admite a possibilidade de troca entre as regiões do vórtice descendente e do núcleo.

O modelo de Dietz calcula a eficiência de coleta do ciclone através da Eq. (2.29).

$$\eta = 1 - \left[K_0 - \left(\frac{K_1}{2} + K_2 \right)^{0,5} \right] \times \exp \left[- \frac{\pi (2S - H) \rho_p d_p^2 v_i}{18 \mu HW} \right] \quad (2.29)$$

Onde: K_0 , K_1 e K_2 são funções das propriedades do gás, das partículas e da geometria do ciclone e são calculados pela Eq. (2.30), Eq. (2.31) e Eq. (2.32).

$$K_0 = \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^{2n} \left(1 + \frac{9 \mu HW}{\pi \rho_p l d_p^2 v_i} \right) \right] \quad (2.30)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^{2n} \left(1 + \frac{9 \mu HW}{\pi \rho_p l d_p^2 v_i} \right) \right] \quad (2.31)$$

$$K_2 = \left(\frac{D_e}{D_c} \right)^{2n} \quad (2.32)$$

Assim como no modelo de Leith e Licht, l deve ser substituído por $(Lt - S)$ quando o valor calculado de l for maior do que $(Lt - S)$. O expoente do vórtice (n) pode ser obtido pela expressão empírica proposta por Alexander (1949), a mesma utilizada no modelo de Leith e Licht (Eq. (2.28)).

2.2.3 Influência da concentração de partículas na eficiência de coleta

Hoffmann et al. (1991) investigaram a eficiência de coleta em ciclones considerando concentrações de sólidos na alimentação variando entre 0 e aproximadamente 0,040 kg/m³. Os experimentos foram conduzidos em três ciclones comerciais com geometrias distintas. Para os ciclones das geometrias I e II, as velocidades de alimentação adotadas foram de 10, 15 e 20 m/s, enquanto, para a geometria III, os ensaios foram realizados apenas com velocidade de 10 m/s.

As Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 apresentam as curvas de eficiência de coleta obtidas experimentalmente em função da concentração de sólidos na alimentação para as geometrias I, II e III.

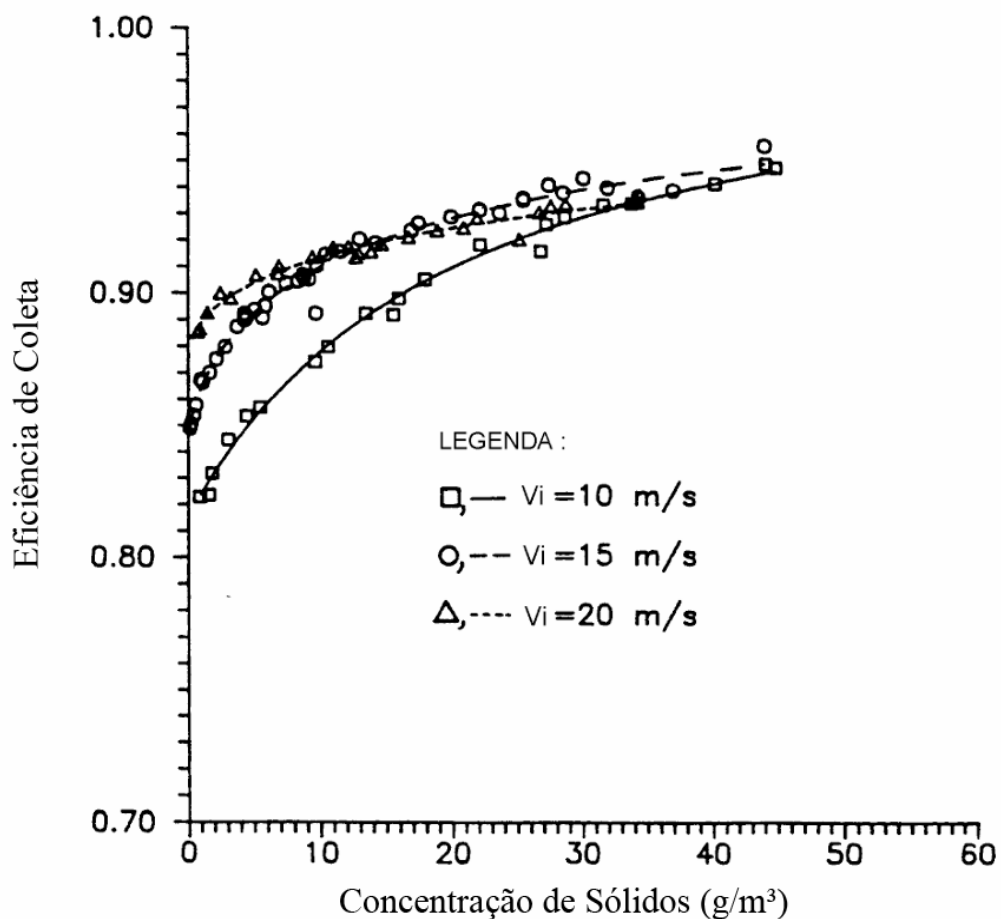


Figura 2.8 – Eficiência de coleta em função da concentração de alimentação para o ciclone com geometria I.

Fonte: Adaptado de Hoffmann et al. (1991).

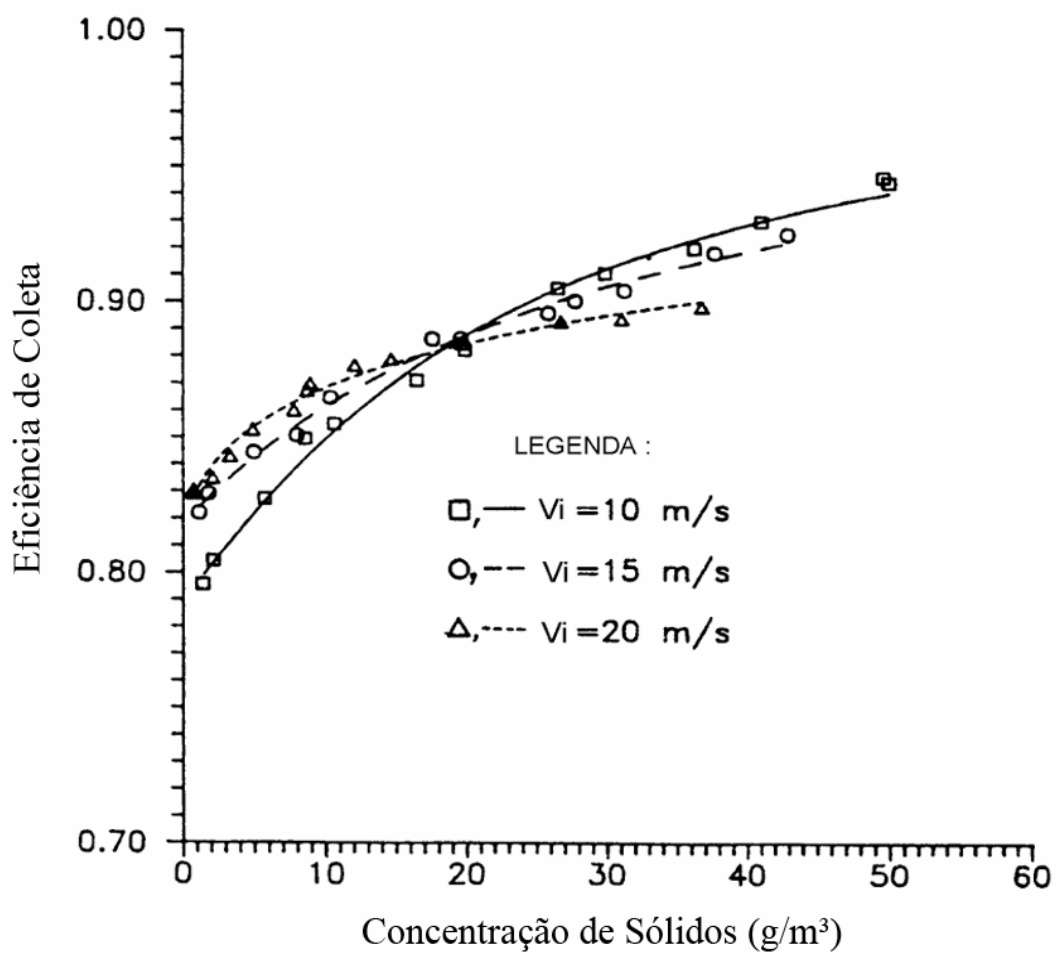


Figura 2.9 – Eficiência de coleta em função da concentração de alimentação para o ciclone com geometria II.

Fonte: Adaptado de Hoffmann et al. (1991).

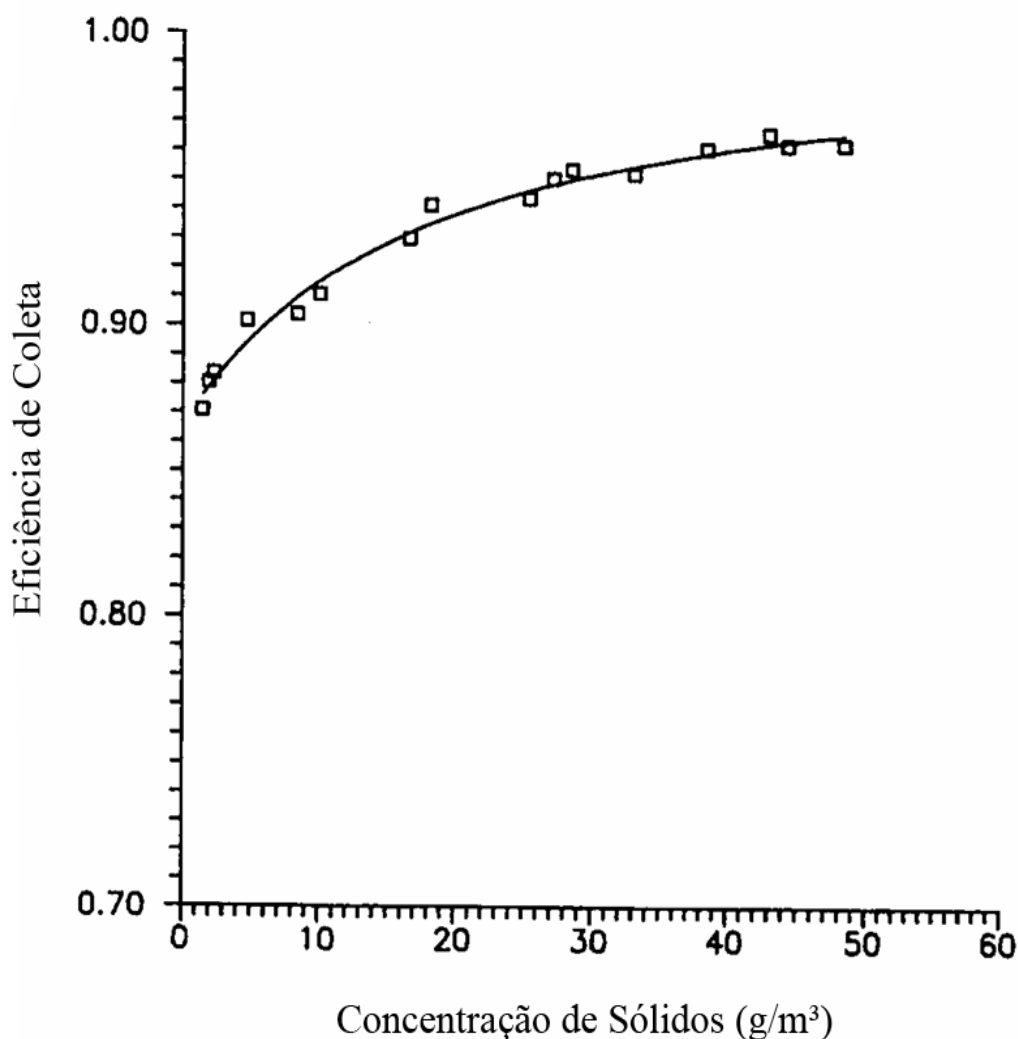


Figura 2.10 – Eficiência de coleta em função da concentração de alimentação para o ciclone com geometria III.

Fonte: Adaptado de Hoffmann et al. (1991).

De acordo com Perry e Green (2008), o aumento da eficiência de coleta em função do aumento da concentração de particulado ocorre porque partículas maiores colidem com partículas menores, carregando uma grande porção destas partículas menores para a parede do ciclone. Outras explicações possíveis são que os sólidos apresentam menor coeficiente de arrasto ou tendem a se aglomerar em ambientes com muitas partículas, tornando-se efetivamente partículas maiores ou em concentrações muito elevadas, acredita-se que o gás simplesmente não consiga manter tanto material sólido em suspensão sob forças centrífugas elevadas, e a maior parte dos sólidos simplesmente "condensa" e se separa da corrente gasosa.

Entretanto, Massarani (2001) destaca que os ciclones a gás operam, geralmente, com suspensões significativamente diluídas, além de ser comum que a descarga de sólidos ocorra de forma intermitente, por meio de um reservatório ou barril acoplado ao *underflow* do equipamento. Em função disso, o autor afirma que os parâmetros associados à concentração de sólidos na alimentação não exercem influência relevante sobre o diâmetro de corte do ciclone, uma vez que o escoamento permanece em regime diluído.

Como o diâmetro de corte está diretamente relacionado à eficiência individual de coleta e conseqüentemente, à eficiência global do ciclone, a independência da concentração de particulados no cálculo do diâmetro de corte demonstra que concentrações muito diluídas não alteram significativamente o desempenho de ciclones a gás. Assim, dentro das faixas usuais de operação, os efeitos de interação partícula-partícula, aglomeração e sobrecarga do equipamento podem ser desprezíveis.

Resultados experimentais apresentados por Scheid (1992) indicaram que a eficiência de coleta permaneceu praticamente inalterada diante de variações na concentração de sólidos na corrente de alimentação.

Os ensaios foram conduzidos utilizando três materiais particulados distintos: quartzo, alumina e carvão. As concentrações de sólidos foram testadas na faixa de 0,001 a 0,050 kg/m³. Os resultados obtidos demonstraram que, para as condições analisadas, a variação da carga sólida não exerceu influência significativa sobre a eficiência de coleta do ciclone, do tipo Stairmand. As Figuras 2.11 e 2.12 ilustram, respectivamente, os comportamentos observados para os ensaios realizados com alumina e carvão.

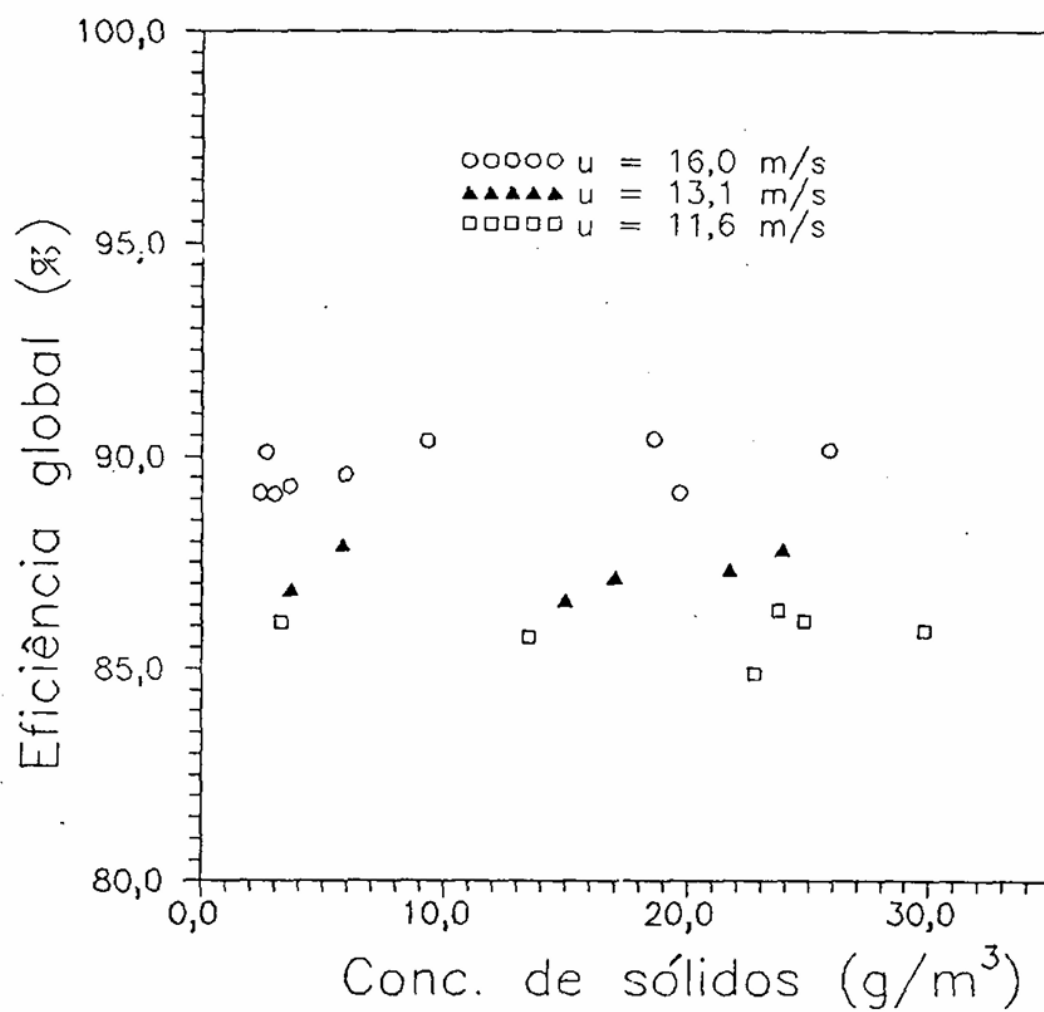


Figura 2.11 – Eficiência de coleta em função concentração de sólidos para a alumina.

Fonte: Scheid (1992).

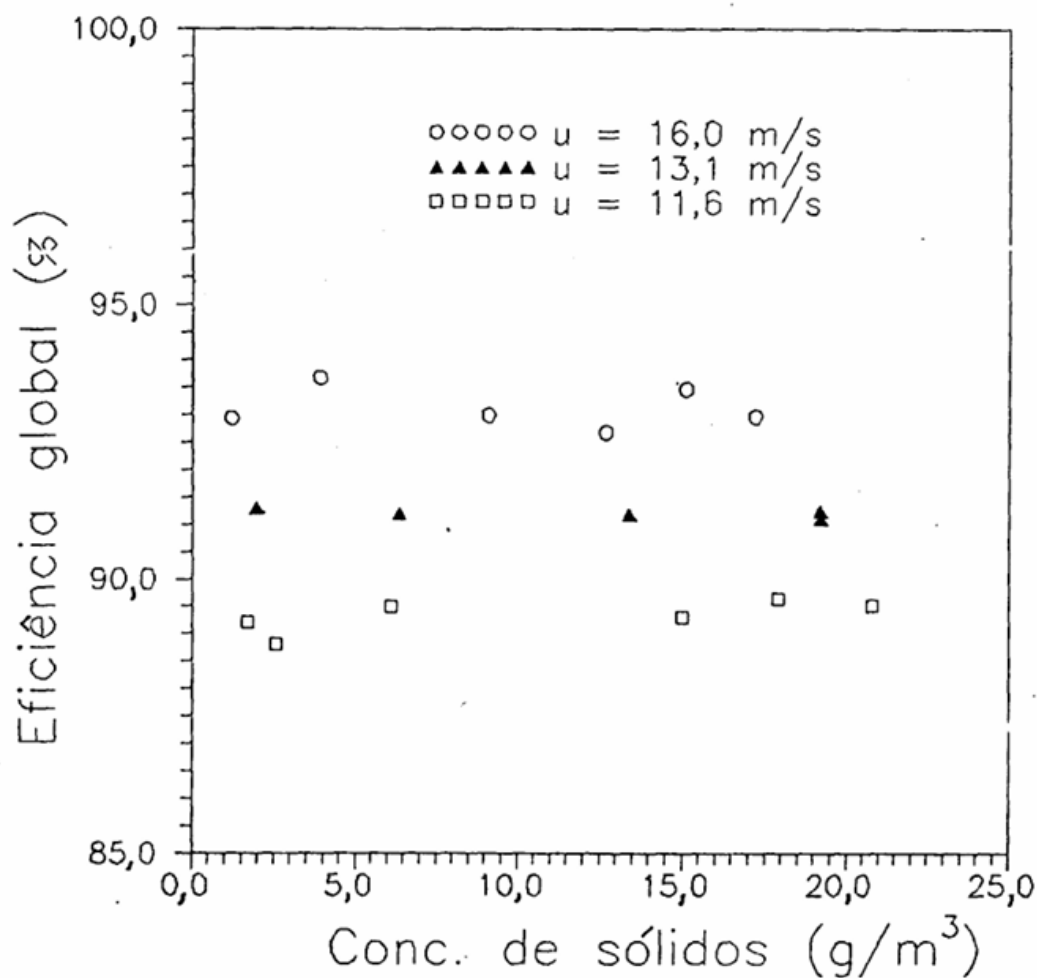


Figura 2.12 – Eficiência de coleta em função concentração de sólidos para carvão.

Fonte: Scheid (1992).

2.2.4 Queda de pressão em ciclones

A queda de pressão, ou perda de carga em um ciclone ocorre devido à resistência que o fluxo gasoso encontra ao passar pelo equipamento. Essa resistência é causada principalmente pelo atrito entre o fluido e as superfícies internas do ciclone, pela mudança de direção do fluxo, e pelas turbulências geradas no interior do equipamento (CREMASCO, 2018). Esta queda de pressão pode ser mensurada ao medir a diferença de pressão estática entre a entrada e a saída do ciclone.

A importância da perda de carga está diretamente ligada ao consumo energético do sistema. Quanto maior a queda de pressão, maior será a potência necessária para manter o fluxo de gás, elevando custos operacionais. Além disso,

uma perda de carga muito elevada pode indicar problemas no projeto ou operação do ciclone, como obstruções ou dimensionamento inadequado (WHITE, 2010).

Existem na literatura diversos modelos empíricos que buscam descrever a queda de pressão em ciclones. Cremasco (2018) apresenta a Eq. (2.33) para a perda de carga (em Pa) no escoamento de gás em ciclones.

$$\Delta p = k \cdot \frac{\rho v_c^2}{2} \quad (2.33)$$

Onde: k é uma constante que depende da configuração do equipamento; ρ a densidade do gás [kg/m^3] e v_c a velocidade do gás no cilindro do ciclone [m/s], dada por: $v_c = \frac{4Q}{\pi D_c^2}$.

Na Eq. (2.33), para ciclones Lapple e Stairmand, k pode ser dado como 315 e 400, respectivamente (MASSARANI, 2001).

Perry e Green (2008) apresentam uma formulação empírica que decompõem a perda de carga em cinco componentes Eq. (2.34) a (2.38), cada uma associada a um mecanismo físico específico do escoamento no equipamento.

$$\Delta P_1 = 0,5\rho_g(v_{in}^2 - v_{vessel}^2 + K v_{in}^2) \quad (2.34)$$

em que K é um coeficiente adimensional obtido da Tabela 2.2, em função da razão entre a área do cilindro do ciclone e a área do tubo de saída; v_{vessel} : Velocidade da partícula no vaso, antes da aceleração (m/s); v_{in} : Velocidade de entrada do gás no ciclone (m/s);

Esta primeira parcela refere-se a perda de carga decorrente da contração na entrada do ciclone.

$$\Delta P_2 = L v_{in}(v_{in} - v_{vessel}) \quad (2.35)$$

A segunda parcela refere-se a perda de carga associada à aceleração das partículas sólidas.

Para partículas de pequeno diâmetro, admite-se que a velocidade das partículas seja igual à velocidade do gás, sendo L a carga mássica de sólidos, expressa em kg/m³.

$$\Delta P_3 = \frac{2f\rho_g v_{in}^2 \pi D_c N_s}{d_{in}} \quad (2.36)$$

A terceira parcela refere-se ao atrito no corpo do cilindro do ciclone, o diâmetro hidráulico da entrada, d_{in} , é definido como quatro vezes a razão entre a área de entrada e seu perímetro e f é o fator de atrito, calculado com base no número de Reynolds definido a partir da área de entrada do ciclone.

$$\Delta P_4 = \frac{\rho_g v_{in}^2}{2} \quad (2.37)$$

A quarta parcela está associada à mudança de direção do escoamento, quando o gás passa do movimento descendente no vórtice externo para o movimento ascendente no vórtice interno, contribuindo para a perda de carga total do equipamento.

$$\Delta P_5 = 0,5\rho_g(v_{exit}^2 - v_c^2 + K v_{exit}^2) \quad (2.38)$$

A quinta parcela refere-se a perda de carga na região de saída, em que o coeficiente K é determinado a partir da Tabela 2.2; v_c : Velocidade do gás no corpo cilíndrico do ciclone (m/s); v_{exit} : Velocidade do gás no duto de saída (m/s).

A perda de carga total do ciclone é obtida pela soma das cinco contribuições individuais descritas anteriormente.

Tabela 2.2 – Valores de K em função de $(D_e/D_c)^2$ (Perry e Green, 2008).

$(D_e/D_c)^2$	K
0	0,5
0,1	0,47
0,2	0,43
0,3	0,39
0,4	0,35

As variáveis que fazem parte do cálculo da perda carga em um ciclone são listadas a seguir:

ΔP_i : Perda de carga (Pa);

D_c : Diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone (m);

d_{in} : Diâmetro hidráulico da entrada (m);

f : Fator de atrito (adimensional);

K : Coeficiente de perda de carga (adimensional);

L : Carga de sólidos na corrente de gás (kg/m^3);

N_s : Número de espiras que a corrente de gás realiza dentro do ciclone (adimensional);

ρ_g : Densidade do gás (kg/m^3);

v_{exit} : Velocidade do gás no duto de saída (m/s);

v_c : Velocidade do gás no corpo cilíndrico do ciclone (m/s);

v_{in} : Velocidade de entrada do gás no ciclone (m/s);

v_{in} : Velocidade da partícula na entrada do ciclone (m/s);

v_{vessel} : Velocidade da partícula no vaso, antes da aceleração (m/s).

2.3 CURVA CARACTERÍSTICA DOS SOPRADORES

Os sopradores são máquinas de fluxo destinadas ao deslocamento de grandes volumes de gás em baixas ou moderadas pressões, sendo amplamente utilizados em processos industriais que exigem transporte de ar ou gases, como sistemas de aeração, combustão e ventilação forçada.

Nos sopradores, ilustrado na Figura 2.13, o fluido entra axialmente através do duto de entrada (1) e é captado pelas pás do rotor. Em seguida, realiza um movimento tangencial e escoamento radialmente para o duto de saída (2), distribuindo-se por toda a periferia do rotor até alcançar a superfície interna da carcaça. Durante sua passagem pelo rotor, o fluido adquire tanto velocidade quanto pressão. A seção em formato de voluta da carcaça promove a desaceleração do escoamento, resultando em um aumento da pressão (WHITE, 2010).

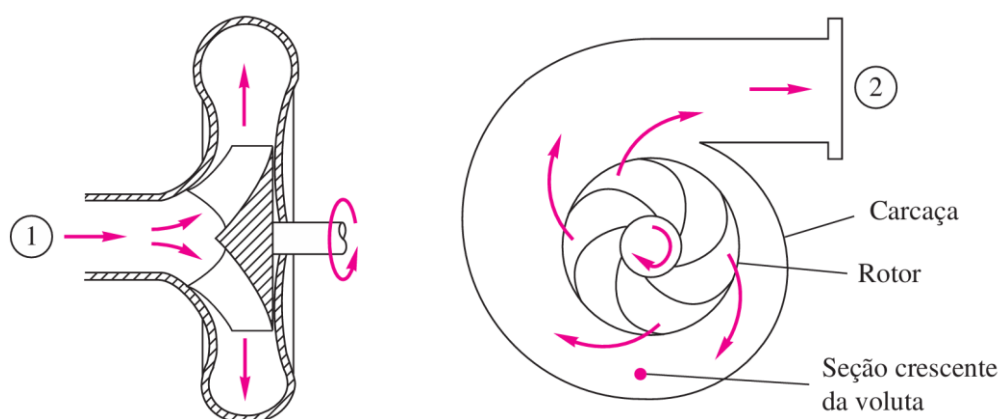


Figura 2.13 – Geometria típica de um soprador.

