

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Giselle Marcelino de Lima

Desenvolvimento de um aplicativo híbrido para projetar equipamentos de separação sólido-
fluido no campo gravitacional e no campo centrífugo

Uberaba

2019

Giselle Marcelino de Lima

Desenvolvimento de um aplicativo híbrido para projetar equipamentos de separação sólido-
fluido no campo gravitacional e no campo centrífugo

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação do Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.
Orientadora: Profa. Dra. Kássia Graciele dos Santos.

Uberaba
2019

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

L698d Lima, Giselle Marcelino de
Desenvolvimento de um aplicativo híbrido para projetar equipamentos de separação sólido-fluido no campo gravitacional e no campo centrífugo / Giselle Marcelino de Lima. -- 2019.
171 f. : il., fig., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2019
Orientadora: Profa. Dra. Kássia Graciele dos Santos

1. Aplicativos móveis. 2. Aprendizagem. 3. Projeto de produto. 4. Engenharia - Estudo e ensino. I. Santos, Kássia Graciele dos. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 004.42

GISELLE MARCELINO DE LIMA

DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO HÍBRIDO PARA PROJETAR
EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-FLUIDO NO CAMPO
GRAVITACIONAL E NO CAMPO CENTRÍFUGO

Trabalho de conclusão apresentado ao
Programa de Mestrado Profissional em
Inovação Tecnológica da Universidade Federal
do Triângulo Mineiro, como requisito para
obtenção do título de mestre.

Uberaba, 19 de julho de 2019

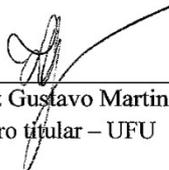
Banca Examinadora:



Prof. Dra. Kássia Graciele dos Santos
Orientadora – UFTM



Prof. Dr. José Luiz Vieira Neto
Membro Titular – UFTM



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Membro titular – UFU

AGRADECIMENTOS

Em algumas situações é difícil relacionar nomes de todas as pessoas a quem sou grata, mesmo assim irei relacionar os nomes que me recordo:

Agradeço primeiramente a Deus, que é o princípio e fim de todas as coisas, pela vida e por tudo e todos que dão alegria a minha vida.

Aos meus pais, irmãos e ao meu amor, Jihann, os quais sempre me incentivaram, deram força, amparo, compreensão e por serem a base do meu êxito. Sei que dizer “obrigado” a vocês, por tornarem esse sonho possível é muito pouco, mas peço que aceitem essas simples palavras, porém sinceras: Obrigado, amo muito vocês!

Aos meus amigos que tornaram essa caminhada mais alegre e menos árdua. A vocês, peço que entendam as várias ausências ao longo desse caminho, sem nunca deixarem de estar ao meu lado.

A minha orientadora, Professora Dr. Kássia Graciele dos Santos pelo incentivo, dedicação, ensinamentos, conhecimento compartilhado e pela oportunidade de realização deste trabalho.

Em especial, agradeço aos Professores Dr. Davi Leonardo de Souza e Dr. José Luiz Vieira Neto por contribuírem de forma incontestável na realização de melhorias no projeto.

RESUMO

Nos últimos anos, têm crescido os debates em torno da inclusão de novas tecnologias à educação, em especial, os dispositivos móveis. Esta tecnologia, quando incluída no processo de ensino-aprendizagem permite o acesso ao conhecimento independentemente do ambiente educacional físico e torna uma ferramenta interessante para a compreensão de conteúdos disciplinares. No contexto das operações unitárias, em especial as separações sólido-fluido, os acadêmicos de engenharias, apresentam barreiras devido aos conceitos e expressões matemáticas envolvidos nos métodos de projetos de equipamentos, impedindo o desenvolvimento da capacidade crítica do profissional. Em busca por alternativas, o presente trabalho propôs desenvolver um aplicativo móvel com o intuito de projetar câmaras de poeiras, centrífugas tubulares, ciclones, elutriadores, hidrociclones e sedimentadores contínuos. A fim de definir métodos e equações utilizados nos estudos desses equipamentos foram consultadas as literaturas mais empregadas no ensino de operações unitárias. A validação do aplicativo considerou 17 estudos de casos, obtendo um desvio médio em torno de 1,3%. Conclui-se que a inclusão desta tecnologia agrega valores ao ambiente universitário e possibilitar aos graduandos maior construção de conhecimento individual, além de proporcionar aos profissionais da área uma ferramenta ágil para a execução do seu trabalho.

Palavras chave: aplicativos móveis, aprendizagem móvel, projeto de produto, engenharia-estudo e ensino.