Fonte: White (2010).

A geometria do soprador tem influência direta na vazão e pressão que podem ser fornecidas pelo equipamento. A representação gráfica que expressa a relação entre a vazão do fluido transportado e a pressão gerada pelo soprador é chamada de curva característica, podendo incluir também a potência requerida e a eficiência. Determinada por meio de ensaios experimentais, essa curva é fundamental para a análise de desempenho do equipamento sob diferentes condições de operação.

Os gráficos da curva característica são normalmente elaborados considerando a rotação constante do eixo (geralmente expressa em rpm). Geralmente, a vazão Q é adotada como a variável independente enquanto as variáveis dependentes, ou de “saída”, correspondem à altura de carga H (ou à elevação de pressão Δp), potência de eixo P_e e o rendimento η (WHITE, 2010).

A Figura 2.14 apresenta curvas típicas de desempenho de um soprador. A altura de carga permanece aproximadamente constante em baixas vazões,

diminuindo até atingir zero quando a vazão atinge Q_{max} . Nesse regime de rotação e para a geometria do soprador considerado, não é possível fornecer vazões superiores a Q_{max} . Já o rendimento η é nulo tanto para vazão nula quanto para vazão máxima, atingindo seu valor máximo próximo a $0,6 Q_{max}$. Este ponto é denominado vazão de projeto Q^* ou ponto de máximo rendimento (PMR), sendo o rendimento máximo representado por η_{max} (WHITE, 2010).

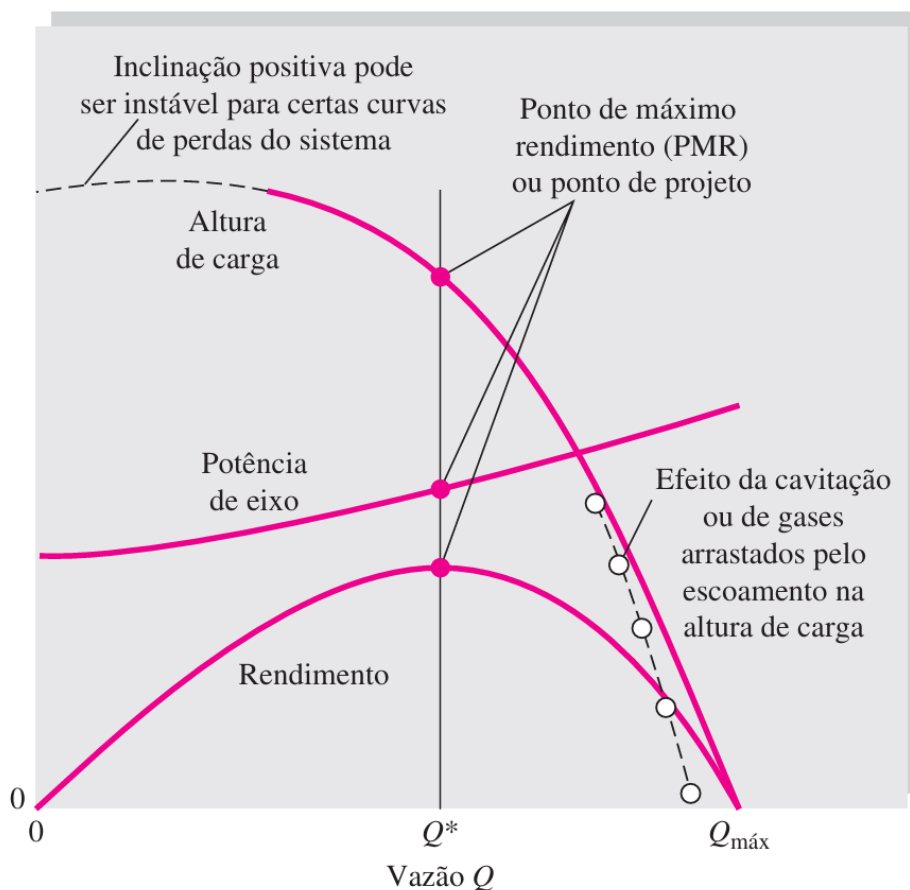


Figura 2.14 – Curva característica de um soprador.

Fonte: White (2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL PARTICULADO

A matéria-prima empregada nos ensaios consistiu em dois tipos de materiais particulados. O primeiro foi o óxido de ferro, obtido como resíduo proveniente do processo de corte a plasma de chapas de aço.

O segundo material utilizado foi a areia fina padronizada, fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), conforme norma ABNT NBR 7214:2015.

A utilização destes dois materiais distintos ocorreu devido a diferença de granulometria entre eles. O óxido de ferro possui granulometria muito mais fina que a da areia, utilizando estes dois materiais, os resultados experimentais podem ser comparados com os modelos teóricos em uma ampla faixa de diâmetros de partículas. Os materiais são exibidos na Figura 3.1.

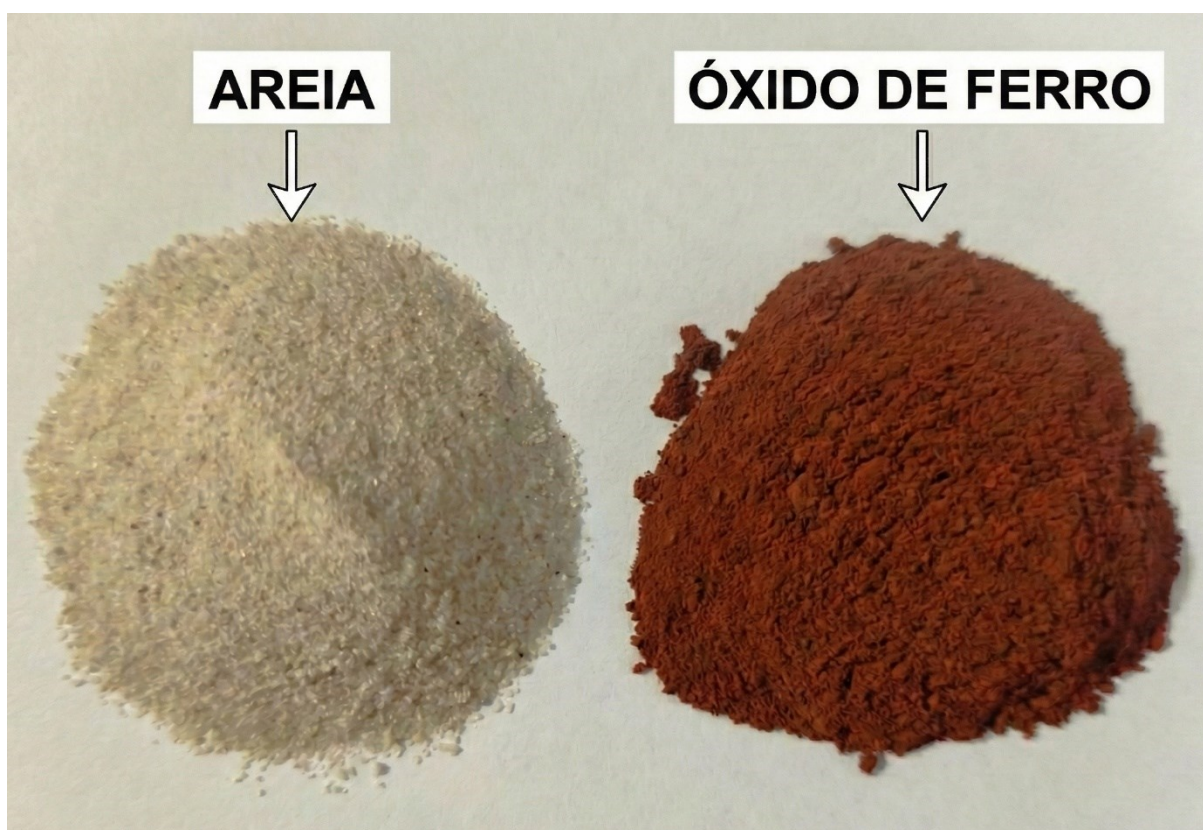


Figura 3.1 – Areia e óxido de ferro utilizados nos ensaios experimentais.

Fonte: Autor (2025).

3.1.1 Determinação da densidade dos materiais particulados

A análise de densidade foi realizada por meio da técnica de picnometria. Para cada tipo de material analisado (óxido de ferro e areia) foram realizados cinco ensaios. Para a execução do ensaio, utilizou-se um porta-amostra com volume fixo de $3,5 \text{ cm}^3$, o qual foi inicialmente colocado sobre a balança Shumadzu AU220D, com resolução de $0,00001 \text{ g}$, previamente zerada e calibrada para leitura com quatro casas decimais. Em seguida, o porta-amostra foi preenchido com a amostra e novamente pesado, a fim de obter a massa precisa do material.

Posteriormente, o conjunto foi introduzido em um picnômetro Micromeritics AccuPyc 1330 (Figura 3.2). Na análise de picnometria, o gás hélio é injetado no porta-amostra para preencher os espaços vazios existentes entre as partículas, possibilitando a determinação do volume real ocupado pela amostra. A partir dos valores de massa e volume, o equipamento calcula automaticamente a densidade do material analisado.



Figura 3.2 – Picnômetro Micromeritics AccuPyc 1330.

Fonte: Autor (2025).

3.1.2 Determinação da granulometria dos materiais particulados

A análise granulométrica dos materiais foi realizada pelo método de difração a laser, utilizando o equipamento Mastersizer 2000, da Malvern Instruments.

Cada amostra foi individualmente introduzida em um béquer de 600 mL contendo água e, posteriormente, inserida no módulo Hidro 2000MU (Figura 3.3), sendo submetida a um processo ultrassônico de dispersão das partículas.

Após a dispersão, a solução é succionada e recirculada pelo sistema do equipamento Malvern Mastersizer 2000 (Figura 3.3). Um feixe de luz laser incide sobre as partículas em suspensão, e o padrão de espalhamento gerado é detectado por sensores posicionados em diferentes ângulos. A partir desses dados, o software Mastersizer 2000 realiza o cálculo e a plotagem da distribuição do tamanho de partículas.



Figura 3.3 – Instrumentação para análise de distribuição granulométrica: 1) Solução de água e amostra, 2) Agitador Hidro 2000 MU, 3) Sistema de circulação da solução, 4) Analisador Mastersize 2000 e 5) Software de leitura Mastersize 2000.

Fonte: Autor (2025).

Os resultados obtidos forneceram a distribuição granulométrica das amostras de óxido de ferro e da areia normatizada, garantindo informações para a caracterização dos materiais utilizados nos ensaios experimentais e modelos teóricos.

3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do projeto teve como ponto de partida a idealização de uma bancada experimental para avaliação da eficiência de um separador ciclônico, visando

comparar resultados de modelos teóricos com dados obtidos experimentalmente. Essa concepção inicial foi realizada a partir dos materiais disponíveis para a construção da bancada de testes.

Definiu-se o uso de um soprador industrial, cuja curva característica ainda não era conhecida, como responsável pelo fornecimento de ar ao sistema. Essa curva seria posteriormente determinada de forma experimental, servindo como referência para o dimensionamento do ciclone. Também foi considerada a instalação de uma válvula borboleta após o soprador, para permitir o controle da vazão de ar. Entre a válvula borboleta e o ciclone, previu-se um tubo Venturi, responsável por promover a sucção do material particulado a partir da diferença de pressão gerada pela variação de velocidade no seu interior. A idealização do projeto experimental é representada pela Figura 3.4.

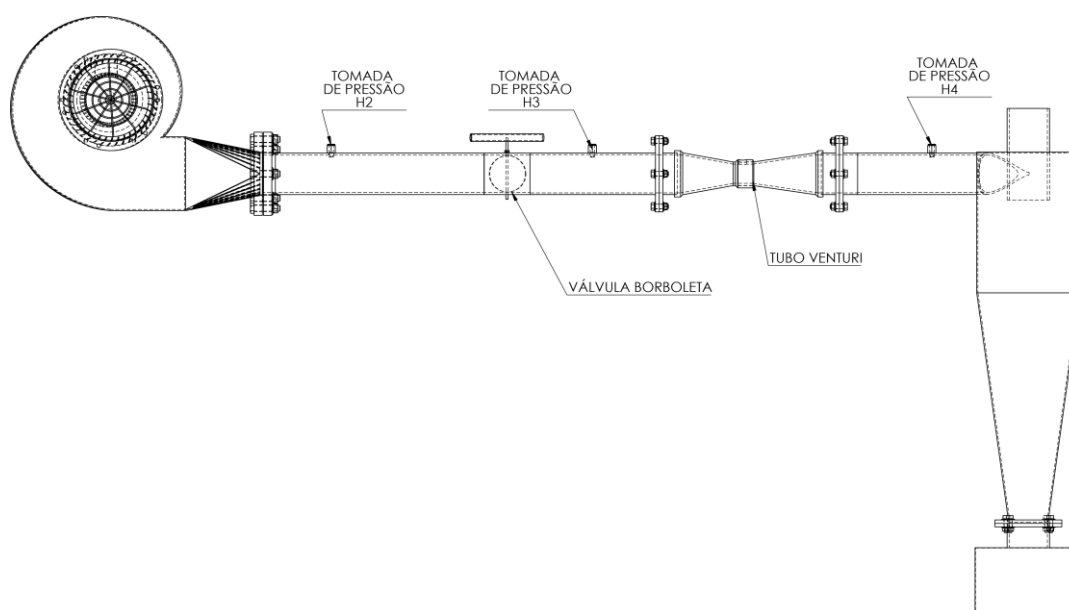


Figura 3.4 – Representação esquemática da bancada experimental.

Fonte: Autor (2025).

3.2.1 Obtenção da curva característica do soprador

Para o experimento foi utilizado um soprador industrial de 3 cv (Figura 3.5), com curva característica inicialmente desconhecida. Para o dimensionamento da bancada e ciclone experimental, foi necessária a determinação desta curva característica do soprador.

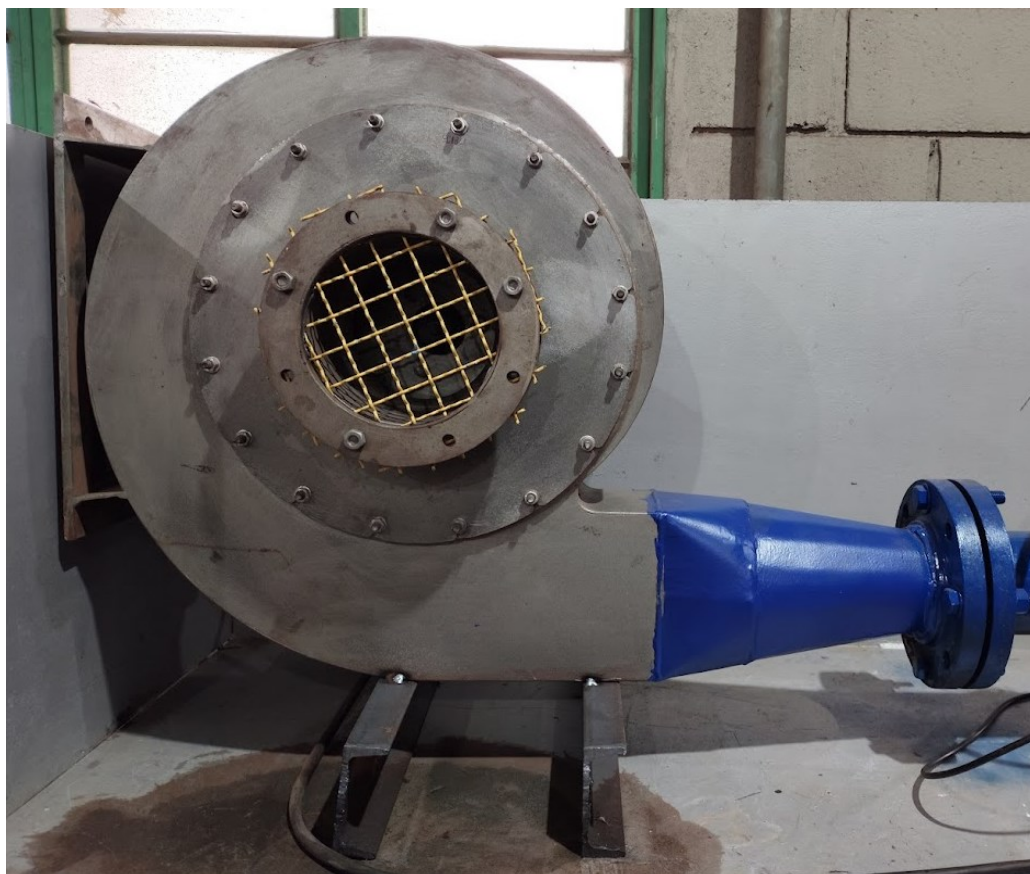


Figura 3.5 – Soprador industrial de 3 cv utilizado na bancada experimental.

Fonte: Autor (2025).

Foi projetado e construído um arranjo experimental composto por um tubo com diâmetro interno de 102,6 mm, conectado à saída do soprador, a jusante da saída de ar do soprador, a uma distância de 185 mm, foi instalada a tomada de pressão estática, juntamente com medidor de pressão (Figura 3.6). Após a tomada de pressão, a uma distância de 1935 mm do flange do soprador, foi instalada a válvula borboleta (Figura 3.7) responsável pelo controle do fluxo de ar. A localização da válvula foi definida de modo a evitar a proximidade imediata com a tomada de pressão, minimizando a possibilidade de perturbações na medição.



Figura 3.6 – Medidor de pressão utilizado para caracterização do soprador.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.7 – Válvula borboleta para controle do fluxo de ar.

Fonte: Autor (2025).

Após a válvula de controle, foi mantido um trecho retilíneo com 5200 mm de extensão, para estabilização das perturbações no perfil de velocidade geradas pelo fechamento parcial da válvula, onde foi instalado o medidor de vazão. Após o medidor de vazão há o último trecho de tubo de 600 mm. Essas distâncias foram definidas de acordo com o comprimento mínimo recomendado pelo fabricante do medidor de vazão, garantindo que o sensor fosse exposto a um escoamento suficientemente desenvolvido, reduzindo erros associados à turbulência.

O detalhamento do arranjo experimental é exibido nas Figuras 3.8 a 3.11.

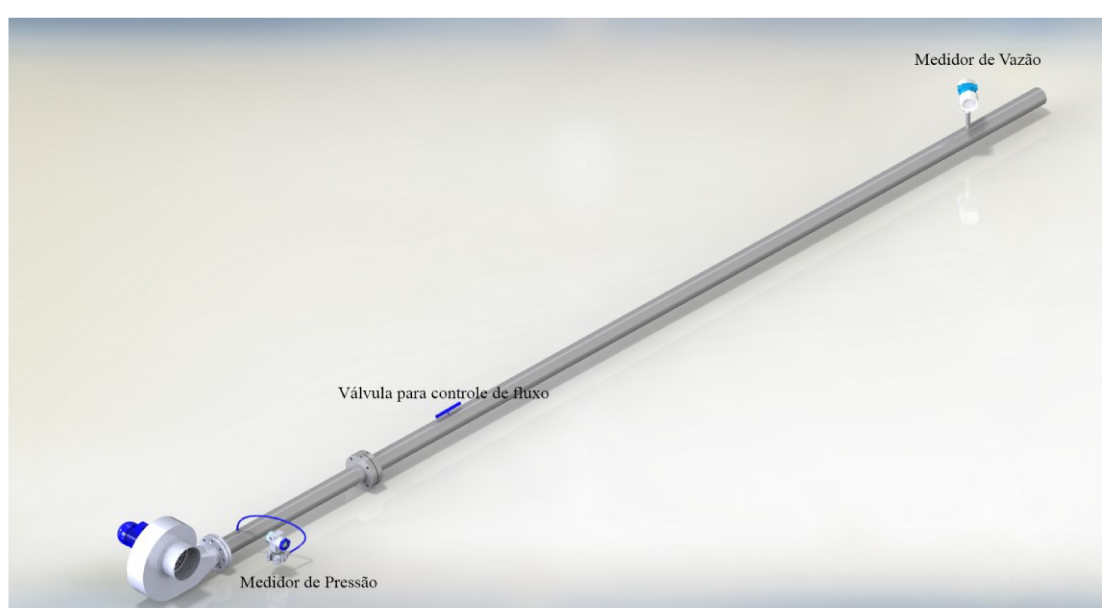


Figura 3.8 – Esquematização da bancada para coleta da curva característica do soprador – modelo 3D.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.9 – Esquematização da bancada para coleta da curva característica do soprador – modelo com cotas.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.10 – Montagem da bancada para coleta da curva característica do soprador.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.11 – Montagem da instrumentação da bancada para coleta da curva característica do soprador.

Fonte: Autor (2025).

O procedimento experimental consistiu na operação do soprador, inicialmente, com a válvula borboleta na posição totalmente aberta. O sistema foi mantido em funcionamento por 10 minutos para assegurar o desenvolvimento de regime permanente no escoamento. Uma vez atingida esta condição de regime, foram registrados os valores de pressão estática e vazão volumétrica. Na sequência, a válvula borboleta foi parcialmente fechada, fazendo com que ocorresse uma variação no fluxo de ar. Novamente foi aguardado o intervalo de 10 minutos para estabilização do sistema, seguido do novo registro da pressão estática e vazão volumétrica de ar.

Esse procedimento foi repetido sucessivamente até a obtenção de dez pontos distintos de pressão e vazão.

Em seguida, o ensaio foi repetido em ordem inversa, onde soprador foi acionado com a válvula em posição totalmente fechada, sendo gradualmente aberta, até a coleta de mais 10 pontos. O experimento foi repetido por mais duas vezes (tanto na sequência de abertura, quanto na sequência de fechamento) totalizando 60 pontos de coleta. A construção da curva característica do soprador é exibida na Figura 3.12.

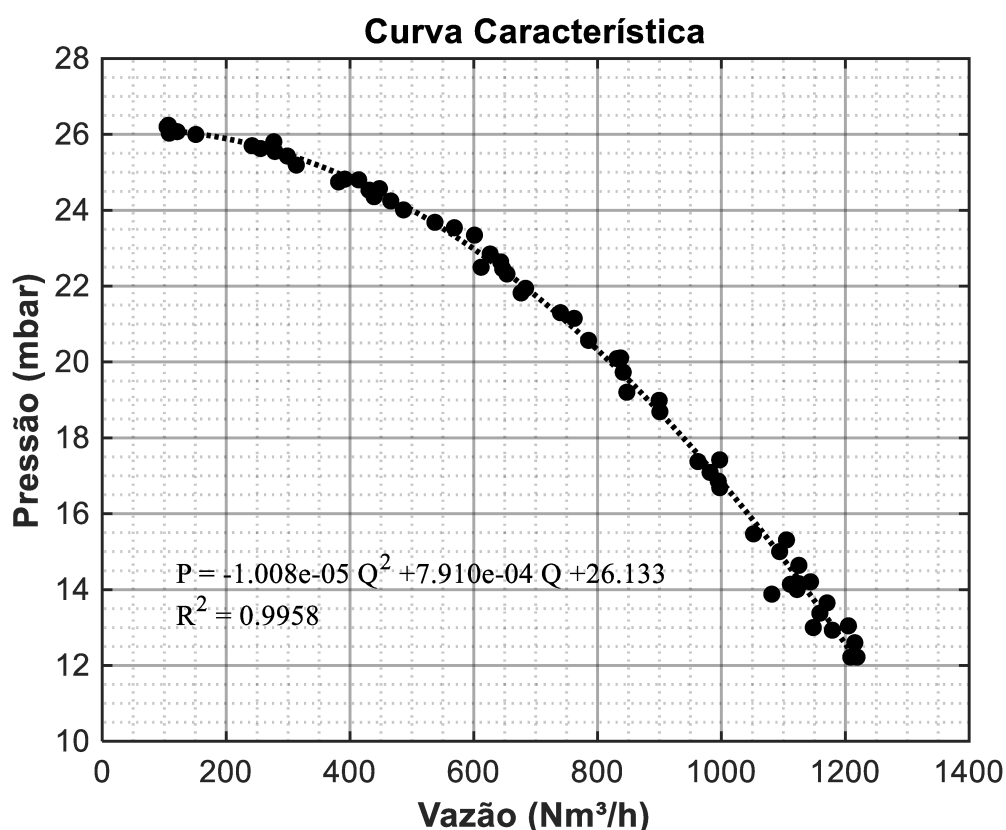


Figura 3.12 – Curva característica do soprador.

Fonte: Autor (2025).

3.2.2 Ciclone protótipo

O dimensionamento do ciclone foi fundamentado na análise da curva característica do soprador industrial, obtida experimentalmente conforme descrito na Seção 3.2.1. Embora o ponto ótimo de eficiência represente a condição de maior aproveitamento energético do soprador, o critério adotado no presente trabalho foi o de projetar o ciclone considerando a região intermediária da curva, uma vez que o

ponto de maior rendimento, conhecido como *Best Efficiency Point – BEP*, localiza-se geralmente próximo do meio da curva característica, entre as condições de vazão máxima (com baixa pressão) e de estrangulamento (com alta pressão e mínima vazão) (BLEIER, 1998).

O ciclone foi dimensionado de forma iterativa, tomando como base a curva característica do soprador. Arbitrou-se uma vazão volumétrica de entrada próxima a 600 Nm³/h, valor correspondente à região intermediária da curva. Em seguida, foi definido o diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone, enquanto as outras dimensões foram estabelecidas com base em proporções geométricas próximas as propostas por Stairmand (1951) para ciclones de alta eficiência. A geometria também foi escolhida de modo a assegurar que a velocidade de entrada do fluido permanecesse entre 10 a 30 m/s (MASSARANI, 2001).

A partir da vazão volumétrica de ar e de uma geometria pré-estabelecida para o ciclone, a perda de carga (ΔP) no ciclone foi calculada a partir das correlações empíricas de Perry e Green (2008), apresentadas na Seção 2.2.4.

A partir dos valores da vazão de projeto e perda de carga teórica, foi calculado o coeficiente de vazão do ciclone, K_v , de acordo com a Eq. (3.1).

$$K_v = Q \sqrt{\frac{SG}{\Delta P}} \quad (3.1)$$

Onde: ΔP representa a perda de carga no ciclone [bar], Q é a vazão de fluido [m³/h] e SG a densidade relativa entre o fluido que alimenta o equipamento e água.

Diante do K_v , e da curva característica do soprador, determinou-se a vazão do conjunto soprador-ciclone, ou seja, a vazão do soprador quando é inserido um equipamento que possui um determinado K_v . Então, verifica-se se o conjunto soprador-ciclone possui vazão próxima a região de maior rendimento. Caso a vazão seja muito baixa (perda de carga do ciclone muito alta) testa-se uma nova geometria, calcula-se o novo K_v e então verifica-se se o conjunto-soprador ciclone está próximo a região de melhor rendimento.

A geometria do protótipo é exibida na Figura 3.13 e o ciclone construído é exibido na Figura 3.14.

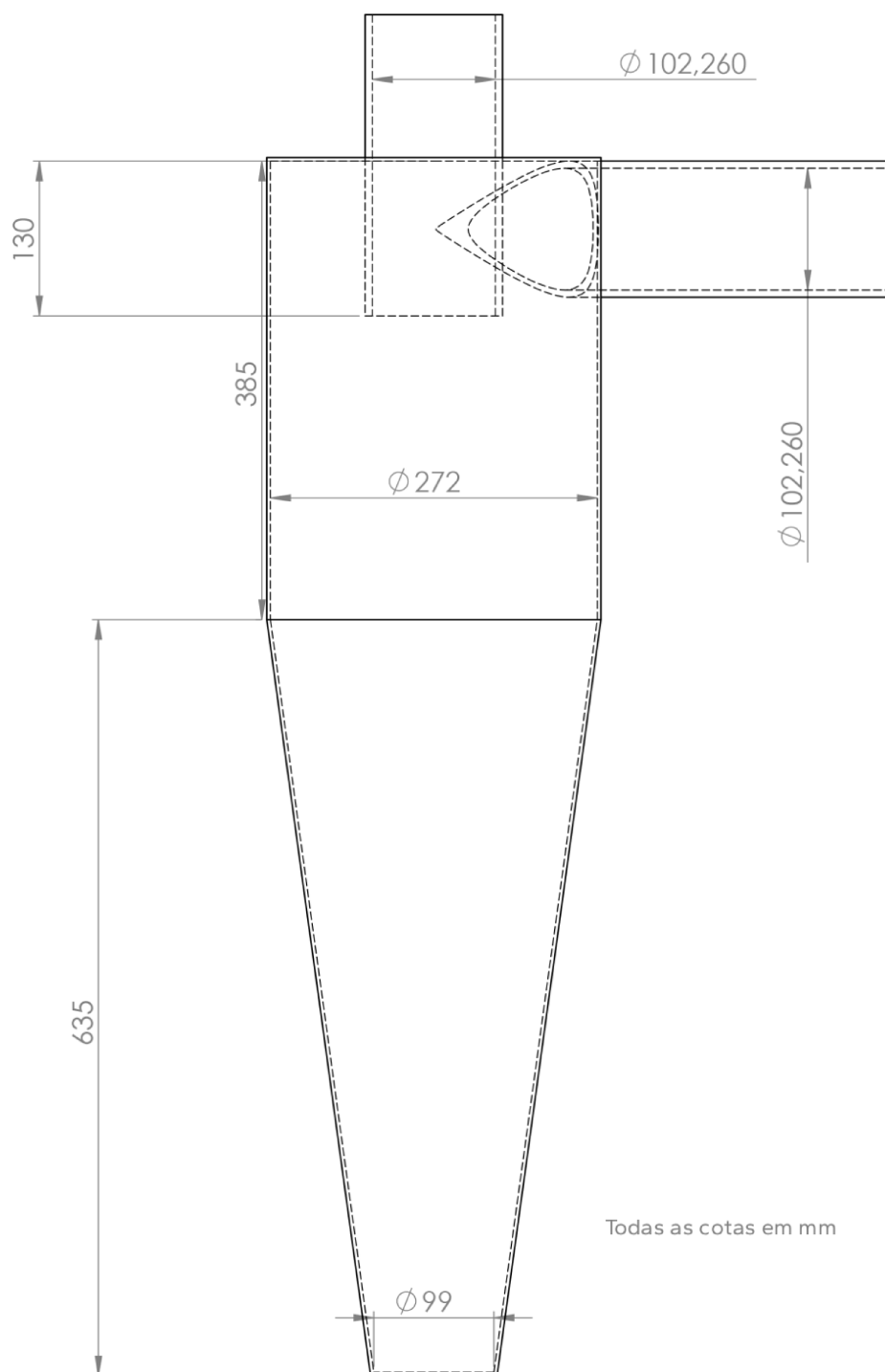


Figura 3.13 – Geometria do ciclone protótipo.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.14 – Construção do ciclone protótipo.

Fonte: Autor (2025).

3.2.3 Sistema de alimentação de material particulado

Para a introdução controlada de material particulado no escoamento de ar, foi projetado e construído um equipamento dosador. Este dispositivo é composto por um disco rotativo com uma canaleta de seção constante, sobre o qual um reservatório de particulado garante que uma camada uniforme de material seja depositada sobre a canaleta por meio de um nivelador (Figura 3.15). A rotação do disco transfere o particulado de forma contínua para a mangueira de sucção conectada na constrição do tubo Venturi.



Figura 3.15 – Dispositivo de alimentação de material particulado.

Fonte: Autor (2025).

3.2.3.1 Tubo Venturi para sucção de material particulado

Para aspirar o material particulado até o fluxo de ar que entra no ciclone foi construído um tubo Venturi, onde a aceleração do fluido na garganta do tubo provoca queda de pressão nesta região de constrição, de acordo com o princípio de Bernoulli.

A fabricação ocorreu por impressão 3D em duas seções, posteriormente unidas.

A geometria do tubo Venturi é apresentada na Figura 3.16, e a Figura 3.17 exhibe o tubo Venturi construído.

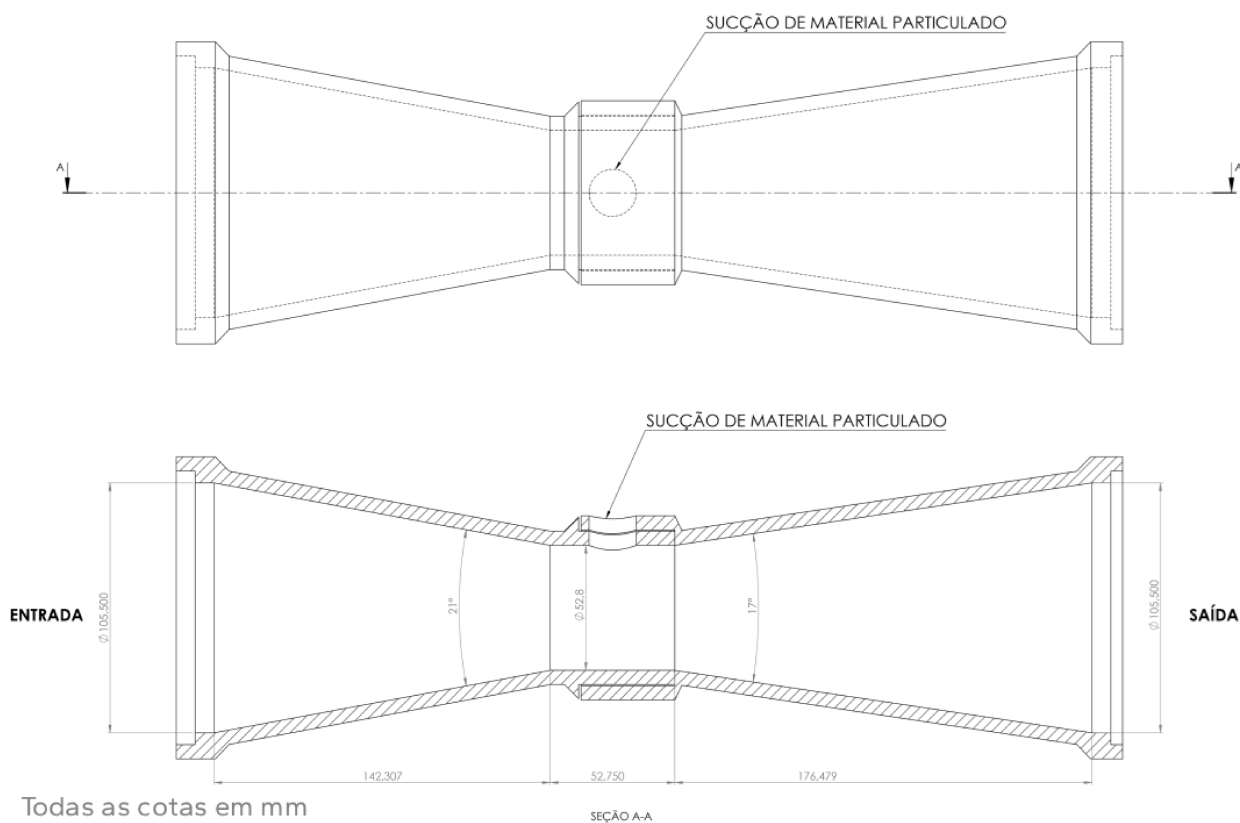


Figura 3.16 – Geometria do tubo Venturi para sucção do material particulado.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.17 – Construção do tubo Venturi para sucção do material particulado.

Fonte: Autor (2025).

O projeto da bancada experimental é apresentado na Figura 3.18 e a bancada construída é exibida a Figura 3.19.

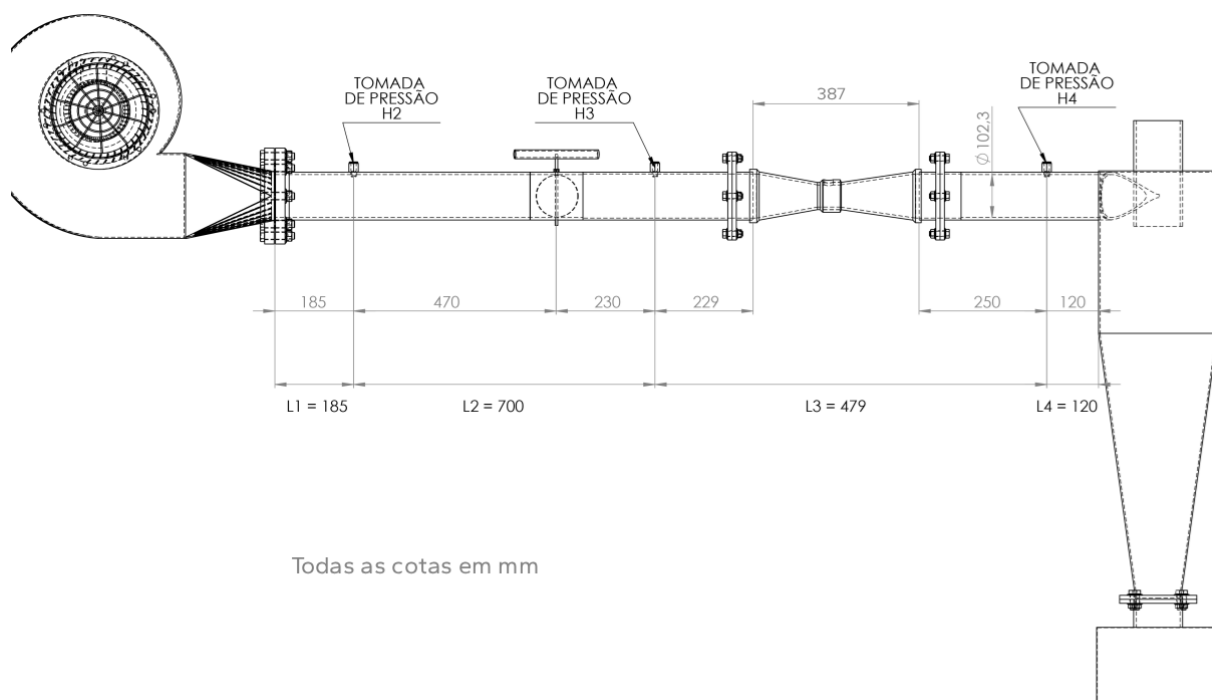


Figura 3.18 – Projeto da bancada experimental.

Fonte: Autor (2025).



Figura 3.19 – Construção da bancada experimental.

Fonte: Autor (2025).

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1 Velocidade do fluxo de ar

A determinação da velocidade do fluxo de ar no sistema foi realizada por meio de um manômetro de coluna de água em formato de “U” (Figura 3.20), conectado à tomada de pressão H2, que permitia medir a diferença de pressão entre a tomada H2 e a pressão atmosférica.

Com a leitura do valor de pressão (obtido pelo manômetro de coluna de água em mmca), é realizada a conversão para mbar. A pressão em mbar então é localizada no eixo das ordenadas (pressão) da curva característica do soprador, que foi anteriormente obtida. A partir desse ponto, uma linha horizontal é traçada até interceptar a curva do soprador. A projeção vertical desse ponto de interseção sobre o eixo das abscissas fornece a vazão volumétrica de ar associada à pressão medida.

Com a vazão volumétrica de ar definida, a velocidade do escoamento é obtida pela razão entre a vazão volumétrica e a área da seção transversal do tubo de entrada do ciclone.



Figura 3.20 – Manômetro de coluna de água em U.

Fonte: Autor (2025).

3.3.2 Perda de pressão no ciclone

Para a obtenção da medida da queda de pressão no ciclone é conectado um segundo manômetro de coluna de água em “U”, na tomada de pressão H4.

Com o soprador ligado, é aguardado o tempo de 10 minutos para que o sistema entre em condições permanentes de operação. A partir da velocidade do fluxo de ar na entrada do ciclone obtido conforme descrito na Seção 3.3.1, a queda de pressão pode ser determinada, para esta velocidade, através da diferença de pressão obtida entre o duto de entrada (tomada de pressão H4) do ciclone a pressão atmosférica, uma vez que o duto de saída do ciclone pode ser desprezado devido ao pequeno comprimento.

3.3.3 Testes experimentais

Para a realização dos experimentos, o procedimento iniciava-se com o acionamento do soprador. A vazão de ar era ajustada por meio da válvula de controle e monitorada com o auxílio da leitura do manômetro conectado a tomada de pressão H2, conforme descrito na Seção 3.3.1.

Em seguida, a rotação do disco do alimentador de particulados era calibrada. A massa de sólidos era pesada em uma balança e inserida no reservatório de material particulado do sistema alimentador.

Nos experimentos realizados com areia, foi utilizada uma massa de 700 g, enquanto nos ensaios com óxido de ferro a quantidade foi de 70 g. Essa diferença deve-se à limitação do volume do reservatório do alimentador e do coletor localizado no *underflow*. Como o óxido de ferro apresenta densidade aparente muito menor que a da areia, para um mesmo volume, a massa do óxido de ferro é consideravelmente menor.

Uma vez iniciada a aspiração do material particulado através do conjunto Alimentador-Venturi, iniciava-se o cronômetro que permanecia em contagem até que o material sólido fosse completamente aspirado.

Os materiais deste trabalho (óxido de ferro e areia normatizada) foram testados sob as diferentes condições:

Taxa de alimentação do óxido de ferro: 35 e 70 g/min;

Taxa de alimentação da areia: 350 e 700 g/min;

Velocidade de entrada da suspensão: 10 e 15 m/s;

Totalizando 8 tipos de experimentos, descrito abaixo:

Experimento 1 – Material: Óxido de ferro; Taxa de alimentação: 35 g/min;
Velocidade de entrada: 15 m/s;

Experimento 2 – Material: Óxido de ferro; Taxa de alimentação: 70 g/min;
Velocidade de entrada: 15 m/s;

Experimento 3 – Material: Areia Normalizada; Taxa de alimentação: 350 g/min;
Velocidade de entrada: 15 m/s;

Experimento 4 – Material: Areia Normalizada; Taxa de alimentação: 700 g/min;
Velocidade de entrada: 15 m/s;

Experimento 5 – Material: Óxido de ferro; Taxa de alimentação: 35 g/min;
Velocidade de entrada: 10 m/s;

Experimento 6 – Material: Óxido de ferro; Taxa de alimentação: 70 g/min;
Velocidade de entrada: 10 m/s;

Experimento 7 – Material: Areia Normalizada; Taxa de alimentação: 350 g/min;
Velocidade de entrada: 10 m/s;

Experimento 8 – Material: Areia Normalizada; Taxa de alimentação: 700 g/min;
Velocidade de entrada: 10 m/s;

Para nomenclatura dos experimentos é adotado o padrão conforme Figura 3.21.

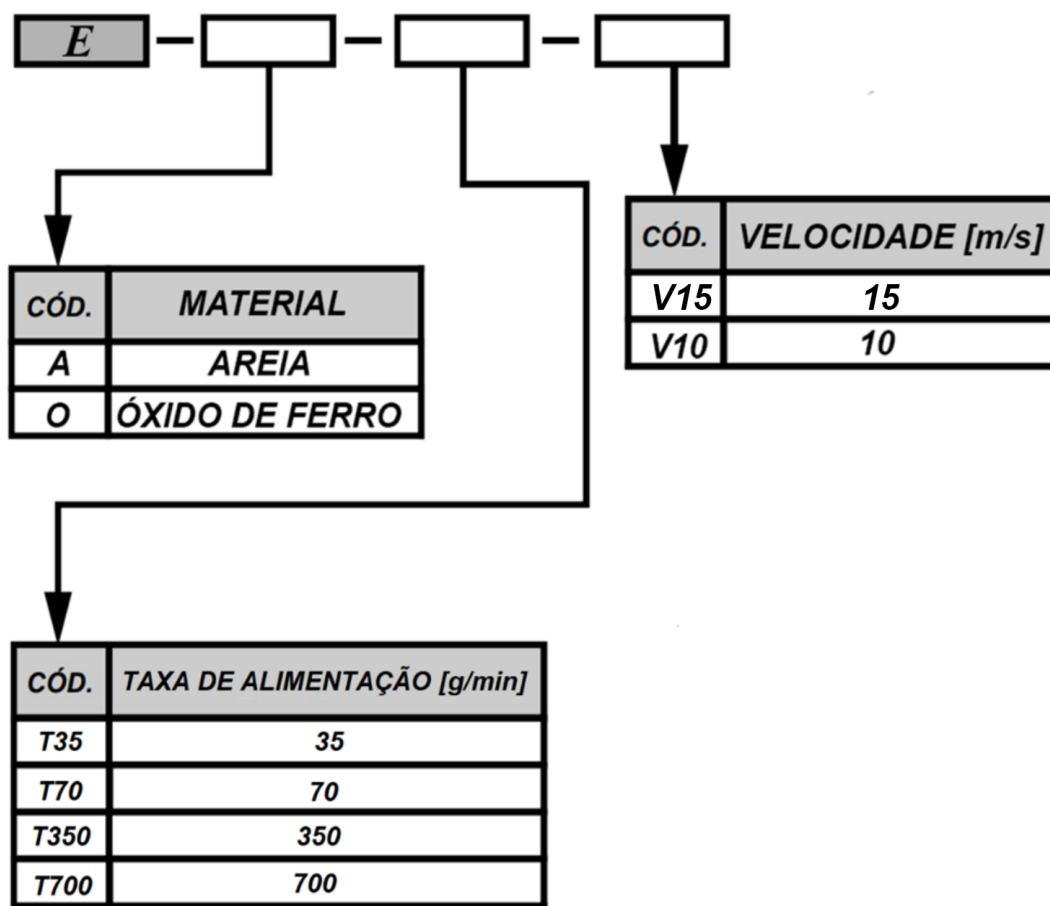


Figura 3.21 – Padrão de nomenclatura dos experimentos.

Fonte: Autor (2025).

Que resulta nas nomenclaturas listadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Nomenclatura para os testes experimentais.

Experimento	Nomenclatura	Material	Taxa de alimentação [g/min]	Velocidade de entrada [m/s]
1	E-O-T35-V15	Óxido de ferro	35	15
2	E-O-T70-V15	Óxido de ferro	70	15
3	E-A-T350-V15	Areia	350	15
4	E-A-T700-V15	Areia	700	15
5	E-O-T35-V10	Óxido de ferro	35	10
6	E-O-T70-V10	Óxido de ferro	70	10
7	E-A-T350-V10	Areia	350	10
8	E-A-T700-V10	Areia	700	10

3.3.4 Eficiência de coleta

A eficiência de coleta global foi determinada a partir da relação entre a massa de material particulado inserida no ciclone (previamente pesada em balança) e a massa efetivamente coletada e armazenada em seu *underflow* Eq. (2.8).

Ao término de cada experimento, o *underflow* era desacoplado do ciclone por meio de uma conexão flangeada, permitindo a remoção do material coletado. Em seguida, o particulado retido no *underflow* era pesado, possibilitando a determinação da massa efetivamente coletada. A partir dessas medições, a eficiência de coleta global do ciclone pôde ser calculada.

3.4 DESENVOLVIMENTO DE UM SOFTWARE PARA ESTIMAR A GEOMETRIA MAIS EFICIENTE DE UM CICLONE APLICADO AO UM GASEIFICADOR

O principal objetivo do presente trabalho é o dimensionamento e a análise da eficiência de ciclones na coleta de material particulado presentes na corrente gasosa proveniente de um reator de gaseificação, com o objetivo de promover a coleta destas partículas para limpeza do gás de síntese. O reator estudado possui geometria cúbica, com dimensões internas de 2,0 x 2,0 x 2,0 metros (Figura 3.22) e opera com a produção de 800 kg/h de *syngas* e temperatura próxima a 800 °C.

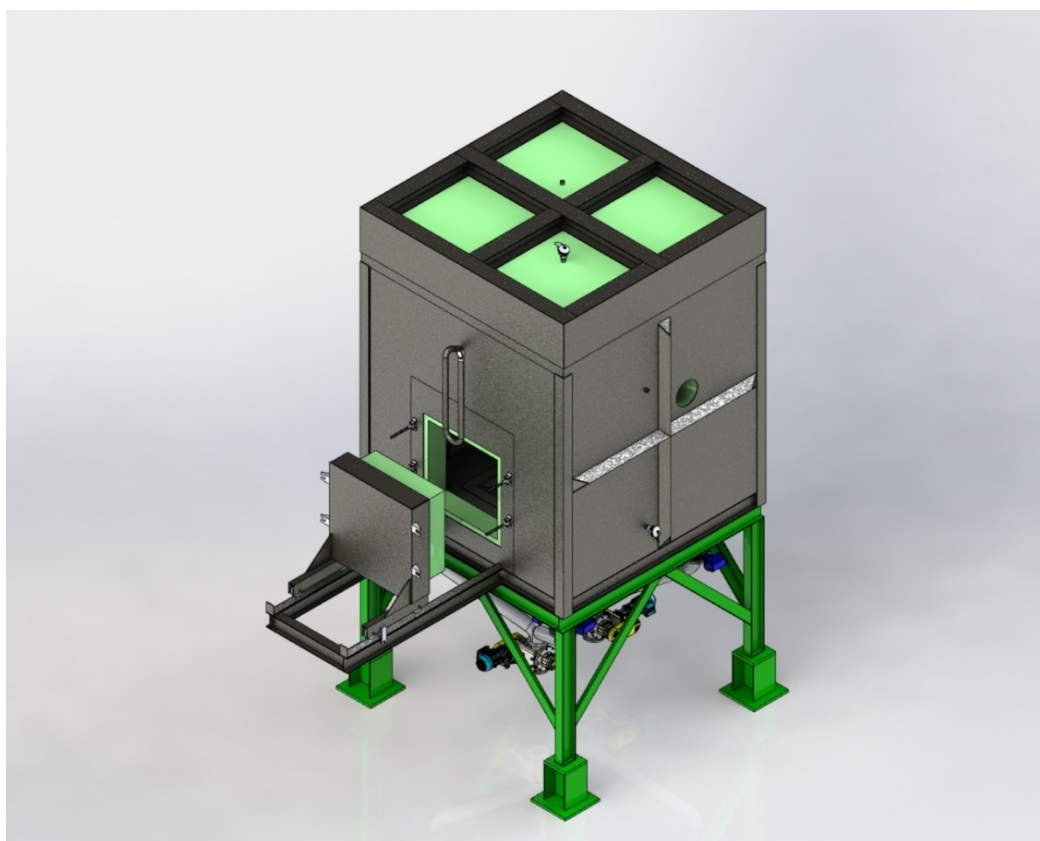


Figura 3.22 – Reator de gaseificação.

Fonte: Autor (2025).

O critério de seleção do ciclone, será a maior eficiência.

Para selecionar a geometria, foi desenvolvido um software em MATLAB (Apêndice A), onde o algoritmo foi estruturado para avaliar um grande número de combinações geométricas, calcular eficiência de coleta, diâmetro de corte e perda de carga, sob condições reais de operação do reator para cada uma dessas geometrias.

O software percorre diversas combinações geométricas por meio de laços aninhados, definindo intervalos e passos para cada variável. O diâmetro do corpo (D_c) varia de 0,1 a 1,0 m, e as demais dimensões são definidas como proporções de D_c . Entretanto, o software não segue as proporções fixas impostas pelas famílias de ciclones apresentadas na Seção 2.2.1, ou seja, não há restrição para que cada dimensão siga as proporções exatas de cada família; ele utiliza proporções máximas e mínimas, cada dimensão varia dentro de limites mínimos e máximos estabelecidos a partir das famílias clássicas de ciclones, como Stairmand, Swift e Lapple.

Como exemplo, o software considera:

- De entre $0,40 \cdot D_c$ e $0,75 \cdot D_c$
- D_d entre $0,20 \cdot D_c$ e $0,35 \cdot D_c$
- H entre $0,50 \cdot D_c$ e $0,80 \cdot D_c$
- W entre $0,20 \cdot D_c$ e $0,38 \cdot D_c$
- S entre $0,50 \cdot D_c$ e $0,88 \cdot D_c$
- L_b entre $1,40 \cdot D_c$ e $2,00 \cdot D_c$
- L_c entre $2,00 \cdot D_c$ e $2,50 \cdot D_c$

Esses intervalos foram escolhidos para abranger as regiões típicas das famílias clássicas apresentadas na literatura, mantendo o projeto dentro de faixas dimensionalmente realistas.

Para cada geometria candidata, o software calcula as áreas de entrada e, a partir da vazão volumétrica do gás, determina a velocidade neste ponto. Geometrias que resultem em velocidades superiores a 20 m/s ou inferiores as 10 m/s são automaticamente descartadas, para que o projeto atenda simultaneamente as condições de operação recomendadas tanto para ciclones Lapple, como para ciclones Stairmand (MASSARANI, 2001).

Além do limite de velocidade, são impostas restrições geométricas adicionais com o objetivo de garantir coerência construtiva, como: a exigência de que o comprimento do *vortex finder* seja inferior ao comprimento da seção cilíndrica, que o comprimento total do ciclone seja maior que o comprimento da parte cilíndrica, que a altura total do ciclone seja inferior a 1,8 m (para que o ciclone caiba dentro do reator),

entre outras. Apenas as geometrias que atendem simultaneamente a todas as condições seguem para a etapa de avaliação de eficiência.

O software implementa os modelos de Lapple, Barth, Leith & Licht e Dietz e a partir dos dados de entrada do processo – vazão mássica de gás, densidade e viscosidade do gás, temperatura do reator, densidade e distribuição granulométrica do material particulado - são calculadas a eficiência global de coleta e o diâmetro de corte, para cada modelo, permitindo uma comparação direta entre as diferentes formulações para uma mesma geometria.

A perda de carga associada a cada geometria também é estimada em função da vazão volumétrica, das propriedades do fluido e das dimensões do ciclone, de acordo com as equações de Perry e Green (2008).

Os resultados obtidos para cada geometria analisada são armazenados em uma estrutura de dados contendo as dimensões do ciclone, as eficiências globais, a distribuição granulométrica do *underflow* e *overflow* e os diâmetros de corte, para cada um dos quatros modelos, além da perda de carga, constituindo a base de dados utilizada nas etapas subsequentes de análise e discussão dos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS

Os ensaios experimentais para caracterização do material particulado foram conduzidos no Laboratório de Processos de Separação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. As Seções 4.1.1 e 4.1.2 mostram os resultados para análise da densidade e granulometria da matéria prima empregada nos testes experimentais de eficiência do ciclone protótipo.

4.1.1 Densidade

Através do método de picnometria, as densidades da amostra de óxido de ferro e da areia normatizada foram determinadas, onde os resultados são exibidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Densidade dos materiais particulados empregados nos experimentos.

Material	Densidade absoluta [kg/m ³]
Óxido de ferro	4537
Areia	2640

4.1.2 Granulometria

A Figuras 4.1 e 4.2 apresentam a distribuição granulométrica da amostra de areia e óxido de ferro, respectivamente, utilizadas como material particulado nos experimentos. Observa-se que o óxido de ferro possui granulometria muito mais fina quando comparado com a areia.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a distribuição granulométrica acumulada para as amostras de areia e óxido de ferro, respectivamente. A análise das curvas de distribuição acumulada mostra que aproximadamente 90% das partículas de areia

possuem diâmetros maiores que 80 μm , enquanto 90% das partículas de óxido de ferro possuem diâmetros menores que 10 μm .

As Tabela 4.2 e 4.3 apresentam os valores numéricos utilizados na construção das curvas, contendo os intervalos discretizados de diâmetro e suas respectivas frações volumétricas. Esses valores constituem a base para todas as análises posteriores de desempenho do ciclone, uma vez que a eficiência de coleta depende diretamente do tamanho das partículas presentes na corrente gasosa.