ABSTRACT

Recently, there has been growing discussion about the inclusion of new technologies in the education, especially of the mobile devices. This technology, when included in teaching-learning process allows access to knowledge regardless of the physical educational environment and makes it an interesting tool for understanding disciplinary contents. In the context of the unit operations of solid-fluid separations, engineering students have difficulties in mathematical concepts and assimilation of the equipment design methods preventing the development of the critical capacity of professional. In the search for alternatives, a mobile application is proposed to design dust chambers, tubular centrifuges, cyclones, elutriators, hydrocyclones and settlers. The methods and equations of these devices were based on the most used literatures in the teaching of unit operations. To validate the application, we considered 17 cases obtaining an average error of around 1.3%. It is concluded that the inclusion of this technology would increase values to the school environment and enables students to build more individual knowledge, while besides allowing area professionals to use the tool to assist in the execution of their job.

Key-words: Mobile apps, mobile learning, product design, engineering-study and teaching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo inicial de desenvolvimento de um aplicativo móvel.....	25
Figura 2 – Classificação dos equipamentos de centrífugas.	31
Figura 3 – Representação de uma centrífuga tubular.	32
Figura 4 – Representação de um ciclone convencional.....	34
Figura 5 – Representação esquemática simplificada do escoamento em um ciclone.	34
Figura 6 – Representação esquemática e simplificada no interior de um hidrociclone.	36
Figura 7 – Representação geométrica de hidrociclones.	37
Figura 8 – Câmara de poeira ou tanque de sedimentação gravitacional.	39
Figura 9 – Elutriador gravitacional típico.....	40
Figura 10 – Sistema de elutriadores em série.	41
Figura 11 – Representação esquemática de um sedimentador.	42
Figura 12 – Regiões características de um ensaio de proveta.	44
Figura 13 – Determinação de concentração e velocidade através do teste de proveta.....	45
Figura 14 – Trecho linear e exponencial do teste de proveta.	46
Figura 15 – Regiões de separação de altura de um sedimentador.	47
Figura 16 – Informações dos módulos contemplados no aplicativo.	49
Figura 17 – Organização estrutural dos módulos de equipamentos industriais.	50
Figura 18 – Páginas Inicial (a), Contatos (b), Sobre (c e d).	51
Figura 19 – Apresentação do Layout do módulo “Centrífuga”.....	52
Figura 20 – Objetivo principal do módulo Ciclone.....	55
Figura 21 – Apresentação do Layout do módulo “Ciclone”.	56
Figura 22 – Opções para determinação do diâmetro de corte para o módulo Ciclone.....	57
Figura 23 – Opções para determinação do diâmetro de corte para hidrociclone.	61
Figura 24 – Apresentação das funcionalidades do módulo "Câmara de Poeira".	67
Figura 25 – Funcionalidades apresentadas no módulo Elutriador.....	71
Figura 26 – Layout e identificações dos métodos aplicados ao módulo Sedimentador.....	75
Figura 27 – Recepção de informações para cálculo do diâmetro de corte (Caso 1).....	86
Figura 28 – Resultados de acordo com a opção diâmetro de corte (Caso 1).....	86
Figura 29 – Grade de eficiência de coleta (Caso 1).....	87
Figura 30 – Recepção de informações para cálculo do raio interno (Caso 2).	88
Figura 31 – Resultados de acordo com a opção de raio interno (Caso 2).	88
Figura 32 – Recepção de informações para cálculo de Scale Up (Caso 3).	89