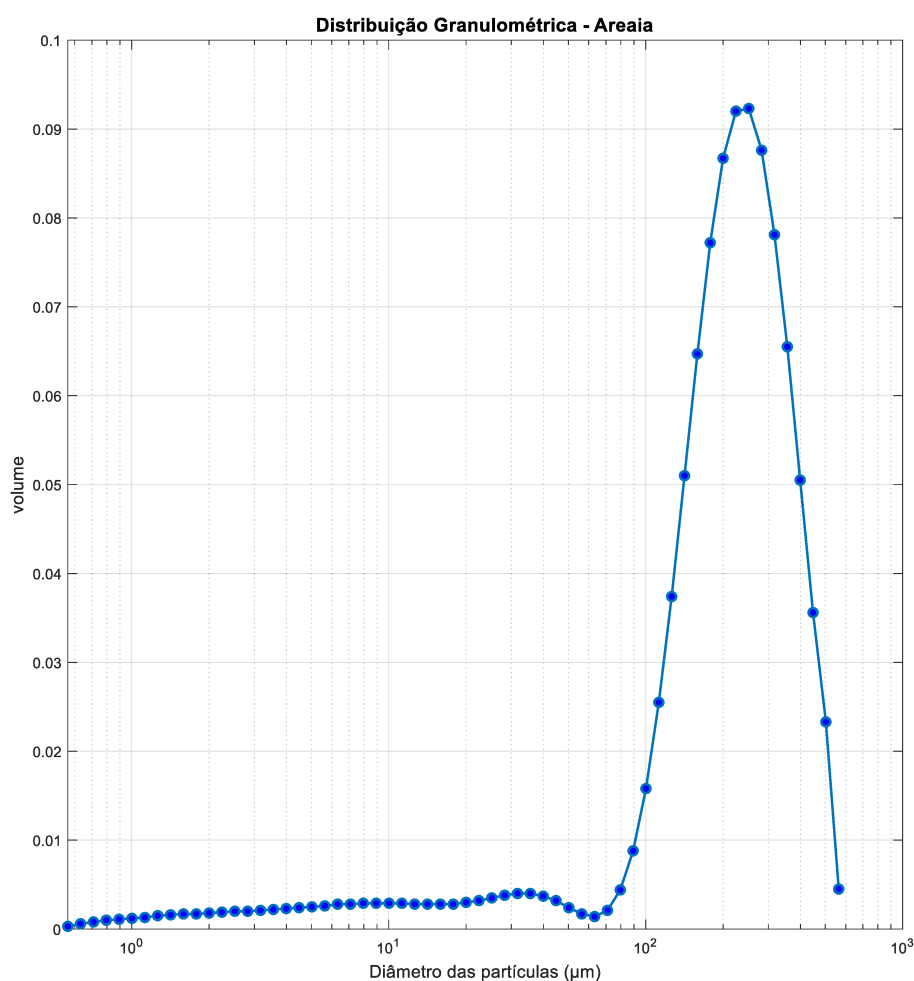


Figura 4.1 – Distribuição granulométrica - Areia.

Fonte: Autor (2025).

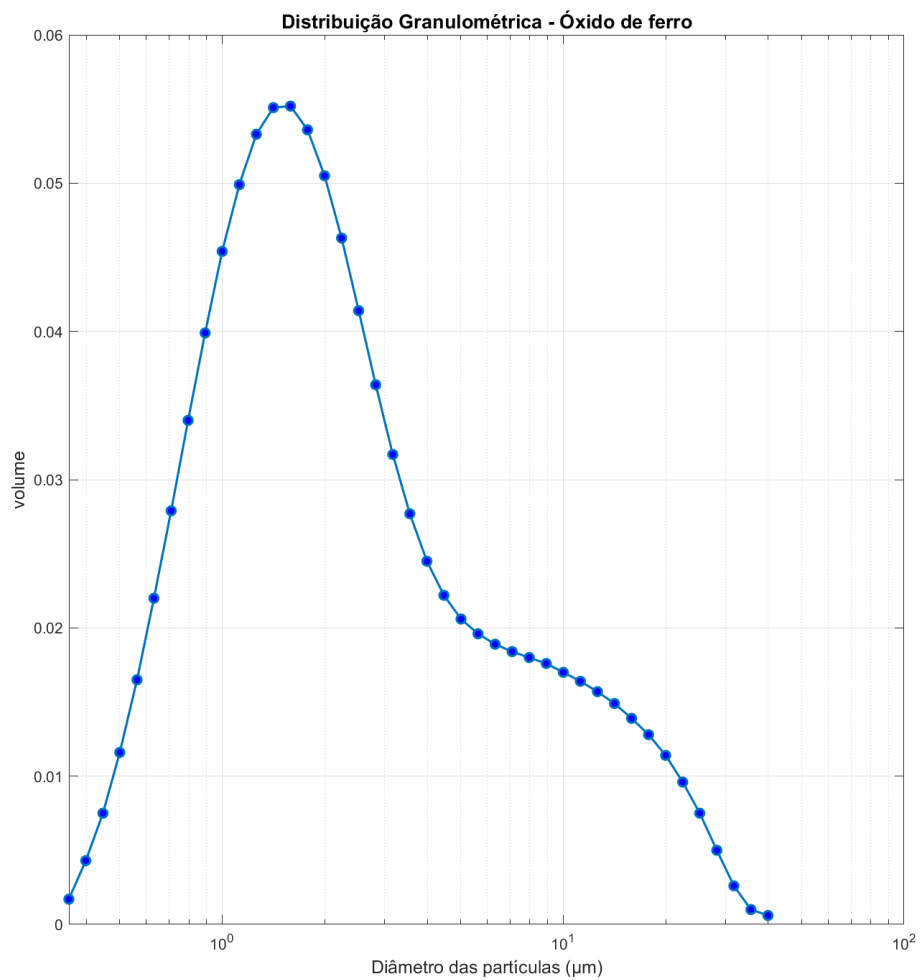


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica – Óxido de ferro.

Fonte: Autor (2025).

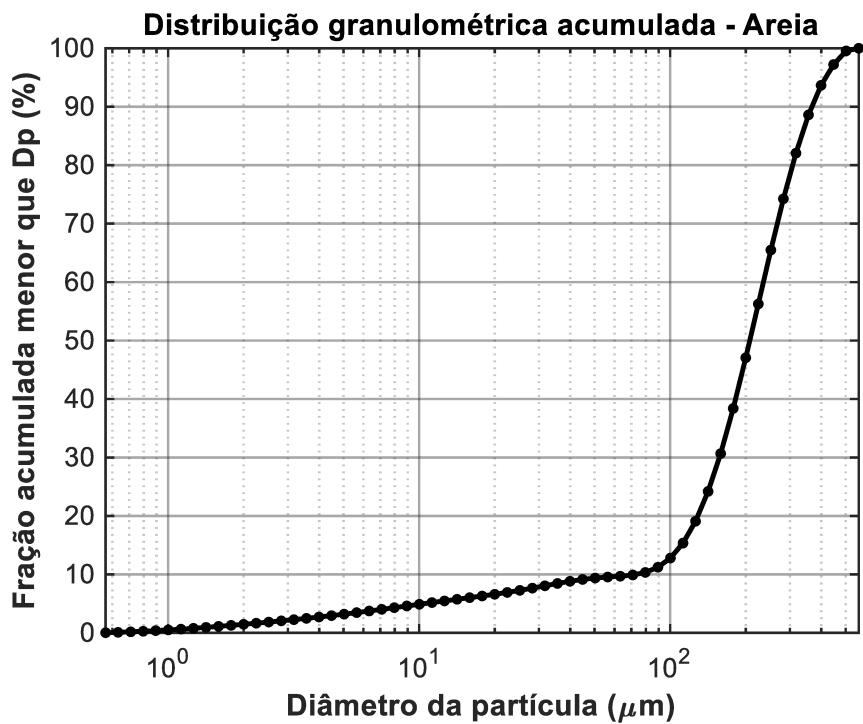


Figura 4.3 – Distribuição granulométrica acumulada - Areia.

Fonte: Autor (2025).

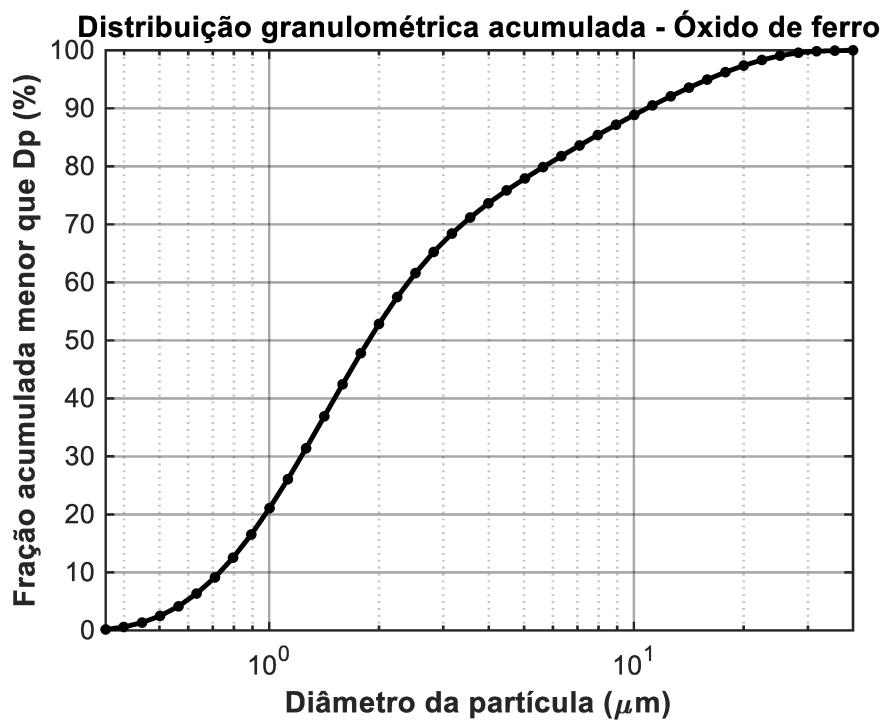


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica acumulada – Óxido de ferro.

Fonte: Autor (2025).

Tabela 4.2 – Distribuição granulométrica - Areia.

Areia	
Tamanho da Partícula (µm)	volume na amostra (%)
0.564	0.03
0.632	0.06
0.710	0.08
0.796	0.10
0.893	0.11
1.002	0.12
1.125	0.13
1.262	0.15
1.416	0.16
1.589	0.17
1.783	0.17
2.000	0.18
2.244	0.19
2.518	0.20
2.825	0.20
3.170	0.21
3.557	0.22
3.991	0.23
4.477	0.24
5.024	0.25

Areia	
Tamanho da Partícula (µm)	volume na amostra (%)
5.637	0.26
6.325	0.28
7.096	0.28
7.962	0.29
8.934	0.29
10.024	0.29
11.247	0.29
12.619	0.28
14.159	0.28
15.887	0.28
17.825	0.28
20.000	0.30
22.440	0.32
25.179	0.35
28.251	0.38
31.698	0.40
35.566	0.40
39.905	0.37
44.774	0.32
50.238	0.24

Areia	
Tamanho da Partícula (µm)	volume na amostra (%)
56.368	0.17
63.246	0.14
70.963	0.21
79.621	0.44
89.337	0.88
100.237	1.58
112.468	2.55
126.191	3.74
141.589	5.10
158.866	6.47
178.250	7.72
200.000	8.67
224.404	9.20
251.785	9.23
282.508	8.76
316.979	7.81
355.656	6.55
399.052	5.05
447.744	3.56
502.377	2.33
563.677	0.45

Tabela 4.3 – Distribuição granulométrica – Óxido de ferro.

Óxido de ferro		Óxido de ferro		Óxido de ferro	
Tamanho da Partícula (µm)	volume na amostra (%)	Tamanho da Partícula (µm)	volume na amostra (%)	Tamanho da Partícula (µm)	volume na amostra (%)
0.356	0.17	1.783	5.36	8.934	1.76
0.399	0.43	2.000	5.05	10.024	1.70
0.448	0.75	2.244	4.63	11.247	1.64
0.502	1.16	2.518	4.14	12.619	1.57
0.564	1.65	2.825	3.64	14.159	1.49
0.632	2.20	3.170	3.17	15.887	1.39
0.710	2.79	3.557	2.77	17.825	1.28
0.796	3.40	3.991	2.45	20.000	1.14
0.893	3.99	4.477	2.22	22.440	0.96
1.002	4.54	5.024	2.06	25.179	0.75
1.125	4.99	5.637	1.96	28.251	0.50
1.262	5.33	6.325	1.89	31.698	0.26
1.416	5.51	7.096	1.84	35.566	0.10
1.589	5.52	7.962	1.80	39.905	0.06

4.2 PERDA DE CARGA NO CICLONE PROTÓTIPO

A vazão de ar que alimenta o ciclone foi determinada a partir da medição de pressão imediatamente a jusante do soprador, por meio da tomada de pressão H2. Com base nesse valor e na curva característica do soprador, determinou-se a vazão volumétrica do escoamento, conforme descrito na Seção 3.3.1.

A perda de carga teórica do ciclone protótipo foi calculada a partir das correlações propostas por Perry e Green (2008), descritas na Seção 2.2.4.

A perda de carga experimental foi obtida por meio da medição de pressão na tomada H4, correspondente à diferença de pressão entre a entrada e a saída do ciclone, sendo esta última referenciada à pressão atmosférica.

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.4 e indicam que os valores experimentais de perda de carga apresentam boa concordância com aqueles estimados pelas equações de Perry e Green (2008).

Tabela 4.4 – Comparação da perda de carga experimental com o modelo teórico.

Pressão em H2 [mmca]	Velocidade de entrada [m/s]	Perda de		KV real $\left[\frac{m^3/h}{\sqrt{bar}}\right]$	KV teórico $\left[\frac{m^3/h}{\sqrt{bar}}\right]$	Erro relativo [%]
		carga real no ciclone (pressão em H4) [mmca]	Perda de carga teórica [mmca]			
249	15,36	103,6	98,81	156,3	161,1	2,98
260	9,94	40,9	39,02	161,1	164,9	2,30

4.3 EFICIÊNCIAS DE COLETA

Para a estimativa das eficiências globais de coleta do ciclone protótipo, foi utilizado os modelos teóricos de Lapple, Barth, Leith & Licht e Dietz, implementados em Matlab (Apêndice A). As variáveis de entrada são: as propriedades do fluido (densidade e viscosidade), as propriedades físicas do material particulado (densidade e distribuição granulométrica), a vazão do fluido e a geometria do ciclone protótipo.

A eficiência global de coleta experimental foi determinada a partir da razão entre a massa total de material particulado que adentrou o ciclone e a massa efetivamente coletada no *underflow* ao final de cada ensaio Eq. (2.8).

A Tabela 4.5 apresenta os valores de eficiência global de coleta calculados pelos diferentes modelos teóricos, bem como os resultados experimentais correspondentes para cada condição avaliada.

As figuras 4.5 e 4.6 exibem a comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos a partir dos modelos teóricos, para areia e óxido de ferro, respectivamente.

Nota-se que os modelos de Lapple e Dietz apresentaram valores significativamente inferiores às eficiências experimentais, ou seja, são mais conservadores, sobretudo nos ensaios realizados com partículas mais finas.

O modelo de Barth, por sua vez, apresentou desempenho intermediário, com valores de eficiência superiores aos de Lapple e Dietz, porém ainda inferiores aos resultados experimentais para as condições analisadas.

O modelo de Leith e Licht foi o que apresentou melhor concordância com os resultados experimentais, tanto nos ensaios realizados com óxido de ferro, quanto nos ensaios realizados com areia.

Nota-se que para a areia, que possui partículas mais grossas, todos os modelos apresentaram boas previsões de coletas.

A comparação entre os resultados experimentais e os valores previstos pelos modelos teóricos mostram que, embora os modelos clássicos sejam ferramentas fundamentais na fase de projeto e dimensionamento, ainda faz-se importante a avaliação experimental de um protótipo.

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados dos modelos teóricos com os resultados experimentais para a eficiência de coleta do ciclone.

Experimento	Eficiência global de coleta [%]				
	Modelo Lapple	Modelo Barth	Modelo Leith e Licht	Modelo Dietz	Resultado experimental
E-O-T35-V15	31,51	55,02	73,38	32,19	86,36
E-O-T70-V15	31,51	55,02	73,38	32,19	89,14
E-A-T350-V15	96,13	98,34	98,79	97,08	99,81
E-A-T700-V15	96,13	98,34	98,79	97,08	99,61
E-O-T35-V10	24,07	46,08	69,32	26,83	90,14
E-O-T70-V10	24,07	46,08	69,32	26,83	90,42
E-A-T350-V10	95,31	97,96	98,56	96,61	99,69
E-A-T700-V10	95,31	97,96	98,56	96,61	99,74

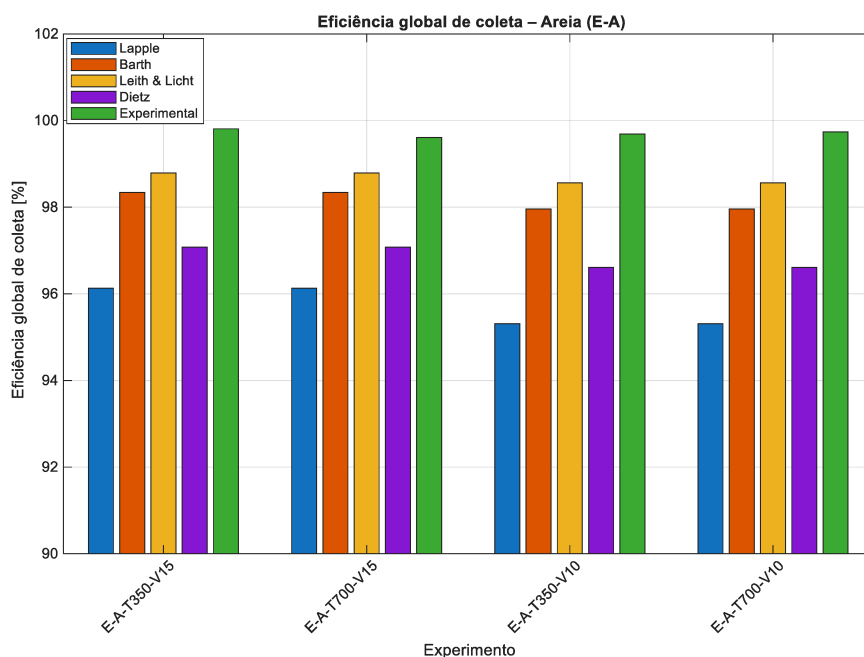


Figura 4.5 – Comparação dos resultados dos modelos teóricos com os resultados experimentais para a eficiência de coleta do ciclone – Areia.

Fonte: Autor (2025).

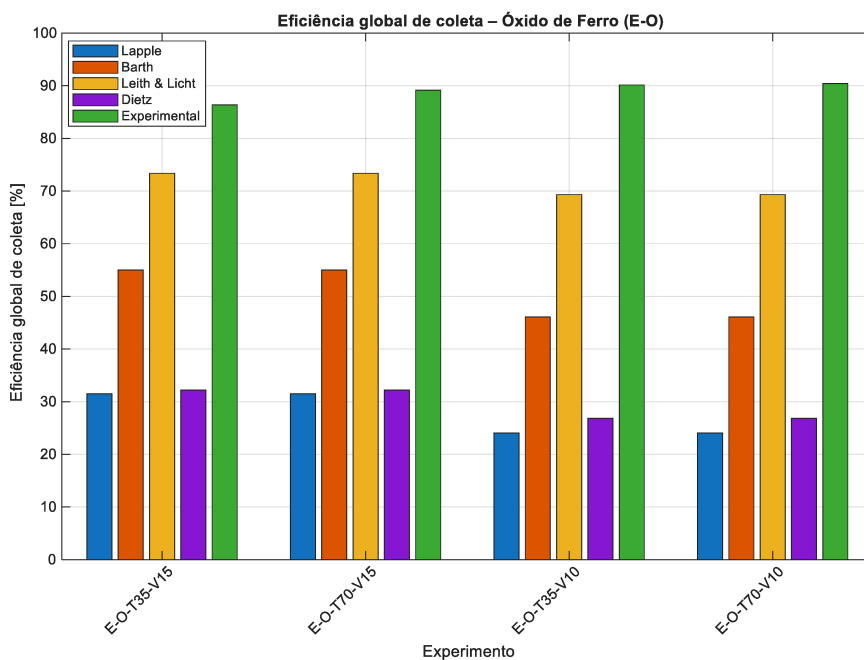


Figura 4.6 – Comparação dos resultados dos modelos teóricos com os resultados experimentais para a eficiência de coleta do ciclone – Óxido de ferro.

Fonte: Autor (2025).

Cabe destacar que os modelos matemáticos de eficiência de coleta empregados neste trabalho não preveem variações na eficiência em função da concentração de material particulado, pois nenhum dos modelos incorpora a concentração de partículas como variável em suas formulações. De modo geral, as equações consideram apenas propriedades do fluido, características físicas das partículas, parâmetros geométricos do ciclone e condições hidrodinâmicas do escoamento.

Como consequência, as eficiências globais calculadas pelos modelos permanecem constantes independentemente da taxa de alimentação de material particulado imposta ao sistema. Tal comportamento é observado nos resultados apresentados na Tabela 4.5, nos quais os valores de eficiência teórica não se alteram entre ensaios realizados sob diferentes condições de alimentação de sólidos, desde que as demais variáveis permaneçam constantes.

4.3.1 Comparação dos modelos teóricos X experimentos – Óxido de ferro

As Figuras 4.7 e 4.8 exibem a distribuição granulométrica acumulada de entrada e de coleta (*underflow*) para o óxido de ferro, calculadas pelos quatro modelos, juntamente com dois conjuntos de dados experimentais (E-O-T35-V10 e E-O-T70-V10), quando as velocidades de entrada são 10 m/s e 15 m/s, respectivamente.

A curva de Entrada representa a condição inicial do material particulado alimentado no ciclone, servindo como referência para avaliar o grau de deslocamento das distribuições previstas após a separação. Quanto menor o deslocamento da curva de *underflow* para a direita, maior é a eficiência de coleta, uma vez que partículas menores passam a ser removidas com maior probabilidade.

Entre os modelos teóricos, observa-se que o modelo de Dietz apresenta o comportamento mais conservador, com a curva de *underflow* fortemente deslocada para diâmetros maiores. Isso indica que uma fração significativa de partículas finas não é coletada, resultando em um *overflow* mais carregado de material fino.

O modelo de Lapple apresenta um desempenho intermediário, com maior eficiência na região de partículas finas quando comparado aos modelos de Barth e Dietz, porém com menor eficiência para diâmetros maiores quando comparado a estes modelos.

O modelo de Barth prevê uma coleta mais eficiente do que Lapple, especialmente na faixa intermediária de diâmetros, porém mais conservador para diâmetros menores.

O modelo de Leith & Licht apresenta um comportamento menos conservador, demonstrando maior eficiência de coleta. É possível notar que em grande parte da faixa granulométrica, a curva de Leith & Licht acompanha de forma mais próxima as curvas E-O-T35-V10 e E-O-T70-V10, indicando melhor concordância com os resultados experimentais.

Comparação dos Modelos - Óxido de ferro - $V_{in} = 10 \text{ m/s}$

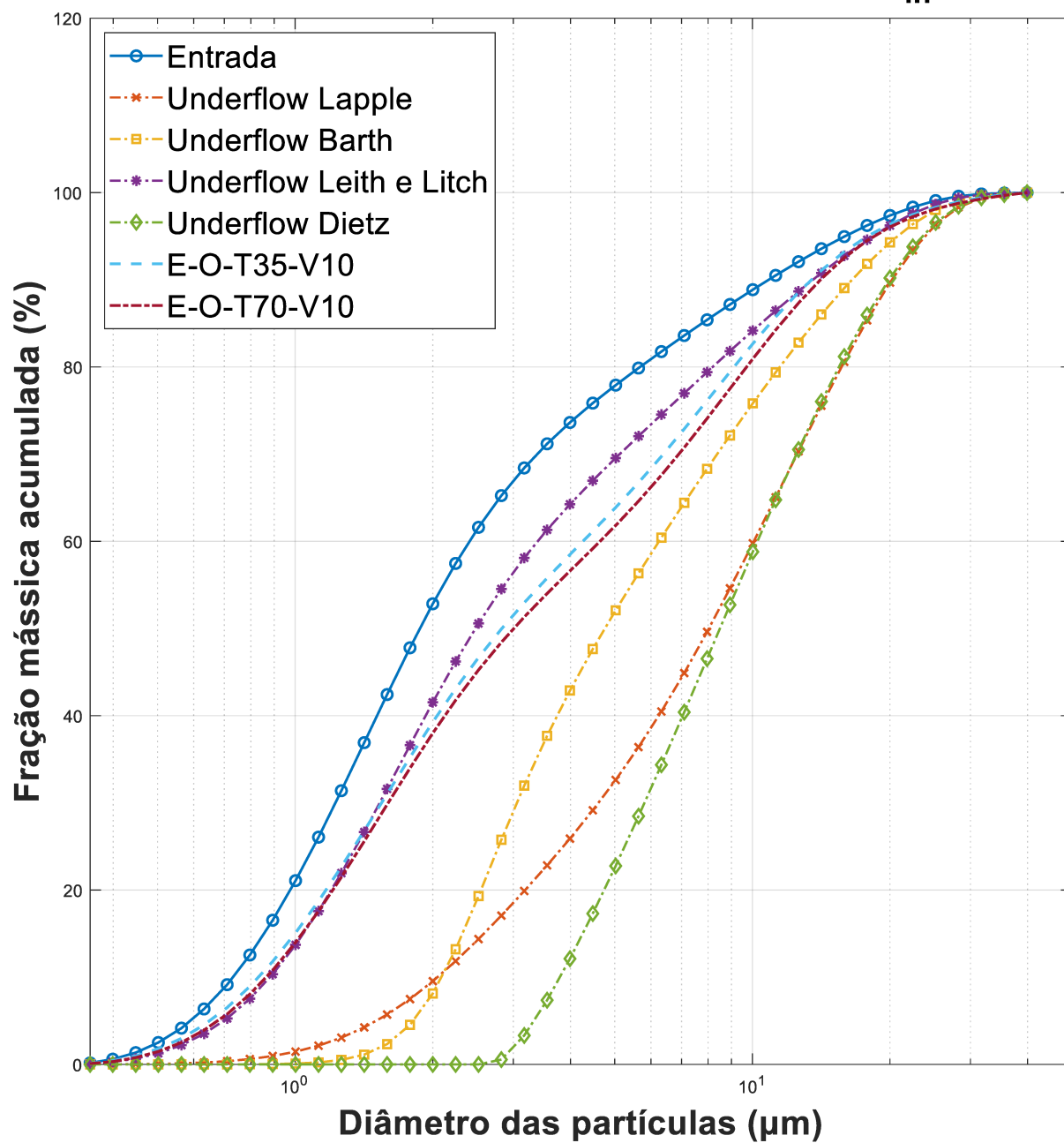


Figura 4.7 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Óxido de ferro V10.

Fonte: Autor (2025).

Comparação dos Modelos - Óxido de ferro - $V_{in} = 15 \text{ m/s}$

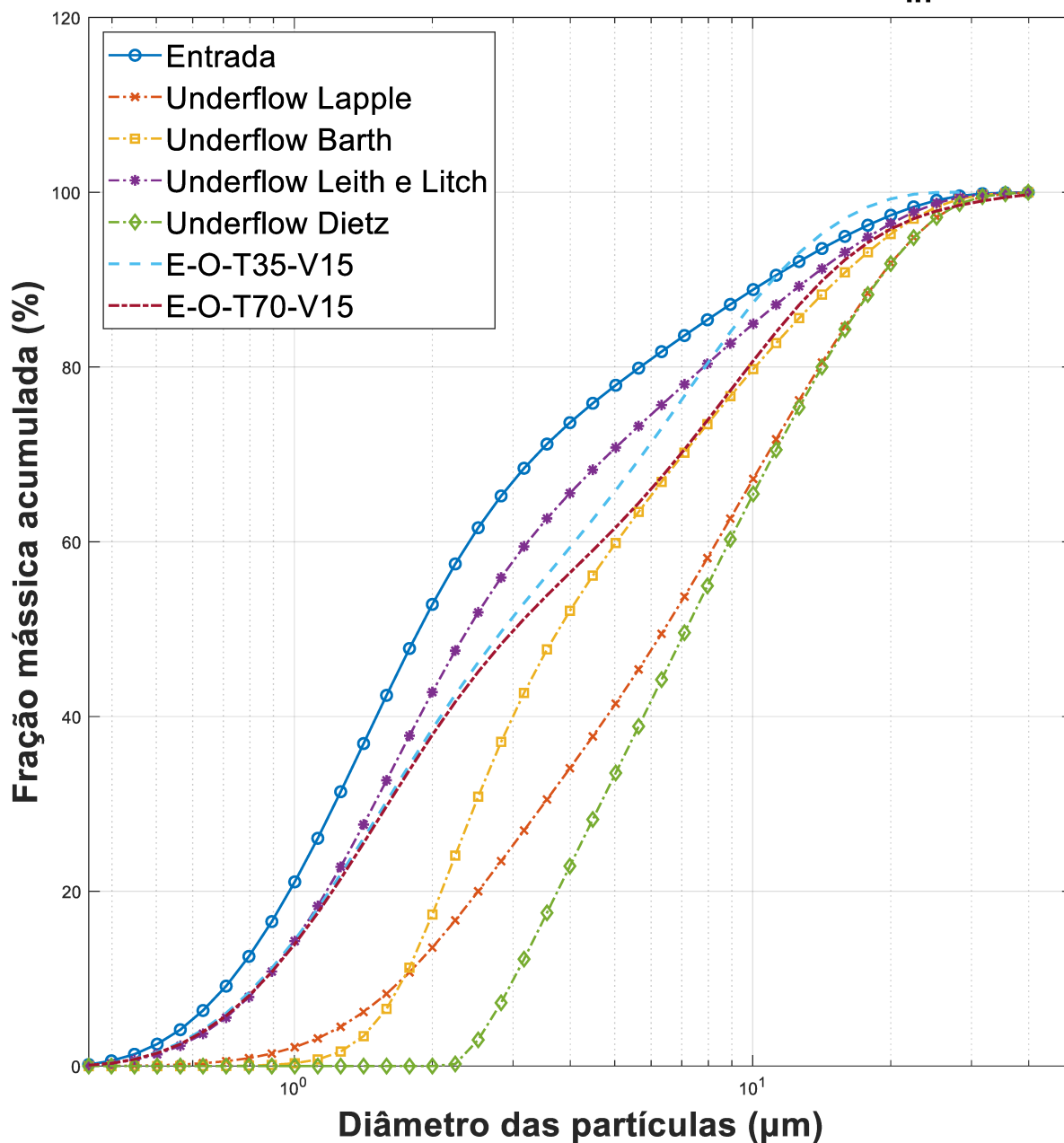


Figura 4.8 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Óxido de ferro V15.

Fonte: Autor (2025).

4.3.2 Comparação dos modelos teóricos X experimentos – Areia

As figuras 4.9 a 4.12 apresentam a comparação entre os modelos de eficiência aplicados a areia, incluindo a distribuição granulométrica de entrada, dos *underflows* previstos pelos quatro modelos e a distribuição granulométrica do material coletado.

Os dados experimentais apresentam comportamento semelhante ao longo da maior parte da faixa granulométrica. Observa-se que essas curvas situam-se próximas à distribuição de entrada, o que indica que, para partículas de areia, uma fração significativa já se encontra na faixa de diâmetro superior ao diâmetro de corte, reduzindo a sensibilidade do resultado global à escolha do modelo de eficiência. Ainda assim, o modelo de Leith & Licht apresenta novamente mais concordância com os resultados experimentais.

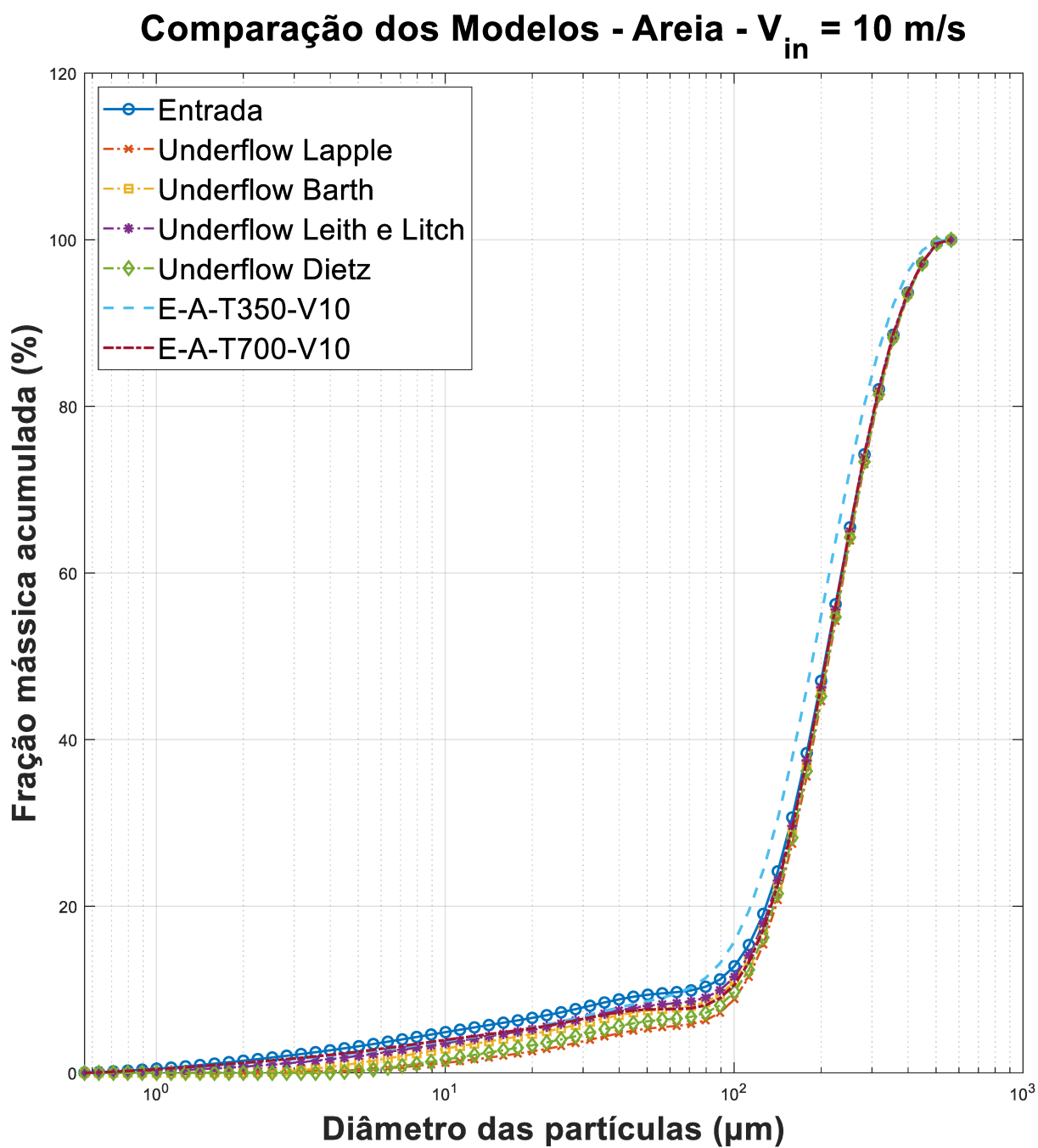


Figura 4.9 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V10.

Fonte: Autor (2025).

Comparação dos Modelos - Areia - $V_{in} = 10 \text{ m/s}$

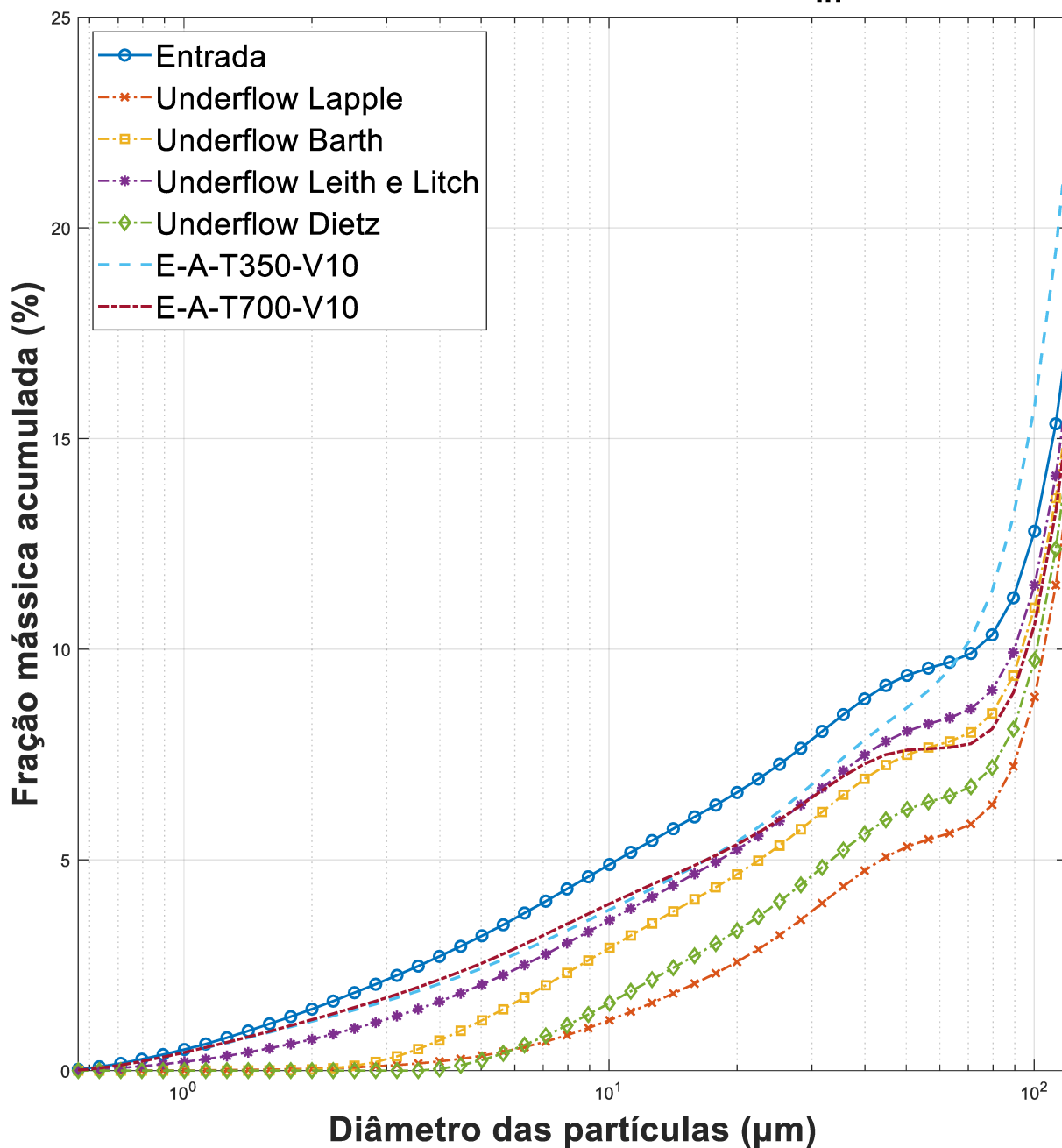


Figura 4.10 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V10 – zoom próximo ao diâmetro de corte.

Fonte: Autor (2025).

Comparação dos Modelos - Areia - $V_{in} = 15 \text{ m/s}$

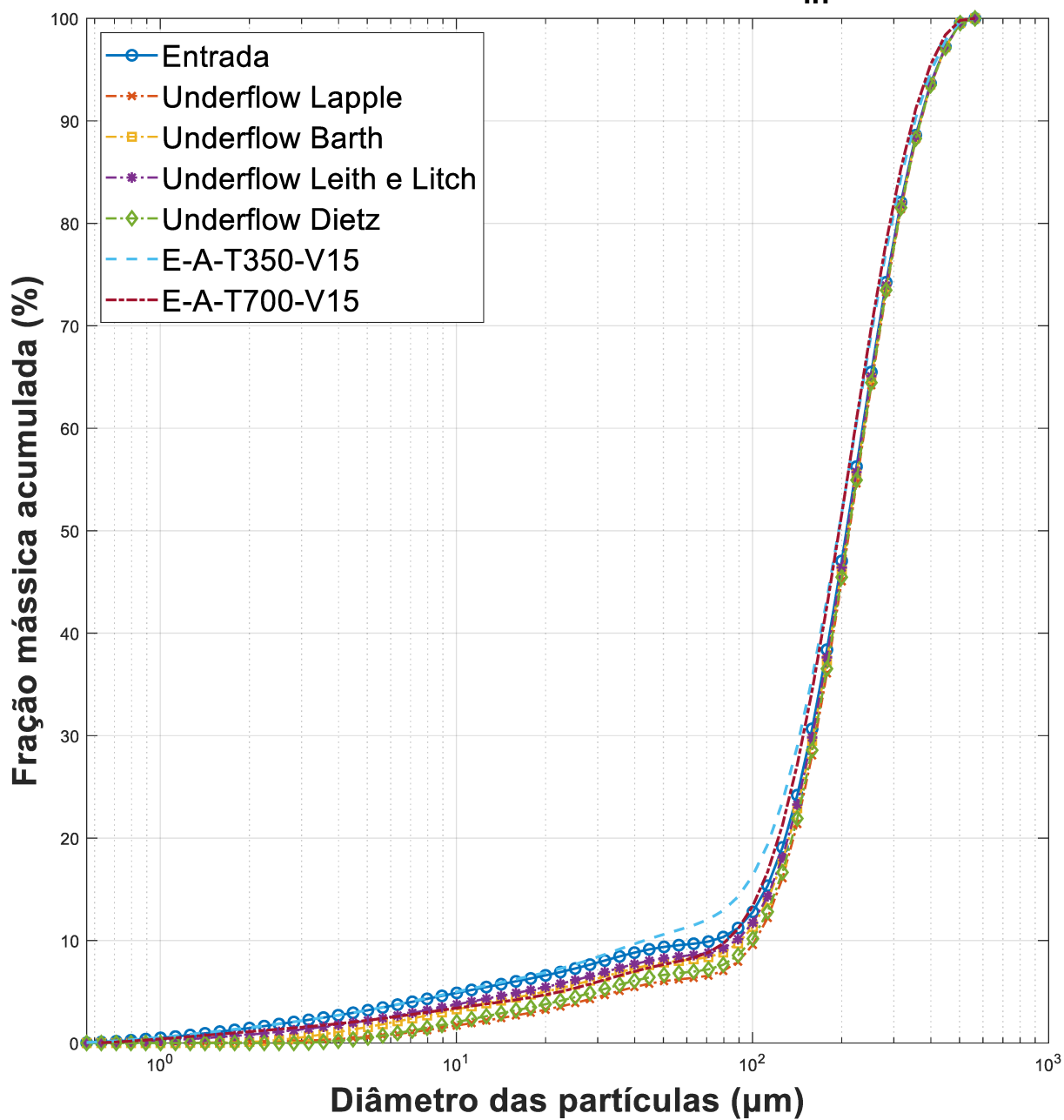


Figura 4.11 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V15

Fonte: Autor (2025).

Comparação dos Modelos - Areia - $V_{in} = 15 \text{ m/s}$

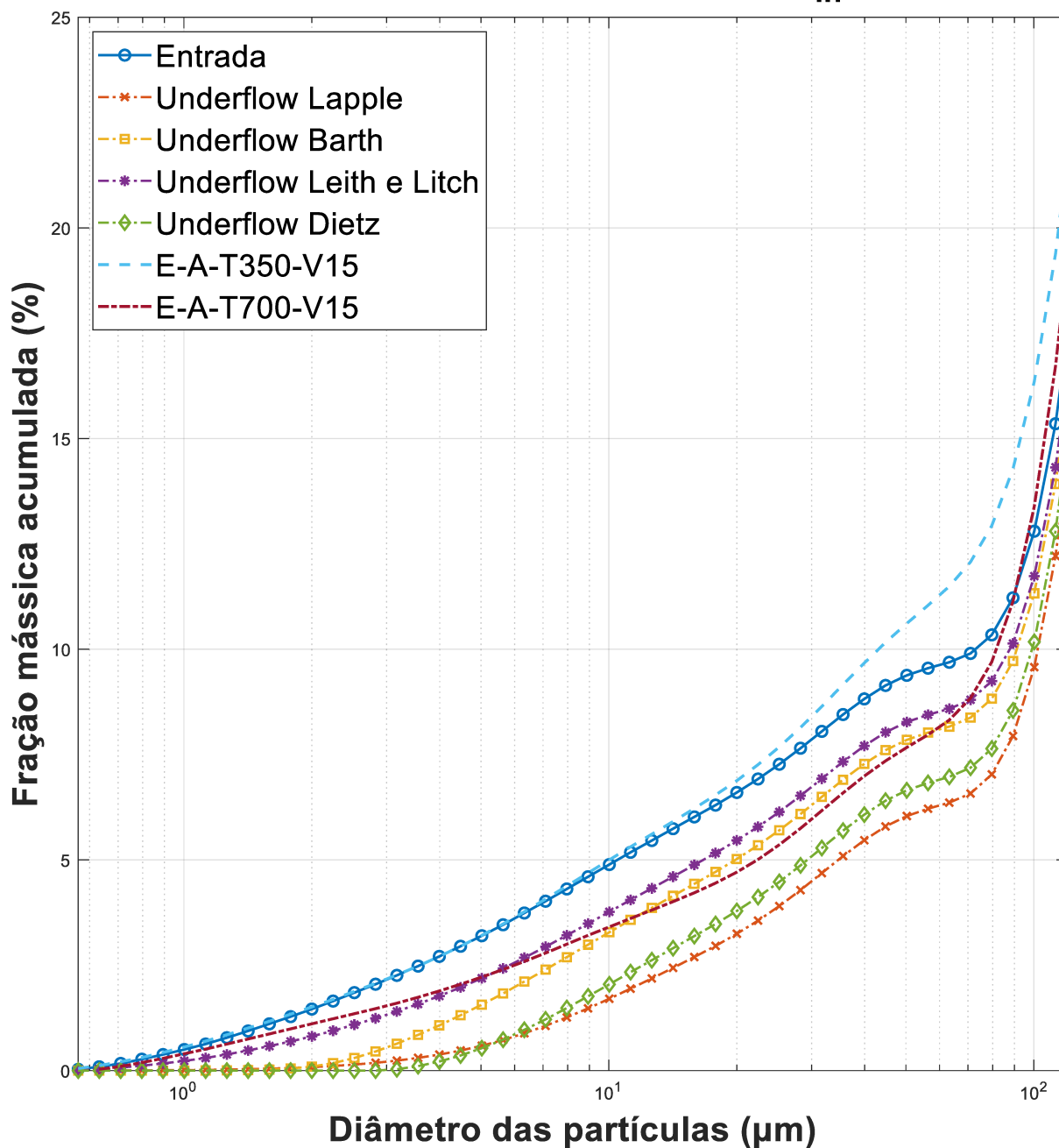


Figura 4.12 – Comparação dos Modelos teóricos X experimentos – Areia V15 – zoom próximo ao diâmetro de corte.

Fonte: Autor (2025).

4.4 GEOMETRIA DO CICLONE PARA O REATOR DE GASEIFICAÇÃO

A distribuição granulométrica adotada para o estudo da geometria de um ciclone para o reator de gaseificação teve como base os dados experimentais

reportados por Yao, Xu e Li (2016), que realizaram a caracterização físico-química de cinzas volantes provenientes da gaseificação de sabugo de milho em escala industrial. Nesse trabalho, os autores empregaram análise granulométrica por difração a laser. A distribuição de tamanhos de partículas apresentada nesse estudo foi utilizada como dado de entrada nos modelos de eficiência aplicados neste trabalho, servindo de base para a avaliação comparativa e a determinação da geometria de ciclone que resultasse na maior eficiência global de separação. A distribuição granulométrica é exibida na Figura 4.13.

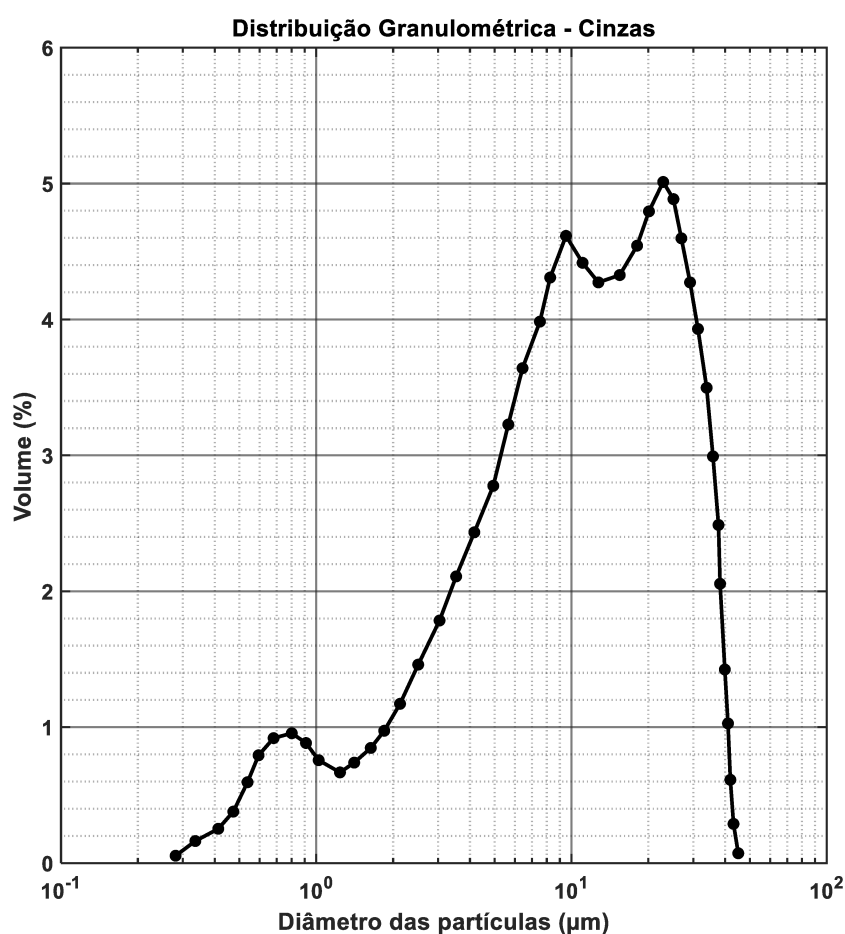


Figura 4.13 – Distribuição granulométrica de cinzas de gaseificação provenientes de palha de milho. Fonte: Yao, Xu e Li (2016).

Após a etapa de varredura geométrica, o software desenvolvido avaliou 10.597 geometrias válidas de ciclone, calculando, para cada uma delas, a eficiência global de coleta e diâmetro de corte a partir dos modelos de Leith & Licht, Dietz, Barth e Lapple, além da perda de carga. A análise inicial dos resultados mostrou que as eficiências

máximas obtidas para cada modelo foram de 65,08% para o modelo de Lapple, 85,97% para o modelo de Barth, 82,52% para Leith e Licht e 62,34% para Dietz. Porém, esses valores máximos não ocorreram em uma única geometria, o que era esperado, uma vez que cada modelo apresenta diferentes hipóteses para cálculo de eficiência.

Apesar dos resultados experimentais com o ciclone protótipo serem mais próximos do modelo de Leith e Licht, a seleção da geometria final não ocorreu exclusivamente no maior valor de eficiência fornecido por este modelo. Para seleção da melhor geometria, foi implementado no software um algoritmo de seleção com tolerância adaptativa para identificar uma geometria que apresentasse desempenho elevado quando avaliada simultaneamente pelos diferentes modelos. Inicialmente, o algoritmo considera uma tolerância restritiva e seleciona as geometrias que estão dentro da faixa estabelecida entre a eficiência máxima possível para cada modelo e a tolerância. Para serem selecionadas, as geometrias precisam estar dentro da faixa de tolerância dos quatro modelos, simultaneamente.

Quando nenhuma geometria é encontrada, a tolerância é incrementada, até que seja identificada ao menos uma solução viável. Uma vez definido o conjunto final de geometrias candidatas, adota-se como critério de desempate a maior eficiência segundo o modelo de Leith e Licht.

A aplicação desse método resultou na seleção de uma geometria que apresentou eficiências globais de coleta de 64,45% pelo modelo de Lapple, 82,96% pelo modelo de Barth, 80,05% pelo modelo de Leith e Licht e 61,06% pelo modelo de Dietz, associadas a uma perda de carga de 464,9 Pa. Embora essa configuração não corresponda ao valor máximo absoluto previsto por nenhum dos modelos avaliados individualmente, seus resultados situam-se muito próximos das eficiências máximas encontradas em cada modelo, conforme apresentado na Tabla 4.4.

A análise comparativa entre as eficiências obtidas para a geometria selecionada e os valores máximos estimados por cada modelo evidencia que as diferenças são pequenas. Para o modelo de Lapple, a eficiência alcançada difere em menos de 1% do valor máximo previsto, enquanto para os modelos de Barth e de Leith e Licht e Dietz as diferenças são da ordem de 3%, indicando que a geometria selecionada opera em uma região próxima ao melhor desempenho teórico possível para os diferentes modelos avaliados.

A Tabela 4.7 apresenta os valores do diâmetro de corte associados à geometria selecionada para cada modelo teórico. Observa-se que os menores diâmetros de corte foram obtidos pelos modelos de Leith e Licht (2,83 μm) e de Barth (4,08 μm), o que está diretamente associado às maiores eficiências globais de coleta previstas por esses modelos. Por outro lado, os modelos de Lapple e Dietz apresentaram diâmetros de corte superiores, de 7,67 μm e 9,13 μm , respectivamente, refletindo as menores eficiências estimadas por esses modelos.

Como resultado de busca, filtragem e desempate, o software retornou a geometria listada abaixo:

- $D_c = 0,490$;
- $D_e = 0,276$;
- $D_d = 0,148$;
- $H = 0,3450$;
- $W = 0,098$;
- $S = 0,395$;
- $L_b = 0,786$;
- $L_c = 0,980$

Tabela 4.6 – Comparação da eficiência de coleta da geometria selecionada X eficiência máxima do modelo.

	Eficiência global de coleta - para geometria selecionada [%]	Eficiência global de coleta máxima [%]
Modelo Lapple	64,45	65,08
Modelo Barth	82,96	85,97
Modelo Leith e Licht	80,05	82,52
Modelo Dietz	61,06	62,34

Tabela 4.7 – Diâmetro de corte para cada modelo, para geometria selecionada.

Diâmetro de corte para geometria selecionada [μm]	
Modelo Lapple	7,67
Modelo Barth	4,08
Modelo Leith e Licht	2,83
Modelo Dietz	9,13

Tabela 4.8 – Comparação das proporções geométricas das famílias conhecidas X geometria selecionada.

Ciclone	Aplicação Recomendada	Dc	H/Dc	W/Dc	De/Dc	S/Dc	Lb/Dc	Lt/Dc	Dd/Dc
STAIRMAND (1951)	Alta eficiência	1	0,5	0,2	0,5	0,5	1,5	4	0,38
SWIFT (1969)	Alta eficiência	1	0,4	0,21	0,4	0,5	1,4	3,9	0,4
LAPPLE (1951)	Uso geral	1	0,5	0,25	0,5	0,63	2	4	0,25
SWIFT (1969)	Uso geral	1	0,5	0,25	0,5	0,6	1,8	3,8	0,4
STAIRMAND (1951)	Alta vazão	1	0,8	0,38	0,75	0,88	1,5	4	0,38
SWIFT (1969)	Alta vazão	1	0,8	0,35	0,75	0,85	1,7	3,7	0,4
CICLONE - REATOR DE GASEIFICAÇÃO	Alta eficiência	1	0,7	0,21	0,59	0,84	1,67	3,76	0,31

4.4.1 Arranjo de ciclones em série para o reator de gaseificação

4.4.1.1 Dois ciclones em série para o reator de gaseificação

Com base nos resultados obtidos para o ciclone primário, foi avaliada a aplicação de uma associação de dois ciclones em série com o objetivo de elevar a eficiência de coleta de material particulado no reator. Nessa configuração, o primeiro ciclone atua como estágio primário de separação, enquanto o segundo ciclone é responsável pela coleta do material particulado que não foi retido no primeiro estágio.

Assim, a alimentação do segundo ciclone corresponde diretamente ao *overflow* do primeiro.

A previsão do desempenho dos ciclones operando em série foi realizada utilizando-se o modelo de Leith e Licht, uma vez que esse modelo apresentou a maior concordância com os resultados experimentais obtidos.

A partir da distribuição granulométrica proposta por Yao, Xu e Li (2016) e da geometria selecionada para o primeiro ciclone, os resultados de *underflow* (material coletado) e *overflow* (material não retido, que alimenta o segundo ciclone) são apresentados nas Figuras 4.14 e 4.15, conforme previsto pelo modelo de Leith e Licht.

Modelo Leith e Licht - Cinzas - 1º Estágio - $V_{in} = 20 \text{ m/s}$

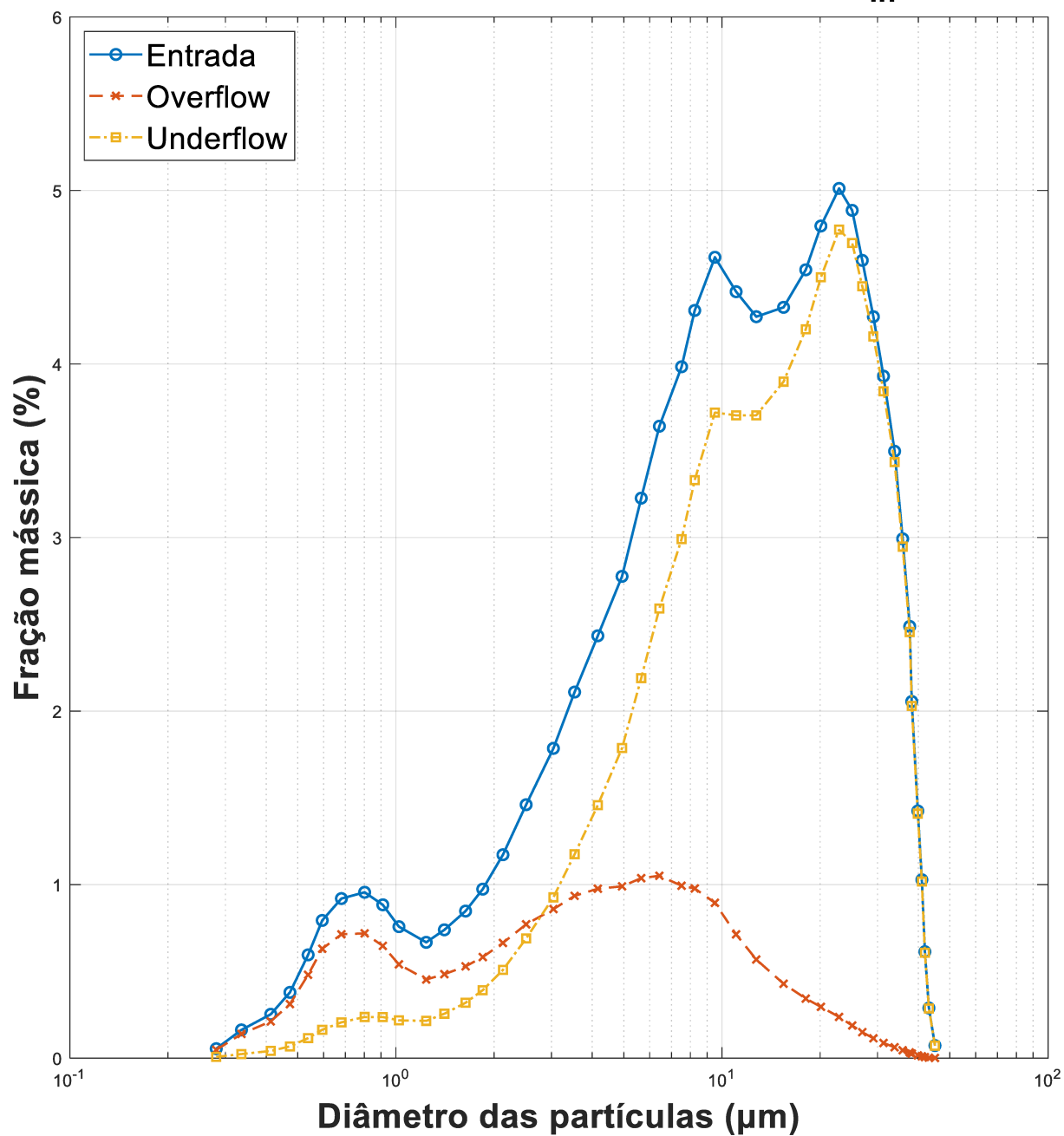


Figura 4.14 – Curvas: entrada, *underflow* e *overflow* para o modelo de Leith e Licht – Ciclone de primeiro estágio.

Fonte: Autor (2025).

A partir da granulometria do material que segue para o segundo ciclone, o programa realizou uma nova varredura de dimensões, avaliando novamente milhares de geometrias possíveis de ciclone, considerando como condição de entrada a distribuição granulométrica modificada pelo primeiro estágio de separação. Para cada uma dessas geometrias candidatas, foram calculadas as eficiências de coleta, permitindo a identificação da geometria mais eficiente para aquela distribuição específica de partículas, produto do *overflow* do primeiro ciclone.

A geometria encontrada para o segundo ciclone é listada abaixo:

- $D_c = 0,490$;
- $D_e = 0,296$;
- $D_d = 0,148$;
- $H = 0,3450$;
- $W = 0,098$;
- $S = 0,395$;
- $L_b = 0,786$;
- $L_c = 0,980$

Para esse ciclone, quando alimentado com o material particulado não coletado pelo primeiro estágio de separação, a distribuição granulométrica do *underflow* e *overflow* são apresentados na Figura 4.15. Nessas condições, a eficiência global de coleta do segundo ciclone foi de 55,07%, com diâmetro de corte de 3,03 μm e a perda de carga de 455,5 Pa.

Modelo Leith e Licht - Cinzas - 2º Estágio - $V_{in} = 20 \text{ m/s}$

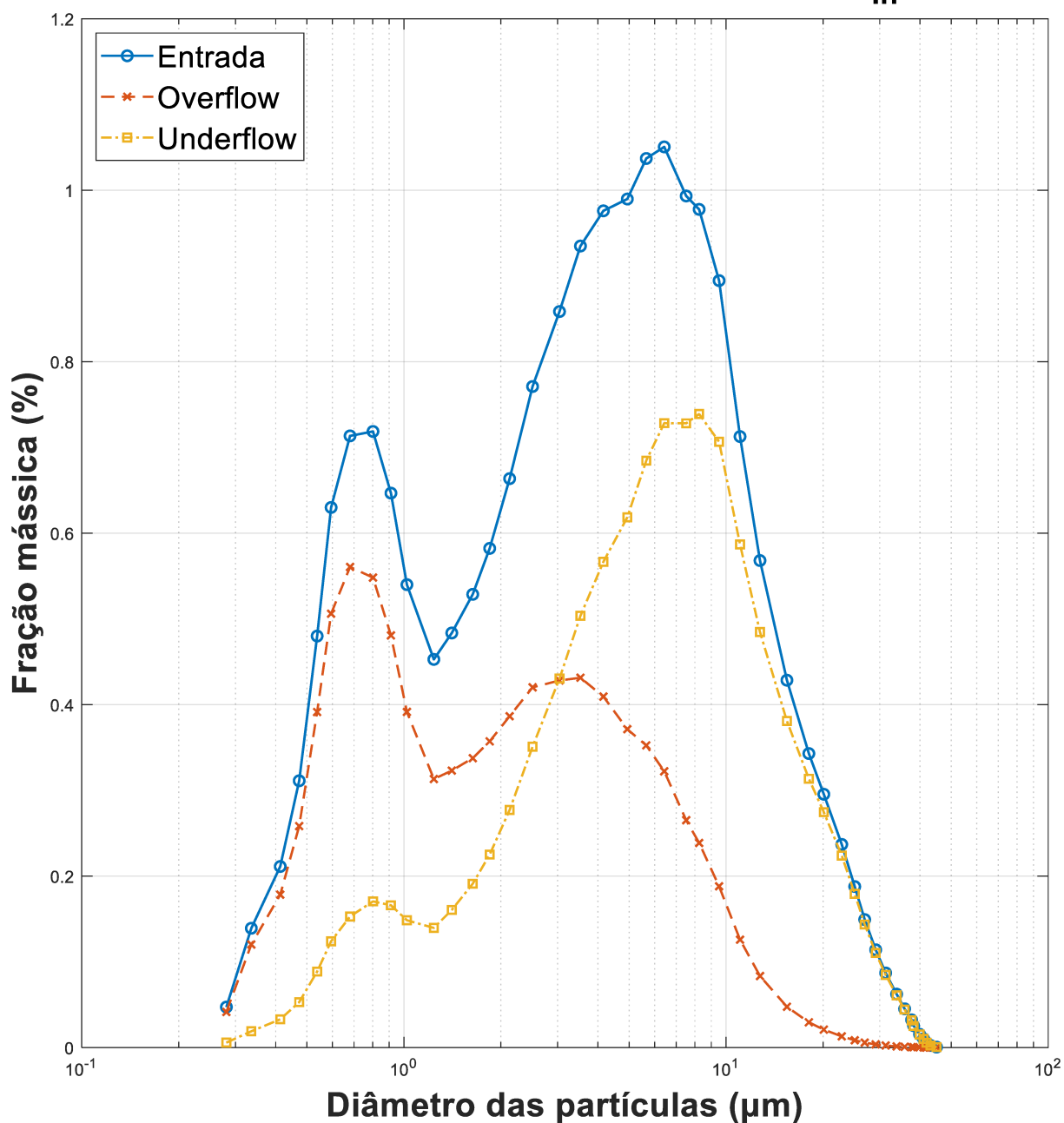


Figura 4.15 – Curvas: entrada, *underflow* e *overflow* para o modelo de Leith e Licht – Ciclone de segundo estágio.

Fonte: Autor (2025).

A eficiência global do sistema composto por dois ciclones operando em série pode ser determinada a partir da contribuição individual de cada estágio de separação, considerando que o segundo ciclone atua exclusivamente sobre o material particulado não coletado pelo primeiro. Dessa forma, a eficiência do sistema resulta da soma da

fração coletada no primeiro ciclone com a fração adicional removida no segundo ciclone.

Seja η_1 a eficiência global do primeiro ciclone e η_2 a eficiência global do segundo ciclone, calculada com base na distribuição granulométrica do material que alimenta esse segundo estágio. A fração de partículas que não é coletada no primeiro ciclone é dada por $(1 - \eta_1)$. Sobre essa fração passante atua o segundo ciclone, coletando a parcela $(1 - \eta_1)\eta_2$.

Assim, a eficiência global do sistema de dois ciclones em série pode ser expressa pela Equação 4.1.

$$\eta_{\text{sistema}} = \eta_1 + (1 - \eta_1) \eta_2 \quad (4.1)$$

Os resultados obtidos para o sistema composto de dois ciclones em série são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Eficiências do sistema de dois ciclones em série considerando o Modelo de Leith e Licht.

Eficiência de coleta [%]		Perda de carga [Pa]	Geometria [m]
Ciclone 1	80,05	464,9	Dc = 0,490
			De = 0,276
			Dd = 0,148
			H = 0,3450
			W = 0,098
			S = 0,395
			Lb = 0,786
			Lc = 0,980
Ciclone 2	55,07	455,5	Dc = 0,490
			De = 0,296
			Dd = 0,148
			H = 0,3450
			W = 0,098
			S = 0,395
			Lb = 0,786
			Lc = 0,98
Eficiência do sistema [%]		91,04	

4.4.1.2 Quatro ciclones em série para o reator de gaseificação

Para avaliar a eficiência de um arranjo composto por quatro ciclones em série, no qual o terceiro ciclone é alimentado com o material proveniente do *overflow* do segundo ciclone e o quarto ciclone recebe o material passante do *overflow* do terceiro, o programa executou uma nova varredura de geometrias. Nessa etapa foram, novamente, analisadas milhares de configurações geométricas possíveis, considerando como condição de entrada a distribuição granulométrica resultante do estágio anterior de separação.

Para cada geometria, foram recalculadas as eficiências de coleta, possibilitando a identificação da configuração mais eficiente para cada distribuição específica de partículas, formada a partir do *overflow* do ciclone anterior.

Quando o terceiro ciclone é alimentado com o *overflow* do segundo ciclone, e o quarto ciclone recebe o material passante do terceiro, as geometrias que apresentaram o melhor desempenho para o sistema de ciclones série são apresentadas na Tabela 4.9, bem como suas eficiências de coleta e perda de carga.

Tabela 4.9 – Eficiências do sistema de quatro ciclones em série considerando o Modelo de Leith e Licht.

	Eficiência de coleta [%]	Perda de carga [Pa]	Geometria [m]
Ciclone 1	80,05	464,9	Dc = 0,490
			De = 0,276
			Dd = 0,148
			H = 0,345
			W = 0,098
			S = 0,395
			Lb = 0,786
			Lc = 0,980
Ciclone 2	55,07	455,5	Dc = 0,490
			De = 0,296
			Dd = 0,148
			H = 0,345
			W = 0,098
			S = 0,395
			Lb = 0,786
			Lc = 0,980
Ciclone 3	42,66	396,2	Dc = 0,470
			De = 0,288
			Dd = 0,144
			H = 0,235
			W = 0,144
			S = 0,285
			Lb = 0,858
			Lc = 0,940
Ciclone 4	35,25	392,2	Dc = 0,470
			De = 0,288
			Dd = 0,144
			H = 0,235
			W = 0,144
			S = 0,335
			Lb = 0,858
			Lc = 0,940
Eficiência do sistema [%]		96,67	

Para este arranjo de ciclones, a eficiência de coleta estimada foi de 96,67%, ou seja, de todo material que adentrou à bateria de ciclones, apenas 3,33% não foi coletado.

Nota-se que os quatro ciclones otimizados apresentaram geometrias muito semelhantes, mesmo sendo dimensionados a partir de distribuições granulométricas diferentes. Esse comportamento indica que uma geometria de ciclone otimizada tende a apresentar elevada eficiência de coleta de forma geral, ou seja, uma configuração geométrica que proporciona alta eficiência na coleta de partículas finas também apresenta alta eficiência para partículas de maior diâmetro.

A esquematização dos quatro ciclones em série e o modelo 3D dos ciclones no reator de gaseificação são exibidos nas Figuras 4.16 e 4.17, respectivamente.

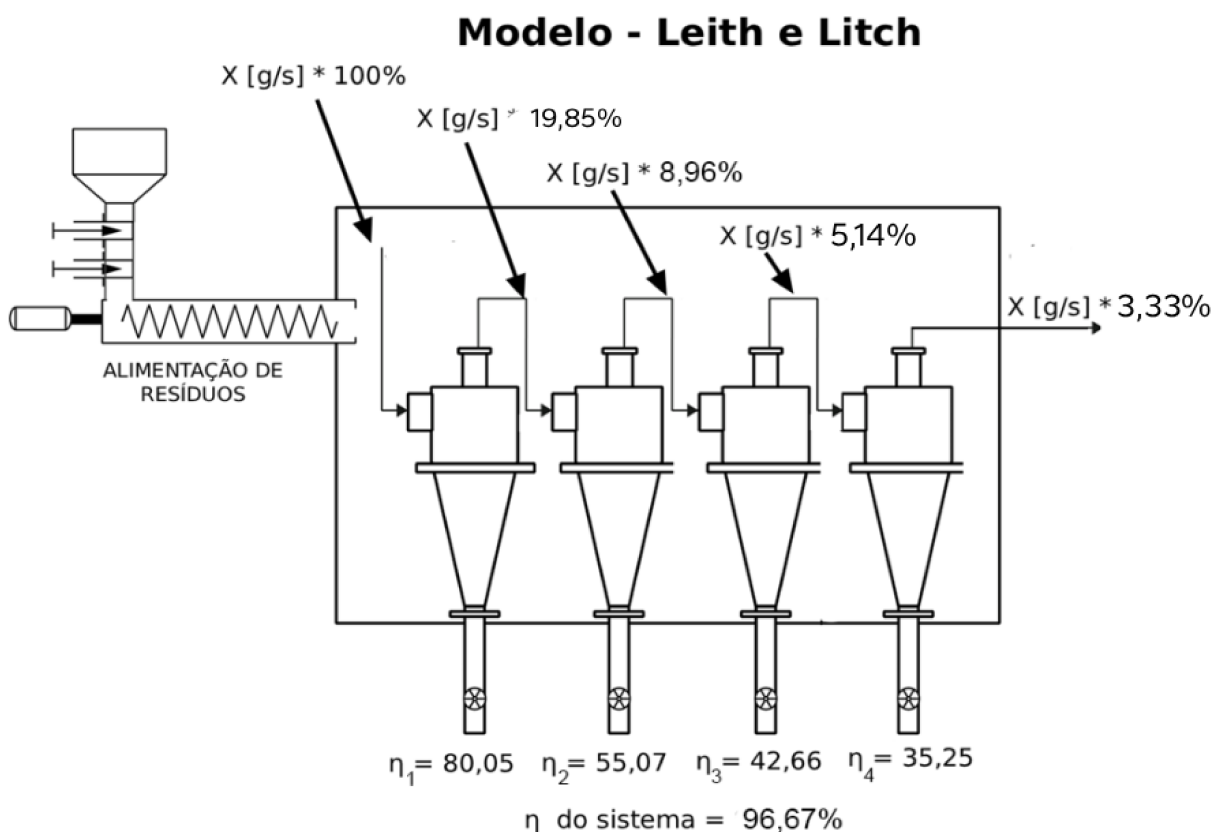


Figura 4.16 – Esquematização do reator com quatro ciclones em série e suas respectivas eficiências.

Fonte: Autor (2025).

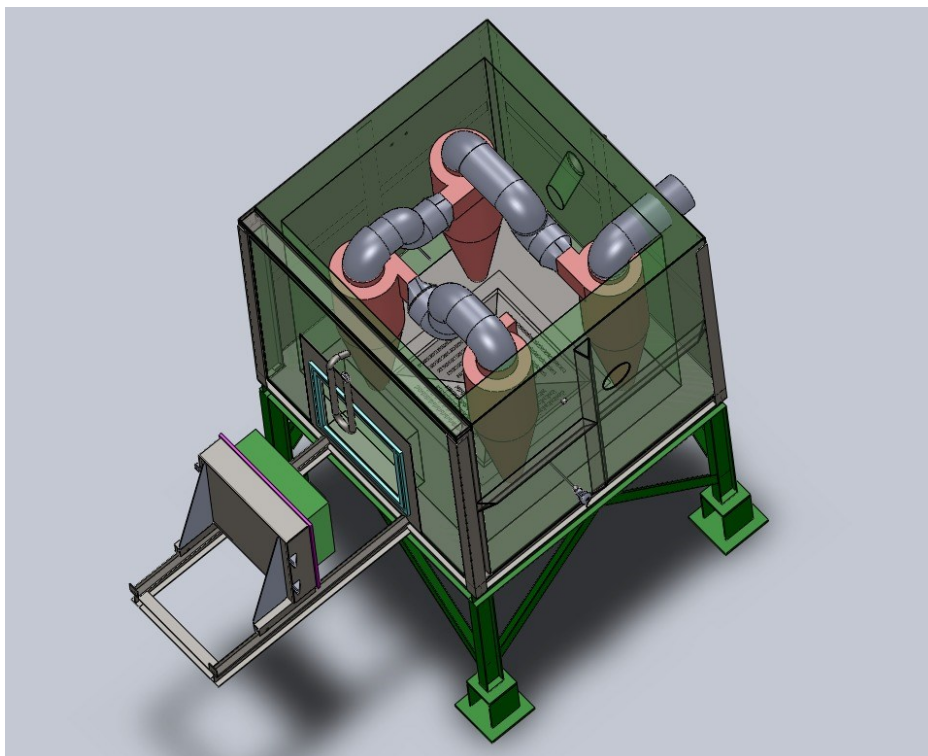


Figura 4.17 – Modelo 3D do reator de gaseificação com quatro ciclones em série.
Fonte: Autor (2025).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a eficiência de ciclones aplicados à remoção de material particulado em um sistema de gaseificação. A comparação entre diferentes modelos de eficiência evidenciou que, apesar de amplamente utilizados na literatura, esses modelos podem fornecer previsões distintas para uma mesma condição operacional, tanto em termos de eficiência global quanto individual.

Nesse contexto, o modelo de Leith e Licht destacou-se por apresentar a melhor concordância com os resultados experimentais tanto para partículas mais finas quanto para partículas mais grossas. Em função desta concordância, esse modelo foi adotado como referência para a avaliação do desempenho dos ciclones operando em série, servindo de base para as análises de eficiência dos arranjos.

A construção da bancada experimental, que era um dos objetivos específicos, possibilitou a realização de ensaios experimentais de forma satisfatória, permitindo a coleta de dados fundamentais para análise dos quatro modelos adotados no trabalho.

Da mesma forma, o desenvolvimento do software de dimensionamento e otimização, também definido como um dos objetivos específicos permitiu a análise de um grande número de geometrias, selecionando configurações com elevada eficiência de coleta, além de possibilitar a previsão da distribuição granulométrica do material coletado e do material que sai pelo *overflow*. A previsão da distribuição granulométrica do *overflow* permitiu analisar a eficiência de arranjos de ciclones em série, onde o segundo ciclone é alimentado com o material que não foi coletado pelo primeiro (*overflow* do primeiro ciclone), o terceiro é alimentado com o material que não foi coletado pelo segundo, e assim sucessivamente.

A partir dos objetivos específicos, e da integração entre os resultados experimentais obtidos na bancada e as análises realizadas por meio do software foi possível alcançar o objetivo geral do trabalho, que consistiu no dimensionamento de ciclones para a limpeza do gás de síntese no reator de gaseificação.

Os arranjos em série demonstraram o ganho progressivo de eficiência obtido com a separação sucessiva do particulado remanescente. A utilização de dois ciclones em série elevou a eficiência de coleta de 80,05% para 91,04%, enquanto a configuração com quatro ciclones em série alcançou 96,67% de eficiência,

demonstrando o potencial dos ciclones em série como uma solução para a limpeza do gás de síntese.

A adoção de arranjos com cinco ou mais ciclones em série não se mostrou viável neste estudo, em razão das limitações impostas pelo espaço interno disponível no reator. Dessa forma, considerando simultaneamente as restrições construtivas e operacionais e a busca pela maior eficiência de coleta possível com o uso de ciclones, o arranjo composto por quatro ciclones em série foi definido como a configuração mais adequada para o sistema analisado.

Trabalhos futuros podem ser realizados estudos considerando arranjos mais complexos, envolvendo combinações de ciclones em série e em paralelo, bem como a aplicação e validação dos modelos de eficiência utilizando cinzas reais provenientes do gaseificador, de modo a ampliar a representatividade e a aplicabilidade prática dos resultados obtidos.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7214**: areia normal para ensaio de cimento — especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ALEXANDER, R. M. Fundamentals of cyclone separators and operation. **Australasian Institute of Mining and Metallurgy**, n. 152-153, p. 203-228, 1949.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de biomassa**: uma análise teórica e experimental. 2007. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

BARTH, W. Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations. **Brennstoff-Wärme-Kraft**, v. 8, n. 1, 1956.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. <https://doi.org/10.1201/9781420005158>

BEENACKERS, A. A. C. M.; MANIATIS, K. Gas cleaning in electricity production via gasification of biomass: conclusions of the workshop. In: BRIDGEWATER, A. V. **Advances in thermochemical biomass conversion**. London: Blackie Academic & Professional, 1993. p. 540-548. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1336-6_41

BLEIER, F. P. **Fan handbook**: selection, application, and design. New York: McGraw-Hill, 1998.

CARDOSO, M. T. **Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas**: história técnica e econômica da gaseificação. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air pollution control**: a design approach. 4.ed. Long Grove: Waveland Press, 2011.

CORELLA, J.; AZNAR, M. P.; GIL, J. Biomass gasification in fluidized bed: where do we stand? **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 43, n. 15, p. 4085-4097, 2004.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

DIETZ, P. W. Collection efficiency of cyclone separators. **AIChE Journal**, v. 27, n. 6, p. 888-892, 1981. <https://doi.org/10.1002/aic.690270603>

HOFFMANN, A. C.; AREND, H.; SIE, H. An experimental investigation elucidating the nature of the effect of solids loading on cyclone performance. **Filtration and Separation**, p. 188-193, 1991. [https://doi.org/10.1016/0015-1882\(91\)80074-F](https://doi.org/10.1016/0015-1882(91)80074-F)

HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. **Gas cyclones and swirl tubes**: principles, design and operation. Berlin: Springer, 2008.

HOSS, J. J.; GROENEVELD, M. J. Biomass gasification. In: HALL, D. O.; OVEREND, R. P. Biomass: renewable energy. Chichester: John Wiley & Sons, 1987.

LAPPLE, C. E. Processes use many collector types. **Chemical Engineering**, p. 144-151, 1951.

LEITH, D.; LICHT, W. Collection efficiency of cyclone type particle collectors: a new theoretical approach. **AIChE Symposium Series**, v. 68, n. 126, p. 196-206, 1972.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2.ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: the state of the art overview. **Journal of Energy Chemistry**, v. 25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005>

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. **Perry's chemical engineers' handbook**. 8.ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

SCHEID, C. M. **Estudo da influência da concentração de sólidos e de sangrias no desempenho de ciclones a gás**. 1992. Dissertação (Mestrado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

STAIRMAND, C. J. The design and performance of cyclone separators. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 29, p. 356-383, 1951.

STEVENS, D. J. **Hot gas conditioning**: recent progress with larger-scale biomass gasification systems. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2001. <https://doi.org/10.2172/786288>

SWIFT, P. Dust control in industry. **Steam Heat Engineer**, v. 38, p. 453-456, 1969.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of air pollution**. 4.ed. London: Academic Press, 2008. <https://doi.org/10.1016/B978-012373615-4/50011-X>

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 7.ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

YAO, X.; XU, K.; LI, Y. Physicochemical properties and possible applications of waste corncob fly ash from biomass gasification industries of China. **BioResources**, Raleigh, v. 11, n. 2, p. 3783-3798, 2016. <https://doi.org/10.15376/biores.11.2.3783-3798>

7 APÊNDICE A – SOFTWARES DESENVOLVIDOS NA DISSERTAÇÃO

Programa melhor_geometria.m

```
% Função principal de comparação dos modelos de eficiência de ciclones
clc
clear all
% Define parâmetros de entrada fora do struct
Q_mass = 800;           % Vazão de gás [kg/h]
rho = 0.3288;           % Densidade do fluido [kg/m³]
Q = Q_mass/rho;         % Vazão de syngas [m³/h]
Q = Q / 3600;           % Vazão de ar [m³/s]
T = 800;                % Temperatura [°C]
rho_p = 2640;           % Densidade da partícula [kg/m³]
mu = 4.532e-5;          % Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]

% Distribuição granulométrica MATERIA PRIMA - CINZAS DE GASEIFICAÇÃO
Dp_um = [0.281135966, 0.335981829, 0.413141737, 0.473066942, 0.537836355, 0.594283686,
0.68048309, 0.801723784, 0.911490868, 1.021616564, 1.238452223, 1.408013475, 1.635393589,
1.846094252, 2.12898879, 2.508307663, 3.040689933, 3.531730989, 4.160974425, 4.937401584,
5.653559685, 6.427610264, 7.519015684, 8.249139895, 9.513233869, 11.04952613, 12.74274986,
15.44736787, 18.0703242, 20.10969912, 22.86299529, 25.08307663, 26.93646231, 29.133743,
31.28643196, 33.83855153, 35.82445289, 37.65749206, 38.19823917, 39.86751764, 41.02070272,
41.90742936, 43.11961977, 45.00396456];
mi = [0.089256198, 0.267768595, 0.416528926, 0.624793388, 0.981818182, 1.309090909,
1.517355372, 1.576859504, 1.45785124, 1.249586777, 1.100826446, 1.219834711, 1.398347107,
1.60661157, 1.933884298, 2.409917355, 2.945454545, 3.480991736, 4.016528926, 4.581818182,
5.325619835, 6.009917355, 6.575206612, 7.110743802, 7.616528926, 7.289256198, 7.051239669,
7.140495868, 7.497520661, 7.914049587, 8.27107438, 8.062809917, 7.58677686, 7.051239669,
6.485950413, 5.771900826, 4.938842975, 4.105785124, 3.391735537, 2.350413223, 1.695867769,
1.011570248, 0.476033058, 0.119008264];

%OVERFLOW DIETZ - RESULTADO DO PRIMEIRO ESTÁGIO
%Dp_um = [0.281135966000000, 0.335981829000000, 0.413141737000000, 0.473066942000000,
0.537836355000000, 0.594283686000000, 0.680483090000000, 0.801723784000000, 0.911490868000000,
1.021616564000000, 1.238452223000000, 1.408013475000000, 1.635393589000000, 1.846094252000000,
2.128988790000000, 2.508307663000000, 3.040689933000000, 3.531730989000000, 4.160974425000000,
4.937401584000000, 5.653559685000000, 6.427610264000000, 7.519015684000000, 8.249139895000000,
9.513233869000000, 11.0495261300000, 12.7427498600000, 15.4473678700000, 18.0703242000000,
20.1096991200000, 22.8629952900000, 25.0830766300000, 26.9364623100000, 29.1337430000000,
31.2864319600000, 33.8385515300000, 35.8244528900000, 37.6574920600000, 38.1982391700000,
39.8675176400000, 41.0207027200000, 41.9074293600000, 43.1196197700000, 45.0039645600000];
%mi = [0.000540832880538653, 0.00162249864767529, 0.00252388678796571, 0.00378583017588923,
0.00594916171016250, 0.00793221561153023, 0.00919415900551308, 0.00955471425920552,
0.00883360375182065, 0.00757166035783779, 0.00667027221754737, 0.00739138273099158,
0.00847304849206888, 0.00973499188605173, 0.0117180457934788, 0.0146024878290776,
0.0178474851244282, 0.0210924824258381, 0.0243374797211887, 0.0277627546433855,
0.0322696953327189, 0.0364160807623006, 0.0307370565063540, 0.0269095039810400,
0.0205340803171072, 0.0134527383646929, 0.00881666797912568, 0.00497205452687447,
0.00302171133109463, 0.00209345633807659, 0.00123470690602625, 0.000752647081576155,
0.000474686094765732, 0.000271353980174682, 0.000152879580691981, 7.45788824208401e-05,
3.93319064023271e-05, 2.06420730593171e-05, 1.48511030659629e-05, 6.66785956267530e-06,
3.54103454106467e-06, 1.66246197499281e-06, 5.60935609662841e-07, 8.25709051756776e-08];
```

```

%OVERFLOW LEITH - RESULTADO DO PRIMEIRO ESTÁGIO
%Dp_um = [0.281135966000000, 0.335981829000000, 0.413141737000000, 0.473066942000000,
0.537836355000000, 0.594283686000000, 0.680483090000000, 0.801723784000000, 0.911490868000000,
1.021616564000000, 1.238452223000000, 1.408013475000000, 1.635393589000000, 1.846094252000000,
2.128988790000000, 2.508307663000000, 3.040689933000000, 3.531730989000000, 4.160974425000000,
4.937401584000000, 5.653559685000000, 6.427610264000000, 7.519015684000000, 8.249139895000000,
9.513233869000000, 11.04952613000000, 12.74274986000000, 15.44736787000000, 18.07032420000000,
20.10969912000000, 22.86299529000000, 25.08307663000000, 26.93646231000000, 29.13374300000000,
31.28643196000000, 33.83855153000000, 35.82445289000000, 37.65749206000000, 38.19823917000000,
39.86751764000000, 41.02070272000000, 41.90742936000000, 43.11961977000000, 45.00396456000000];
%mi =[0.000472218647646047, 0.00139104954488856, 0.00211200624726397, 0.00311172434572073,
0.00479953131573023, 0.00629957649692257, 0.00713441907790475, 0.00718635967853679,
0.00646646674950072, 0.00539920012832509, 0.00452737438358739, 0.00483533989624171,
0.00528615259215991, 0.00582214824320446, 0.00663584908762076, 0.00771041383501872,
0.00858513035170751, 0.00934910004623376, 0.00975964153795523, 0.00989763339475870,
0.0103703501002341, 0.0105055221781702, 0.00993284664820403, 0.00977643590386718,
0.00894585172416001, 0.00712682794250863, 0.00568010619257821, 0.00428462253754974,
0.00342923822861008, 0.00295425544971203, 0.00236880794164732, 0.00187755784556715,
0.00149250546013222, 0.00114068317332242, 0.000869835324239485, 0.000622768025993783,
0.000451407298432678, 0.000322739774266577, 0.000255116682747634, 0.000154479279403571,
0.000101638969672560, 5.65048769565956e-05, 2.41673522039636e-05, 5.21591359948940e-06];

mi = mi / sum(mi);

%vetores para armazenar resultados
resultados = [];

% Loop de geometria
index = 1;
for Dc = 0.1:0.01:1
    for De = (0.4 * Dc):0.02:(0.75 * Dc)
        for Dd = (0.2 * Dc):0.05:(0.35 * Dc)
            for H = (0.5 * Dc):0.05:(0.8 * Dc)
                for W = (0.2 * Dc):0.05:(0.38 * Dc)
                    for S = (0.5 * Dc):0.05: (0.88 * Dc)
                        for Lb = (1.4 * Dc):0.05:(Dc * 2)
                            for Lc = (Dc * 2):0.05:(Dc * 2.5)
                                % Restrições

                                A_in = H * W;
                                A_out = pi * De^2 / 4;
                                V_in = Q / A_in;
                                V_out = Q / A_out;
                                V_max = max(V_in, V_out);
                                if ~(S < Lb && Lb <= Lc && De < 0.75*Dc && Dd < 0.4*Dc && H <
S && W < 0.38*Dc && V_in < 20 && V_in > 10 && H < Lb && Lb+Lc < 1.8)
                                    continue
                                end

                                % Define geometria
                                geom.Dc = Dc;
                                geom.De = De;
                                geom.Dd = Dd;

```

```

geom.H = H;
geom.W = W;
geom.S = S;
geom.Lb = Lb;
geom.Lc = Lc;

% Avalia todos os modelos
try
    [eta_leith, dpc_leith, ~] = modelo_leith(geom, Q, T,
rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);
    [eta_dietz, dpc_dietz, ~] = modelo_dietz(geom, Q, T,
rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);
    [eta_barth, dpc_barth, ~] = modelo_barth(geom, Q, T,
rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);
    [eta_lapple, dpc_lapple, ~] = modelo_lapple(geom, Q, T,
rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);

    DeltaP = dP_ciclone_perry(Q, rho, mu, geom, 0)

% Armazena resultados
resultados(index).geom = geom;
resultados(index).eta_leith = eta_leith;
resultados(index).eta_dietz = eta_dietz;
resultados(index).eta_barth = eta_barth;
resultados(index).eta_lapple = eta_lapple;
resultados(index).dpc_leith = dpc_leith;
resultados(index).dpc_dietz = dpc_dietz;
resultados(index).dpc_barth = dpc_barth;
resultados(index).dpc_lapple = dpc_lapple;
resultados(index).DeltaP = DeltaP;
index = index + 1;
catch
    % Ignora erros numéricos (ex: divisão por zero, etc.)
    continue
end

end
end
end
end
end
end
end

fprintf('Total de geometrias testadas: %d\n', index-1);

%Pós-processamento: tolerância adaptativa

if isempty(resultados)
    error('Nenhuma geometria válida foi avaliada.');
```

```

end

eta1 = [resultados.eta_leith];
eta2 = [resultados.eta_dietz];
eta3 = [resultados.eta_barth];

```

```

eta4 = [resultados.eta_lapple];

% Tolerância adaptativa
tol = 1e-4; % tolerância inicial
tolMax = 5; % tolerância máxima
fator = 1.01; % multiplica a tolerância a cada iteração

idx1234 = [];

max1 = max(eta1);
max2 = max(eta2);
max3 = max(eta3);
max4 = max(eta4);

while isempty(idx1234) && tol <= tolMax

    idx1 = find(eta1 >= max1 - tol);
    idx12 = idx1( eta2(idx1) >= max2 - tol );
    idx123 = idx12( eta3(idx12) >= max3 - tol );
    idx1234 = idx123( eta4(idx123) >= max4 - tol );

    if isempty(idx1234)
        tol = tol * fator;
    end
end

fprintf('\nSolução encontrada com tolerância tol = %.1e\n', tol);

% Critério de desempate: maior eficiência do Leith
[~, kbest] = max( eta1(idx1234) );
ibest = idx1234(kbest);

g = resultados(ibest).geom;

fprintf('\nGEOMETRIA SELECIONADA (cascata com tol adaptativa):\n');
fprintf('Dc=%.4f De=%.4f Dd=%.4f H=%.4f W=%.4f S=%.4f Lb=%.4f Lc=%.4f\n', ...
    g.Dc, g.De, g.Dd, g.H, g.W, g.S, g.Lb, g.Lc);

fprintf('eta_leith = %.6f (max=%.6f)\n', resultados(ibest).eta_leith, max1);
fprintf('eta_dietz = %.6f (max=%.6f)\n', resultados(ibest).eta_dietz, max2);
fprintf('eta_barth = %.6f (max=%.6f)\n', resultados(ibest).eta_barth, max3);
fprintf('eta_lapple = %.6f (max=%.6f)\n', resultados(ibest).eta_lapple, max4);

if isfield(resultados, 'DeltaP')
    fprintf('DeltaP = %.3f Pa\n', resultados(ibest).DeltaP);
end

if numel(idx1234) > 1
    fprintf('( %d candidatas; escolhida a de maior eta_leith.)\n', numel(idx1234));
end

```

Programa modelo_leith.m

```

function [eta_global, dpc, overflow, underflow] = modelo_leith(geom, Q, T, rho_p, rho, mu,
Dp_um, mi)

Dp = Dp_um * 1e-6;
x_i = mi / sum(mi);

A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

l = 2.3 * geom.De * (geom.Dc^2 / (geom.W * geom.H))^(1/3);
Ht = geom.Lb + geom.Lc;
Dcone = geom.Dc - ((geom.Dc - geom.Dd) * (geom.S + l - geom.Lb)) / (Ht - geom.Lb);

T_K = T + 273.15;
n = 1 - ((1 - 0.67 * geom.Dc^0.14) * (T_K / 283)^0.3);

Psi = (rho_p .* Dp.^2 * V_in * (n + 1)) ./ (18 * mu * geom.Dc);

C = (pi * geom.Dc^2) / (geom.H * geom.W) * ...
    (2 * (1 - (geom.De / geom.Dc)^2) * (geom.S / geom.Dc - geom.H / (2 * geom.Dc)) + ...
    (1/3) * ((geom.S + l - geom.Lb) / geom.Dc) * ...
    (1 + (Dcone / geom.Dc) + (Dcone / geom.Dc)^2) + ...
    (geom.Lb / geom.Dc) - (geom.De / geom.Dc)^2 * (l / geom.Dc) - (geom.S / geom.Dc));

eta_i = 1 - exp(-2 * (C .* Psi).^(1 / (2 * n + 2)));
eta_i = max(min(eta_i, 1), 0);

[eta_sort, idx] = sort(eta_i);
Dp_sort = Dp(idx);
[eta_unique, ia] = unique(eta_sort);
Dp_unique = Dp_sort(ia);

dpc = interp1(eta_unique, Dp_unique, 0.5, 'linear', 'extrap');

eta_global = sum(x_i .* eta_i);

overflow.Dp_um = Dp_um;
overflow.mi = mi .* (1 - eta_i);

underflow.Dp_um = Dp_um;
underflow.mi = mi .* (eta_i);
end

```

Programa modelo_lapple.m

```

function [eta_global, dpc, overflow, underflow] = modelo_lapple(geom, Q, T, rho_p, rho, mu,
Dp_um, mi)

Dp = Dp_um * 1e-6;
x_i = mi / sum(mi);
A_in = geom.H * geom.W;

```

```

V_in = Q / A_in;

A_out = (pi * geom.De^2 ) / 4;
V_out = Q / A_out;

V_max = max(V_in, V_out);

vel = [0.1954, 0.4857, 0.8664, 1.553, 2.233, 2.916, 3.599, 4.379, 5.355, 6.43,7.31, 8.19,
201.7, 10.25, 11.22, 12.5, 13.97, 15.34, 16.91, 18.58,19.86, 21.63, 23.69, 25.46, 27.62,
29.48, 31.15, 33.02, 35.38, 36.56,39.02, 42.36, 45.31, 48.17, 51.32, 54.56, 57.32, 60.18];

Ns_table = [0.04712, 0.2042, 0.4869, 0.7068, 0.9738, 1.178, 1.382, 1.618, 1.885, 2.12,2.325,
2.529, 2.733, 2.89, 3.079, 3.267, 3.456, 3.613, 3.785, 3.974,4.084, 4.241, 4.414, 4.586,
4.743, 4.869, 4.995, 5.136, 5.246, 5.325,5.466, 5.576, 5.686, 5.733, 5.812, 5.874, 5.937,
5.969];

Ns = interp1(vel, Ns_table, V_max, 'linear', 'extrap')

dpth = sqrt((9 * mu * geom.W) / (pi * Ns * V_in * (rho_p - rho)));

Dp_ratio = Dp / dpth;
eta_i = ((Dp / dpth).^2) ./ (1 + ((Dp / dpth).^2)); %%MASSARANI PG 53

eta_global = trapz(eta_i .* x_i);
dpc = dpth;

overflow.Dp_um = Dp_um;
overflow.mi = mi .* (1 - eta_i);

underflow.Dp_um = Dp_um;
underflow.mi = mi .* (eta_i);

end

```

Programa modelo_barth.m

```

function [eta_global, dpc, overflow, underflow] = modelo_barth(geom, Q, T, rho_p, rho, mu,
Dp_um, mi)

Dp = Dp_um * 1e-6;
x_i = mi / sum(mi);

A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

lambda = 0.02;
alpha = 1 - 1.2 * (geom.W / geom.Dc);

H_total = geom.Lb + geom.Lc;
if geom.De <= geom.Dd
    h_star = H_total - geom.S;
else
    h_star = ((H_total - geom.Lb) * (geom.Dc - geom.De) / (geom.Dc - geom.Dd)) + (geom.Lb -

```

```

geom.S);
end

v0 = V_in;
vt = v0 * ((geom.De/2)*(geom.Dc - geom.W)*pi) / ...
    (2 * geom.H * geom.W * alpha + h_star * (geom.Dc - geom.W) * lambda * pi);

vts_ratio = (pi * h_star .* vt.^2 .* rho_p .* Dp.^2) ./ (9 * mu * Q);
eta_i = 1 ./ (1 + (vts_ratio).^(-3.2));
eta_i = max(min(eta_i, 1), 0);

eta_global = sum(x_i .* eta_i);
dpc = interp1(eta_i, Dp, 0.5, 'linear', 'extrap');

overflow.Dp_um = Dp_um;
overflow.mi = mi .* (1 - eta_i);

underflow.Dp_um = Dp_um;
underflow.mi = mi .* (eta_i);

end

```

Programa modelo_dietz.m

```

function [eta_global, dpc, overflow, underflow] = modelo_dietz(geom, Q, T, rho_p, rho, mu,
Dp_um, mi)

Dp = Dp_um * 1e-6;
x_i = mi / sum(mi);
A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

l = 2.3 * geom.De * (geom.Dc^2 / (geom.W * geom.H))^(1/3);

T_K = T + 273.15;
n = 1 - ((1 - 0.67 * geom.Dc^0.14) * (T_K / 283)^0.3);

expoente = (pi * (2*geom.S - geom.H) .* rho_p .* Dp.^2 .* V_in) ./ (18 * mu * geom.H *
geom.W);

K0 = 0.5 * (1 + (geom.De / geom.Dc).^(2 * n)) .* ...
    (1 + (9 * mu * geom.H * geom.W) ./ (pi * rho_p * l .* Dp.^2 .* V_in));
K1 = 0.5 * (1 - (geom.De / geom.Dc).^(2 * n)) .* ...
    (1 + (9 * mu * geom.H * geom.W) ./ (pi * rho_p * l .* Dp.^2 .* V_in));
K2 = (geom.De / geom.Dc).^(2 * n);

eta_i = 1 - (K0 - sqrt(K1.^2 + K2)) .* exp(-expoente);
eta_i = max(min(eta_i, 1), 0);

eta_global = sum(x_i .* eta_i);

```

```

[eta_ord, idx_ord] = sort(eta_i);
Dp_ord = Dp(idx_ord);

% Remove valores duplicados de eta_ord
[eta_unique, unique_idx] = unique(eta_ord);
Dp_unique = Dp_ord(unique_idx);

% Interpola o d50 (diâmetro de corte) onde a eficiência é 50%
dpc = interp1(eta_unique, Dp_unique, 0.5, 'linear', 'extrap');

overflow.Dp_um = Dp_um;
overflow.mi = mi .* (1 - eta_i);

underflow.Dp_um = Dp_um;
underflow.mi = mi .* (eta_i);

end

```

Programa dP_ciclone_perry_.m

```

function [dP_total, comp] = dP_ciclone_perry(Q, rho, mu, geom, L)
    req = ["Dc", "De", "Dd", "H", "W", "S", "Lb", "Lc"];
    for n = 1:numel(req)
        if ~isfield(geom, req(n))
            error("Campo ausente em geom.%s", req(n));
        end
    end

    % Áreas
    A_in = geom.H * geom.W;           % entrada
    A_exit = pi*(geom.De^2)/4;        % tubo de saída
    A_c = pi*(geom.Dc^2)/4;           % seção do corpo cilíndrico

    v_in = Q / A_in;
    v_exit = Q / A_exit;
    v_c = Q / A_c;
    v_vessel = v_c;
    e = 5.186e-05;

    d_in = 4*geom.H*geom.W/(2*geom.H + 2*geom.W);

    Re = rho*v_in*d_in/mu;

    if Re < 2300
        f = 64/Re;
    else
        f = 0.25 / ( log10( e/(d_in*3.7) + 5.74/Re^0.9 ) )^2;
    end

    % K via tabela Perry (interpolação)

```

```

areaRatio = A_exit / A_c;

ar_tab = [0.0 0.1 0.2 0.3 0.4];
K_tab = [0.50 0.47 0.43 0.395 0.35];

areaRatio_clamped = min(max(areaRatio, min(ar_tab)), max(ar_tab));
K = interp1(ar_tab, K_tab, areaRatio_clamped, 'linear');

V_max = max(v_in, v_exit);
vel = [0.1954, 0.4857, 0.8664, 1.553, 2.233, 2.916, 3.599, 4.379, 5.355, 6.43, 7.31,
8.19, 201.7, 10.25, 11.22, 12.5, 13.97, 15.34, 16.91, 18.58, 19.86, 21.63, 23.69, 25.46, 27.62,
29.48, 31.15, 33.02, 35.38, 36.56, 39.02, 42.36, 45.31, 48.17, 51.32, 54.56, 57.32, 60.18];
Ns_table = [0.04712, 0.2042, 0.4869, 0.7068, 0.9738, 1.178, 1.382, 1.618, 1.885,
2.12, 2.325, 2.529, 2.733, 2.89, 3.079, 3.267, 3.456, 3.613, 3.785, 3.974, 4.084, 4.241, 4.414,
4.586, 4.743, 4.869, 4.995, 5.136, 5.246, 5.325, 5.466, 5.576, 5.686, 5.733, 5.812, 5.874,
5.937, 5.969];
Ns = interp1(vel, Ns_table, V_max, 'linear');

if isempty(L)
    L = 0;
end

comp.dP1 = 0.5*rho*(v_in^2 - v_vessel^2 + K*v_in^2);

comp.dP2 = L*v_in*(v_in-v_vessel);

comp.dP3 = (2*f*rho*(v_in^2)*pi*geom.Dc*Ns)/d_in;

comp.dP4 = rho*(v_in^2)/2;

comp.dP5 = 0.5*rho*(v_exit^2 - v_c^2 + K*v_exit^2);

dP_total = comp.dP1 + comp.dP2 + comp.dP3 + comp.dP4 + comp.dP5;

end

```

Programa comparação_areia_acumulada.m

```

clc
clear all
Q = 294 / 3600;           % Vazão de ar [m³/s]
T = 35;                   % Temperatura [°C]
%rho_p = 4537;            % Densidade da partícula OXIDO DE FERRO [kg/m³]
rho_p = 2640;             % Densidade da Areia
rho = 1.146;              % Densidade do fluido [kg/m³]
mu = 1.81e-5;             % Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]

% Geometria do ciclone

geom.Dc = 0.272;          % Diâmetro do corpo do ciclone [m]
geom.De = 0.1023;         % Diâmetro do tubo de saída [m]

```

```

geom.Dd = 0.099;      % Diâmetro da saída inferior [m]
geom.H = 0.09066;     % Altura da entrada retangular [m]
geom.W = 0.09066;     % Largura da entrada retangular [m]
geom.S = 0.13;        % Altura do tubo de saída [m]
geom.Lb = 0.385;      % Altura da parte cilíndrica [m]
geom.Lc = 0.635;      % Altura da parte cônica [m]

A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

% Distribuição granulométrica MATERIA PRIMA - AREIA
Dp_um = [0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262, 1.416, 1.589, 1.783, 2.000,
2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637, 6.325, 7.096, 7.962, 8.934,
10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440, 25.179, 28.251, 31.698,
35.566, 39.905, 44.774, 50.238, 56.368, 63.246, 70.963, 79.621, 89.337, 100.237, 112.468,
126.191, 141.589, 158.866, 178.250, 200.000, 224.404, 251.785, 282.508, 316.979, 355.656,
399.052, 447.744, 502.377, 563.677];
mi = [0.03, 0.06, 0.08, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.15, 0.16, 0.17, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20,
0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.28, 0.28, 0.29, 0.29, 0.29, 0.29, 0.28, 0.28,
0.28, 0.28, 0.30, 0.32, 0.35, 0.38, 0.40, 0.40, 0.37, 0.32, 0.24, 0.17, 0.14, 0.21, 0.44,
0.88, 1.58, 2.55, 3.74, 5.10, 6.47, 7.72, 8.67, 9.20, 9.23, 8.76, 7.81, 6.55, 5.05, 3.56,
2.33, 0.45];

mi_norm = mi / sum(mi);
acumulada = cumsum(mi_norm) * 100;

% Distribuição granulométrica da materia prima
figure;
semilogx(Dp_um, mi, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica - Areia', 'FontSize', 13);

% Distribuição granulométrica da materia prima - ACUMULADA
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica Acumulada - Areia', 'FontSize', 13);

% Chamada das funções
[eta_lapple, dpc_lapple, overflow_lapple, underflow_lapple] = modelo_lapple(geom, Q, T, rho_p,
rho, mu, Dp_um, mi);
[eta_barth, dpc_barth, overflow_barth, underflow_barth] = modelo_barth(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);
[eta_leith, dpc_leith, overflow_leith, underflow_leith] = modelo_leith(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);
[eta_dietz, dpc_dietz, overflow_dietz, underflow_dietz] = modelo_dietz(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);

% Exibição dos resultados
fprintf('\nResultados comparativos:\n');
fprintf('Modelo Lapple: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_lapple*100,

```

```
dpc_lapple*1e6);
fprintf('Modelo Barth: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_barth*100,
dpc_barth*1e6);
fprintf('Modelo Leith: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_leith*100,
dpc_leith*1e6);
fprintf('Modelo Dietz: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_dietz*100,
dpc_dietz*1e6);
```

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LAPPLE

```
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_lapple.mi/sum(overflow_lapple.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);%OVERFLOW
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.s',
'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Lapple - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;
```

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO Barth

```
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_barth.mi/sum(overflow_barth.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Barth - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;
```

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LEITH e LICHT

```
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_leith.mi/sum(overflow_leith.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
```

```

'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Leith e Licht - V_{in} = %.0f m/s',
V_in), 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO DIETZ
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_dietz.mi/sum(overflow_dietz.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Dietz - V_{in} = %.0f m/s', V_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

%COMPARAÇÃO DOS MODELOS: ENTRADA, UNDERFLOW LAPPLE, UNDERFLOW BARTH, UNDERFLOW LEITH,
UNDERFLOW DIETZ
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.x',
'DisplayName', 'Underflow Lapple', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LAPPLE
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow Barth', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW BARTH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.*', 'DisplayName',
'Underflow Leith e Licht', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LEITH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.diamond',
'DisplayName', 'Underflow Dietz', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW DIETZ
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Comparação dos Modelos - Areia - V_{in} = %.0f m/s', V_in), 'FontSize', 22,
'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

```

% COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

```
Dp_um3 = [0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262, 1.416, 1.589, 1.783, 2.000,
2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637, 6.325, 7.096, 7.962, 8.934,
10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440, 25.179, 28.251, 31.698,
35.566, 39.905, 44.774, 50.238, 56.368, 63.246, 70.963, 79.621, 89.337, 100.237, 112.468,
126.191, 141.589, 158.866, 178.250, 200.000, 224.404, 251.785, 282.508, 316.979, 355.656,
399.052, 447.744, 502.377, 563.677];
```

```
mi3 = [0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.16, 0.17, 0.17, 0.18, 0.19,
0.19, 0.20, 0.21, 0.23, 0.24, 0.26, 0.27, 0.29, 0.30, 0.31, 0.31, 0.31, 0.31, 0.30, 0.30,
0.31, 0.32, 0.34, 0.38, 0.42, 0.46, 0.50, 0.52, 0.51, 0.49, 0.45, 0.43, 0.45, 0.58, 0.86,
1.35, 2.07, 3.03, 4.16, 5.42, 6.64, 7.70, 8.46, 8.80, 8.67, 8.09, 7.10, 5.87, 4.46, 3.08,
1.85, 0.30];
```

```
Dp_um4 = [0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262, 1.416, 1.589, 1.783, 2.000, 2.244,
2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637, 6.325, 7.096, 7.962, 8.934, 10.024,
11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440, 25.179, 28.251, 31.698, 35.566,
39.905, 44.774, 50.238, 56.368, 63.246, 70.963, 79.621, 89.337, 100.237, 112.468, 126.191,
141.589, 158.866, 178.250, 200.000, 224.404, 251.785, 282.508, 316.979, 355.656, 399.052,
447.744, 502.377, 563.677];
```

```
mi4 = [0.03, 0.07, 0.09, 0.10, 0.11, 0.11, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12, 0.12,
0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.21, 0.20, 0.20, 0.20, 0.20, 0.21,
0.23, 0.26, 0.30, 0.35, 0.39, 0.42, 0.42, 0.40, 0.36, 0.32, 0.30, 0.35, 0.52, 0.86, 1.44,
2.25, 3.33, 4.56, 5.91, 7.18, 8.26, 8.99, 9.25, 9.01, 8.30, 7.18, 5.81, 4.33, 2.89, 1.42,
0.19];
```

```
Dp_um7 = [0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262, 1.416, 1.589, 1.783, 2.000,
2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637, 6.325, 7.096, 7.962, 8.934,
10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440, 25.179, 28.251, 31.698,
35.566, 39.905, 44.774, 50.238, 56.368, 63.246, 70.963, 79.621, 89.337, 100.237, 112.468,
126.191, 141.589, 158.866, 178.250, 200.000, 224.404, 251.785, 282.508, 316.979, 355.656,
399.052, 447.744, 502.377, 563.677];
```

```
mi7 = [0.01, 0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.11, 0.11, 0.12, 0.12, 0.13, 0.13, 0.13, 0.13, 0.14,
0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.24, 0.25, 0.25, 0.25, 0.26,
0.27, 0.28, 0.31, 0.34, 0.38, 0.41, 0.43, 0.43, 0.42, 0.39, 0.38, 0.40, 0.50, 0.73, 1.14,
1.77, 2.62, 3.69, 4.90, 6.17, 7.33, 8.26, 8.83, 8.95, 8.58, 7.80, 6.65, 5.33, 3.93, 2.57,
1.14, 0.13];
```

```
Dp_um8 = [0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262, 1.416, 1.589, 1.783, 2.000,
2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637, 6.325, 7.096, 7.962, 8.934,
10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440, 25.179, 28.251, 31.698,
35.566, 39.905, 44.774, 50.238, 56.368, 63.246, 70.963, 79.621, 89.337, 100.237, 112.468,
126.191, 141.589, 158.866, 178.250, 200.000, 224.404, 251.785, 282.508, 316.979, 355.656,
399.052, 447.744, 502.377, 563.677];
```

```
mi8 = [0.01, 0.05, 0.07, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.12, 0.13, 0.13, 0.14, 0.14, 0.14, 0.15,
0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.22, 0.23, 0.24, 0.24, 0.24, 0.24, 0.23, 0.23, 0.22,
0.23, 0.24, 0.26, 0.28, 0.31, 0.34, 0.35, 0.34, 0.29, 0.22, 0.11, 0.03, 0.03, 0.09, 0.35,
0.86, 1.62, 2.68, 3.95, 5.39, 6.81, 8.08, 9.01, 9.50, 9.46, 8.90, 7.86, 6.54, 5.01, 3.51,
2.29, 0.44];
```

%COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL X TEORICO AREIA

```
figure;
```

```
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
```

```

hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.x',
'DisplayName', 'Underflow Lapple', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LAPPLE
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow Barth', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW BARTH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.*', 'DisplayName',
'Underflow Leith e Licht', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LEITH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.diamond',
'DisplayName', 'Underflow Dietz', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW DIETZ
semilogx(Dp_um7, cumsum(mi7/sum(mi7))*100, '--', 'DisplayName', 'E-A-T350-V10', 'Linewidth',
1.5);
semilogx(Dp_um8, cumsum(mi8/sum(mi8))*100, '-.', 'DisplayName', 'E-A-T700-V10', 'Linewidth',
1.5);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Comparação dos Modelos - Areia - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22,
'Fontweight', 'bold');
xlim([0 120]);
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

```

Programa comparação_geometrias_oxido_ferro_acumulada.m

```

clc
clear all

Q = 454 / 3600;           % Vazão de ar [m³/s]
T = 35;                   % Temperatura [°C]
rho_p = 4537;             % Densidade da partícula OXIDO DE FERRO [kg/m³]
%rho_p = 2640;           % Densidade da Areia
rho = 1.146;              % Densidade do fluido [kg/m³]
mu = 1.81e-5;             % Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]

% Geometria do ciclone

geom.Dc = 0.272;          % Diâmetro do corpo do ciclone [m]
geom.De = 0.1023;         % Diâmetro do tubo de saída [m]
geom.Dd = 0.099;          % Diâmetro da saída inferior [m]
geom.H = 0.09066;         % Altura da entrada retangular [m]
geom.W = 0.09066;         % Largura da entrada retangular [m]
geom.S = 0.13;            % Altura do tubo de saída [m]
geom.Lb = 0.385;          % Altura da parte cilíndrica [m]
geom.Lc = 0.635;          % Altura da parte cônica [m]

A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

% Distribuição granulométrica MATERIA PRIMA - ÓXIDO DE FERRO
Dp_um = [0.356, 0.399, 0.448, 0.502, 0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262,

```

```

1.416, 1.589, 1.783, 2.000, 2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637,
6.325, 7.096, 7.962, 8.934, 10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440,
25.179, 28.251, 31.698, 35.566, 39.905];
mi = [0.17, 0.43, 0.75, 1.16, 1.65, 2.20, 2.79, 3.40, 3.99, 4.54, 4.99, 5.33, 5.51, 5.52,
5.36, 5.05, 4.63, 4.14, 3.64, 3.17, 2.77, 2.45, 2.22, 2.06, 1.96, 1.89, 1.84, 1.80, 1.76,
1.70, 1.64, 1.57, 1.49, 1.39, 1.28, 1.14, 0.96, 0.75, 0.50, 0.26, 0.10, 0.06];

mi_norm = mi / sum(mi);
acumulada = cumsum(mi_norm) * 100;

% Distribuição granulométrica da materia prima
figure;
semilogx(Dp_um, mi, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica - Óxido de ferro', 'FontSize', 13);

% Distribuição granulométrica da materia prima - ACUMULADA
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica Acumulada - Óxido de ferro', 'FontSize', 13);

% Chamada das funções
[eta_lapple, dpc_lapple, overflow_lapple, underflow_lapple] = modelo_lapple(geom, Q, T, rho_p,
rho, mu, Dp_um, mi);
[eta_barth, dpc_barth, overflow_barth, underflow_barth] = modelo_barth(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);
[eta_leith, dpc_leith, overflow_leith, underflow_leith] = modelo_leith(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);
[eta_dietz, dpc_dietz, overflow_dietz, underflow_dietz] = modelo_dietz(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);

% Exibição dos resultados
fprintf('\nResultados comparativos:\n');
fprintf('Modelo Lapple: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_lapple*100,
dpc_lapple*1e6);
fprintf('Modelo Barth: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_barth*100,
dpc_barth*1e6);
fprintf('Modelo Leith: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_leith*100,
dpc_leith*1e6);
fprintf('Modelo Dietz: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_dietz*100,
dpc_dietz*1e6);

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LAPPLE
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA

```

```

hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_lapple.mi/sum(overflow_lapple.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);%OVERFLOW
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.s',
'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Lapple - Óxido de ferro - V_{in} = %.0f
m/s', V_in), 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO Barth
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_barth.mi/sum(overflow_barth.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Barth - Óxido de ferro - V_{in} = %.0f
m/s', V_in), 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LEITH e LICHT
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_leith.mi/sum(overflow_leith.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Leith e Licht - Óxido de ferro - V_{in}
= %.0f m/s', V_in), 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

```

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO DIETZ

```
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_dietz.mi/sum(overflow_dietz.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (μm)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Dietz - Óxido de ferro - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22, 'FontWeight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;
```

%COMPARAÇÃO DOS MODELOS: ENTRADA, UNDERFLOW LAPPLE, UNDERFLOW BARTH, UNDERFLOW LEITH, UNDERFLOW DIETZ

```
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.s',
'DisplayName', 'Underflow - Modelo Lapple', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LAPPLE
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow - Modelo Barth', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW BARTH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow - Leith e Licht', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LEITH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow - Modelo Dietz', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW DIETZ
xlabel('Diâmetro das partículas (μm)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
title(sprintf('Comparação dos Modelos - Óxido de ferro - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'FontWeight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;
```

% COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

```
Dp_um1 = [0.356, 0.399, 0.448, 0.502, 0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262,
1.416, 1.589, 1.783, 2.000, 2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637,
6.325, 7.096, 7.962, 8.934, 10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440,
25.179, 28.251];
mi1 = [0.11, 0.23, 0.49, 0.75, 1.09, 1.48, 1.90, 2.35, 2.80, 3.23, 3.60, 3.91, 4.12, 4.22,
4.21, 4.10, 3.92, 3.70, 3.48, 3.30, 3.19, 3.17, 3.22, 3.33, 3.48, 3.62, 3.71, 3.71, 3.60,
3.37, 3.05, 2.65, 2.20, 1.75, 1.31, 0.91, 0.53, 0.21, 0.02];
```

```
Dp_um5 = [0.356, 0.399, 0.448, 0.502, 0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262,
1.416, 1.589, 1.783, 2.000, 2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637,
6.325, 7.096, 7.962, 8.934, 10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440,
25.179, 28.251, 31.698, 35.566, 39.905];
mi5 = [0.12, 0.31, 0.54, 0.83, 1.18, 1.56, 1.98, 2.42, 2.86, 3.28, 3.64, 3.94, 4.13, 4.22,
4.19, 4.05, 3.83, 3.56, 3.27, 3.02, 2.82, 2.70, 2.67, 2.73, 2.85, 3.00, 3.15, 3.25, 3.29,
3.23, 3.07, 2.83, 2.51, 2.14, 1.76, 1.41, 1.09, 0.83, 0.63, 0.47, 0.36, 0.23];
```

```
Dp_um6 = [0.356, 0.399, 0.448, 0.502, 0.564, 0.632, 0.710, 0.796, 0.893, 1.002, 1.125, 1.262,
1.416, 1.589, 1.783, 2.000, 2.244, 2.518, 2.825, 3.170, 3.557, 3.991, 4.477, 5.024, 5.637,
6.325, 7.096, 7.962, 8.934, 10.024, 11.247, 12.619, 14.159, 15.887, 17.825, 20.000, 22.440,
25.179, 28.251, 31.698, 35.566, 39.905];
mi6 = [0.10, 0.22, 0.46, 0.70, 1.03, 1.41, 1.83, 2.28, 2.74, 3.18, 3.57, 3.89, 4.10, 4.20,
4.16, 4.01, 3.76, 3.46, 3.16, 2.89, 2.69, 2.58, 2.56, 2.64, 2.78, 2.97, 3.16, 3.32, 3.41,
3.41, 3.30, 3.08, 2.77, 2.40, 1.97, 1.56, 1.18, 0.88, 0.65, 0.50, 0.40, 0.32];
```

```
%COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL X TEORICO ÓXIDO DE FERRO
```

```
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.x',
'DisplayName', 'Underflow Lapple', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LAPPLE
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow Barth', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW BARTH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.*', 'DisplayName',
'Underflow Leith e Licht', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LEITH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.diamond',
'DisplayName', 'Underflow Dietz', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW DIETZ
semilogx(Dp_um1, cumsum(mi1/sum(mi1))*100, '--', 'DisplayName', 'E-O-T35-V15', 'Linewidth',
1.5); %UNDERFLOW AMOSTRA
semilogx(Dp_um5, cumsum(mi6/sum(mi5))*100, '-.', 'DisplayName', 'E-O-T70-V15', 'Linewidth',
1.5); %UNDERFLOW AMOSTRA
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Comparação dos Modelos - Óxido de ferro - v_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location', 'northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;
```

Programa ciclone_gaseificacao_primeiro_estagio.m

```
clc
clear all
% Define parâmetros de entrada fora do struct
Q_mass = 800; % Vazão de gás [kg/h]
```

```

rho = 0.3288;           % Densidade do fluido [kg/m³]
Q = Q_mass/rho;         % Vazão de syngas [m³/h]
Q = Q / 3600;           % Vazão de ar [m³/s]
T = 800;                % Temperatura [°C]
rho_p = 2640;           % Densidade da partícula [kg/m³]
mu = 4.532e-5;          % Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]

% Geometria do ciclone

geom.Dc = 0.49;          % Diâmetro do corpo do ciclone [m]
geom.De = 0.2760;        % Diâmetro do tubo de saída [m]
geom.Dd = 0.1480;        % Diâmetro da saída inferior [m]
geom.H = 0.3450;         % Altura da entrada retangular [m]
geom.W = 0.0980;         % Largura da entrada retangular [m]
geom.S = 0.3950;         % Altura do tubo de saída [m]
geom.Lb = 0.7860;        % Altura da parte cilíndrica [m]
geom.Lc = 0.9800;        % Altura da parte cônica [m]

A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

% Distribuição granulométrica MATERIA PRIMA - CINZAS DE GASEIFICAÇÃO
Dp_um = [0.281135966, 0.335981829, 0.413141737, 0.473066942, 0.537836355, 0.594283686,
0.68048309, 0.801723784, 0.911490868, 1.021616564, 1.238452223, 1.408013475, 1.635393589,
1.846094252, 2.12898879, 2.508307663, 3.040689933, 3.531730989, 4.160974425, 4.937401584,
5.653559685, 6.427610264, 7.519015684, 8.249139895, 9.513233869, 11.04952613, 12.74274986,
15.44736787, 18.0703242, 20.10969912, 22.86299529, 25.08307663, 26.93646231, 29.133743,
31.28643196, 33.83855153, 35.82445289, 37.65749206, 38.19823917, 39.86751764, 41.02070272,
41.90742936, 43.11961977, 45.00396456];
mi = [0.089256198, 0.267768595, 0.416528926, 0.624793388, 0.981818182, 1.309090909,
1.517355372, 1.576859504, 1.45785124, 1.249586777, 1.100826446, 1.219834711, 1.398347107,
1.60661157, 1.933884298, 2.409917355, 2.945454545, 3.480991736, 4.016528926, 4.581818182,
5.325619835, 6.009917355, 6.575206612, 7.110743802, 7.616528926, 7.289256198, 7.051239669,
7.140495868, 7.497520661, 7.914049587, 8.27107438, 8.062809917, 7.58677686, 7.051239669,
6.485950413, 5.771900826, 4.938842975, 4.105785124, 3.391735537, 2.350413223, 1.695867769,
1.011570248, 0.476033058, 0.119008264];

mi = mi / sum(mi);
mi_norm = mi / sum(mi);          % Normaliza a distribuição
acumulada = cumsum(mi_norm) * 100; % Soma acumulada em %

% Distribuição granulométrica da materia prima
figure('Color','w');
semilogx(Dp_um, mi_norm*100, '-o', 'Linewidth', 2.5, 'MarkerSize', 6, 'MarkerFaceColor', 'k',
'Color', 'k');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 18, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Volume (%)', 'FontSize', 18);
title('Distribuição Granulométrica - Cinzas', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ax = gca;
ax.XScale = 'log';
ax.FontSize = 16;
ax.Fontweight = 'bold';
ax.Linewidth = 1.4;

```

```

ax.XMinorGrid = 'on';
ax.YMinorGrid = 'on';

ax.GridLineStyle = '-';
ax.MinorGridLineStyle = ':';

ax.GridAlpha = 0.6;
ax.MinorGridAlpha = 0.35;

grid on;

% Distribuição granulométrica da materia prima - ACUMULADA
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica Acumulada - Cinzas', 'FontSize', 13);

% Chamada das funções
[eta_lapple, dpc_lapple, overflow_lapple, underflow_lapple] = modelo_lapple(geom, Q, T, rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);
[eta_barth, dpc_barth, overflow_barth, underflow_barth] = modelo_barth(geom, Q, T, rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);
[eta_leith, dpc_leith, overflow_leith, underflow_leith] = modelo_leith(geom, Q, T, rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);
[eta_dietz, dpc_dietz, overflow_dietz, underflow_dietz] = modelo_dietz(geom, Q, T, rho_p, rho, mu, Dp_um, mi);

% Exibição dos resultados
fprintf('\nResultados comparativos:\n');
fprintf('Modelo Lapple: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_lapple*100, dpc_lapple*1e6);
fprintf('Modelo Barth: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_barth*100, dpc_barth*1e6);
fprintf('Modelo Leith: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_leith*100, dpc_leith*1e6);
fprintf('Modelo Dietz: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_dietz*100, dpc_dietz*1e6);

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LAPPLE
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_lapple.mi/sum(overflow_lapple.mi))*100, '--x', 'DisplayName', 'Overflow', 'Linewidth', 1.2); %OVERFLOW
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.s', 'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Lapple - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', V_in), 'FontSize',

```

```

22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO Barth
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_barth.mi/sum(overflow_barth.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Barth - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22,
'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LEITH e LICHT
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_leith.mi/sum(overflow_leith.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Leith e Licht - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO DIETZ
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_dietz.mi/sum(overflow_dietz.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'overflow', 'Linewidth', 1.2);

```

```

semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Dietz - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22,
'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

%COMPARAÇÃO DOS MODELOS: ENTRADA, UNDERFLOW LAPPLE, UNDERFLOW BARTH, UNDERFLOW LEITH,
UNDERFLOW DIETZ
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.x',
'DisplayName', 'Underflow Lapple', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LAPPLE
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow Barth', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW BARTH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.*', 'DisplayName',
'Underflow Leith e Licht', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LEITH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.diamond',
'DisplayName', 'Underflow Dietz', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW DIETZ
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Comparação dos Modelos - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LEITH e LICHT
figure;
semilogx(Dp_um, mi*100, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, overflow_leith.mi*100, '--x', 'DisplayName', 'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, underflow_leith.mi*100, '-.s', 'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Leith e Licht - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO Dietz

```

```

figure;
semilogx(Dp_um, mi*100, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, overflow_dietz.mi*100, '--x', 'DisplayName', 'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, underflow_dietz.mi*100, '-.s', 'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Fração mássica (%)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Dietz - Cinzas - 1º Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22,
'FontWeight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

scr = get(groot, 'ScreenSize'); % tamanho da tela
allFigs = findall(0, 'Type', 'figure');

for k = 1:length(allFigs)
    allFigs(k).WindowState = 'normal'; % garante que não está maximizada
    allFigs(k).Position = [scr(1) + scr(3)/2 ... % desloca para a metade direita
                           scr(2) ...
                           scr(3)/2 ... % largura = 50% da tela
                           scr(4)*0.9]; % altura total
endDp_um, mi)

Dp = Dp_um * 1e-6;
x_i = mi / sum(mi);
A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

A_out = (pi * geom.De^2) / 4;
V_out = Q / A_out;

V_max = max(V_in, V_out);

vel = [0.1954, 0.4857, 0.8664, 1.553, 2.233, 2.916, 3.599, 4.379, 5.355, 6.43, 7.31, 8.19,
201.7, 10.25, 11.22, 12.5, 13.97, 15.34, 16.91, 18.58, 19.86, 21.63, 23.69, 25.46, 27.62,
29.48, 31.15, 33.02, 35.38, 36.56, 39.02, 42.36, 45.31, 48.17, 51.32, 54.56, 57.32, 60.18];

Ns_table = [0.04712, 0.2042, 0.4869, 0.7068, 0.9738, 1.178, 1.382, 1.618, 1.885, 2.12, 2.325,
2.529, 2.733, 2.89, 3.079, 3.267, 3.456, 3.613, 3.785, 3.974, 4.084, 4.241, 4.414, 4.586,
4.743, 4.869, 4.995, 5.136, 5.246, 5.325, 5.466, 5.576, 5.686, 5.733, 5.812, 5.874, 5.937,
5.969];

Ns = interp1(vel, Ns_table, V_max, 'linear', 'extrap')

dpth = sqrt((9 * mu * geom.W) / (pi * Ns * V_in * (rho_p - rho)));

Dp_ratio = Dp / dpth;
eta_i = ((Dp / dpth).^2) ./ (1 + ((Dp / dpth).^2)); %%MASSARANI PG 53

eta_global = trapz(eta_i .* x_i);
dpc = dpth;

```

```

overflow.Dp_um = Dp_um;
overflow.mi = mi .* (1 - eta_i);

underflow.Dp_um = Dp_um;
underflow.mi = mi .* (eta_i);

```

Programa ciclone_gaseificacao_segundo_estagio.m

```

clc
clear all
% Define parâmetros de entrada fora do struct
Q_mass = 800;           % Vazão de gás [kg/h]
rho = 0.3288;           % Densidade do fluido [kg/m³]
Q = Q_mass/rho;         % Vazão de syngas [m³/h]
Q = Q / 3600;           % Vazão de ar [m³/s]
T = 800;                % Temperatura [°C]
rho_p = 2640;           % Densidade da partícula [kg/m³]
mu = 4.532e-5;          % Viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s]

% Geometria do ciclone

geom.Dc = 0.4900;       % Diâmetro do corpo do ciclone [m]
geom.De = 0.2960;       % Diâmetro do tubo de saída [m]
geom.Dd = 0.1480;       % Diâmetro da saída inferior [m]
geom.H = 0.3450;        % Altura da entrada retangular [m]
geom.W = 0.0980;        % Largura da entrada retangular [m]
geom.S = 0.3950;        % Altura do tubo de saída [m]
geom.Lb = 0.7860;       % Altura da parte cilíndrica [m]
geom.Lc = 0.9800;       % Altura da parte cônica [m]

A_in = geom.H * geom.W;
V_in = Q / A_in;

%OVERFLOW DIETZ - RESULTADO DO PRIMEIRO ESTÁGIO
%Dp_um = [0.281135966000000, 0.335981829000000, 0.413141737000000, 0.473066942000000,
0.537836355000000, 0.594283686000000, 0.680483090000000, 0.801723784000000, 0.911490868000000,
1.021616564000000, 1.238452223000000, 1.408013475000000, 1.635393589000000, 1.846094252000000,
2.128988790000000, 2.508307663000000, 3.040689933000000, 3.531730989000000, 4.160974425000000,
4.937401584000000, 5.653559685000000, 6.427610264000000, 7.519015684000000, 8.249139895000000,
9.513233869000000, 11.0495261300000, 12.7427498600000, 15.4473678700000, 18.0703242000000,
20.1096991200000, 22.8629952900000, 25.0830766300000, 26.9364623100000, 29.1337430000000,
31.2864319600000, 33.8385515300000, 35.8244528900000, 37.6574920600000, 38.1982391700000,
39.8675176400000, 41.0207027200000, 41.9074293600000, 43.1196197700000, 45.0039645600000];
%mi = [0.000540832880538653, 0.00162249864767529, 0.00252388678796571, 0.00378583017588923,
0.00594916171016250, 0.00793221561153023, 0.00919415900551308, 0.00955471425920552,
0.00883360375182065, 0.00757166035783779, 0.00667027221754737, 0.00739138273099158,
0.00847304849206888, 0.00973499188605173, 0.0117180457934788, 0.0146024878290776,
0.0178474851244282, 0.0210924824258381, 0.0243374797211887, 0.0277627546433855,
0.0322696953327189, 0.0364160807623006, 0.0307370565063540, 0.0269095039810400,
0.0205340803171072, 0.0134527383646929, 0.00881666797912568, 0.00497205452687447,

```

```

0.00302171133109463, 0.00209345633807659, 0.00123470690602625, 0.000752647081576155,
0.000474686094765732, 0.000271353980174682, 0.000152879580691981, 7.45788824208401e-05,
3.93319064023271e-05, 2.06420730593171e-05, 1.48511030659629e-05, 6.66785956267530e-06,
3.54103454106467e-06, 1.66246197499281e-06, 5.60935609662841e-07, 8.25709051756776e-08];

%OVERFLOW LEITH - RESULTADO DO PRIMEIRO ESTÁGIO
Dp_um = [0.281135966000000, 0.335981829000000, 0.413141737000000, 0.473066942000000,
0.537836355000000, 0.594283686000000, 0.680483090000000, 0.801723784000000, 0.911490868000000,
1.021616564000000, 1.238452223000000, 1.408013475000000, 1.635393589000000, 1.846094252000000,
2.128988790000000, 2.508307663000000, 3.040689933000000, 3.531730989000000, 4.160974425000000,
4.937401584000000, 5.653559685000000, 6.427610264000000, 7.519015684000000, 8.249139895000000,
9.513233869000000, 11.0495261300000, 12.7427498600000, 15.4473678700000, 18.0703242000000,
20.1096991200000, 22.8629952900000, 25.0830766300000, 26.9364623100000, 29.1337430000000,
31.2864319600000, 33.8385515300000, 35.8244528900000, 37.6574920600000, 38.1982391700000,
39.8675176400000, 41.0207027200000, 41.9074293600000, 43.1196197700000, 45.0039645600000];
mi =[0.000472218647646047, 0.00139104954488856, 0.00211200624726397, 0.00311172434572073,
0.00479953131573023, 0.00629957649692257, 0.00713441907790475, 0.00718635967853679,
0.00646646674950072, 0.00539920012832509, 0.00452737438358739, 0.00483533989624171,
0.00528615259215991, 0.00582214824320446, 0.00663584908762076, 0.00771041383501872,
0.00858513035170751, 0.00934910004623376, 0.00975964153795523, 0.00989763339475870,
0.0103703501002341, 0.0105055221781702, 0.00993284664820403, 0.00977643590386718,
0.00894585172416001, 0.00712682794250863, 0.00568010619257821, 0.00428462253754974,
0.00342923822861008, 0.00295425544971203, 0.00236880794164732, 0.00187755784556715,
0.00149250546013222, 0.00114068317332242, 0.000869835324239485, 0.000622768025993783,
0.000451407298432678, 0.000322739774266577, 0.000255116682747634, 0.000154479279403571,
0.000101638969672560, 5.65048769565956e-05, 2.41673522039636e-05, 5.21591359948940e-06];

mi_norm = mi / sum(mi); % Normaliza a distribuição
acumulada = cumsum(mi_norm) * 100; % Soma acumulada em %

% Distribuição granulométrica da materia prima
figure;
semilogx(Dp_um, mi*100, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica - Areia', 'FontSize', 13);

% Distribuição granulométrica da materia prima - ACUMULADA
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'Linewidth', 1.5, 'MarkerFaceColor', 'b');
grid on;
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 12);
ylabel('volume', 'FontSize', 12);
title('Distribuição Granulométrica Acumulada - Areia', 'FontSize', 13);

% Chamada das funções
[eta_lapple, dpc_lapple, overflow_lapple, underflow_lapple] = modelo_lapple(geom, Q, T, rho_p,
rho, mu, Dp_um, mi);
[eta_barth, dpc_barth, overflow_barth, underflow_barth] = modelo_barth(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);
[eta_leith, dpc_leith, overflow_leith, underflow_leith] = modelo_leith(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);
[eta_dietz, dpc_dietz, overflow_dietz, underflow_dietz] = modelo_dietz(geom, Q, T, rho_p, rho,
mu, Dp_um, mi);

```

```

% Exibição dos resultados
fprintf('\nResultados comparativos:\n');
fprintf('Modelo Lapple: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_lapple*100,
dpc_lapple*1e6);
fprintf('Modelo Barth: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_barth*100,
dpc_barth*1e6);
fprintf('Modelo Leith: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_leith*100,
dpc_leith*1e6);
fprintf('Modelo Dietz: Eficiência Global = %.2f%% | d50 = %.2f µm\n', eta_dietz*100,
dpc_dietz*1e6);

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LEITH e LICHT
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_leith.mi/sum(overflow_leith.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Leith e Licht - V_{in} = %.0f m/s',
V_in), 'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO DIETZ
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(overflow_dietz.mi/sum(overflow_dietz.mi))*100, '--x', 'DisplayName',
'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'Fontweight', 'bold');
title(sprintf('Entrada, Overflow e Underflow - Modelo Dietz - V_{in} = %.0f m/s', V_in),
'FontSize', 22, 'Fontweight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

%COMPARAÇÃO DOS MODELOS: ENTRADA, UNDERFLOW LAPPLE, UNDERFLOW BARTH, UNDERFLOW LEITH,

```

```

UNDERFLOW DIETZ
figure;
semilogx(Dp_um, acumulada, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_lapple.mi/sum(underflow_lapple.mi))*100, '-.x',
'DisplayName', 'Underflow Lapple', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LAPPLE
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_barth.mi/sum(underflow_barth.mi))*100, '-.s', 'DisplayName',
'Underflow Barth', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW BARTH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_leith.mi/sum(underflow_leith.mi))*100, '-.*', 'DisplayName',
'Underflow Leith e Licht', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW LEITH
semilogx(Dp_um, cumsum(underflow_dietz.mi/sum(underflow_dietz.mi))*100, '-.diamond',
'DisplayName', 'Underflow Dietz', 'Linewidth', 1.2); %UNDERFLOW DIETZ
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Fração mássica acumulada (%)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
title(sprintf('Comparação dos Modelos - Areia - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22,
'FontWeight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO LEITH e LICHT
figure;
semilogx(Dp_um, mi*100, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, overflow_leith.mi*100, '--x', 'DisplayName', 'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, underflow_leith.mi*100, '-.s', 'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Fração mássica (%)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Leith e Licht - Cinzas - 2° Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in),
'FontSize', 22, 'FontWeight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

% CURVAS: ENTRADA, UNDERFLOW E OVERFLOW - MODELO Dietz
figure;
semilogx(Dp_um, mi*100, '-o', 'DisplayName', 'Entrada', 'Linewidth', 1.3); %ENTRADA
hold on;
semilogx(Dp_um, overflow_dietz.mi*100, '--x', 'DisplayName', 'Overflow', 'Linewidth', 1.2);
semilogx(Dp_um, underflow_dietz.mi*100, '-.s', 'DisplayName', 'Underflow', 'Linewidth', 1.2);
xlabel('Diâmetro das partículas (µm)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
ylabel('Fração mássica (%)', 'FontSize', 20, 'FontWeight', 'bold');
title(sprintf('Modelo Dietz - Cinzas - 2° Estágio - V_{in} = %.0f m/s', v_in), 'FontSize', 22,
'FontWeight', 'bold');
% Legenda com fonte maior
lgd = legend('Location','northwest');
lgd.FontSize = 18;
grid on;
legend;

```