Figura 33 – Resultados de acordo com o <i>Scale Up</i> do equipamento (Caso 3).....	90
Figura 34 – Recepção das informações para a configuração de ciclones Lapple (Caso 4).....	92
Figura 35 – Resultados de acordo com a configuração de ciclones Lapple (Caso 4).	93
Figura 36 – Recepção das informações para a configuração de ciclones Lapple (Caso 5).....	94
Figura 37 – Resultados de acordo com a configuração de ciclones Lapple (Caso 5).	94
Figura 38 – Recepção das informações para a configuração de ciclones Lapple (Caso 6).....	95
Figura 39 – Resultados de acordo com a configuração de ciclones Lapple (Caso 6).	96
Figura 40 – Condições iniciais para o módulo Hidrociclone (Caso 7).....	97
Figura 41 – Recepção das informações para configuração de hidrociclone Bradley (Caso 7).	98
Figura 42 – Resultados de acordo com o método de Massarani (2002) (Caso 7).	98
Figura 43 – Resultados de acordo com o método de Medronho (1984) (Caso 7).....	99
Figura 44 – Recepção de informações para análise da distribuição granulométrica (Caso 8).	100
Figura 45 – Resultados de acordo com o método de Antunes e Medronho (1992), (Caso 8).	101
Figura 46 – Recepção de informações para parâmetros de modelo RRB (Caso 9).....	102
Figura 47 – Resultado de acordo os parâmetros de modelo RRB (Caso 9).	102
Figura 48 – Recepção das informações para esfericidade das partículas (Caso 10).	104
Figura 49 – Resultados apresentados com a esfericidade das partículas (Caso 10).	104
Figura 50 – Recepção das informações para comprimentos das seções (Caso 11).....	105
Figura 51 – Resultados apresentados de acordo com o Caso 11.....	106
Figura 52 – Recepção das informações para a função faixa granulométrica (Caso 12).....	107
Figura 53 – Resultados de acordo com o Caso 12.....	108
Figura 54 – Recepção de informações para elutriadores em série (Caso 13).....	110
Figura 55 – Resultados de acordo a elutriação em série (Caso 13).....	110
Figura 56 – Recepção de informações da distribuição granulométrica (Caso 14).....	111
Figura 57 – Resultados de acordo como estudo de caso 14.	112
Figura 58 – Recepção de informações dos parâmetros de modelo Sigmóide (Caso 15).....	113
Figura 59 – Resultados apresentados de acordo com Caso 15.....	114
Figura 60 – Recepção das informações do módulo sedimentador (Caso 16).....	116
Figura 61 – Resultados de acordo com os métodos de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 16).	116
Figura 62 – Curva de sedimentação aplicada ao Método de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 16).	117
Figura 63 – Recepção das informações do módulo sedimentador (Caso 17).....	118
Figura 64 – Resultados de acordo com os métodos de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 17).....	118

Figura 65 – Curva de sedimentação aplicada ao Método de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 17).	119
Figura 66 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Câmara de Poeira.....	126
Figura 67 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Centrífuga.	127
Figura 68 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Ciclone.....	129
Figura 69 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Elutriador.	132
Figura 70 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Hidrociclone.	134
Figura 71 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Sedimentador.	137
Figura 72 – Representação do módulo de Conversão de Unidades para vazão.	141
Figura 73 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 1.....	142
Figura 74 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 2.....	143
Figura 75 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 3.....	144
Figura 76 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 4.....	145
Figura 77 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 5.....	147
Figura 78 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 6.....	149
Figura 79 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 7.....	151
Figura 80 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 8.....	153
Figura 81 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 9.....	155
Figura 82 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 10.....	156
Figura 83 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 11.....	157
Figura 84 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 12.....	159
Figura 85 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 13.....	161
Figura 86 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 14.....	162
Figura 87 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 15.....	164
Figura 88 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 16.....	165
Figura 89 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 17.....	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais sistemas operacionais, linguagens e IDEs recomendadas.	26
Tabela 2 – Configuração de ciclones Lapple e Stairmand.	35
Tabela 3 – Configuração de hidrociclones Rietema e Bradley.	36
Tabela 4 – Fluidodinâmica de partícula isométrica isolada.	42
Tabela 5 – Configurações e parâmetros para ciclones Lapple e Stairmand.	59
Tabela 6 – Parâmetros de configuração de hidrociclones Bradley e Rietema.....	63
Tabela 7 – Parâmetros equacionais para configuração Bradley e Rietema.....	65
Tabela 8 – Distribuição granulométrica para Caso 5.	81
Tabela 9 – Distribuição granulométrica para Caso 7.	81
Tabela 10 – Distribuição granulométrica para Caso 8.	82
Tabela 11 – Informações dos elutriadores em série.	83
Tabela 12 – Distribuição granulométrica (Caso 14).....	84
Tabela 13 – Ensaio de proveta para casos 16 e 17.	84
Tabela 14 – Resultados apresentados por Cremasco (2014) para o Caso 3.	90
Tabela 15 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Centrífuga”.....	91
Tabela 16 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Ciclone”.	96
Tabela 17 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Hidrociclone”.....	103
Tabela 18 – Resultados obtidos por Massarani (2002) para o Caso 12.....	107
Tabela 19 – Apresentação das faixas granulométricas (Caso 12).	108
Tabela 20 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Câmara de poeira”.....	109
Tabela 21 – Informações e resultados para a elutriação de um pó industrial (Caso 13).	111
Tabela 22 – Resultados apresentado por Massarani (2002) e pelo aplicativo (Caso 14).	113
Tabela 23 – Resumo dos casos apresentados no módulo Elutriador.....	115
Tabela 24 – Resumo dos casos apresentados no módulo Sedimentador.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Coefficiente angular	[-]
A	Parâmetro para hidrociclone	[-]
A_{\min}	Área mínima de um sedimentador	[L ²]
B	Parâmetro para hidrociclone	[-]
B	Base da câmara de poeira	[L]
B	Coefficiente linear	[-]
B_c	Comprimento do duto de alimentação de um ciclone	[L]
C	Parâmetro para hidrociclone	[-]
C_A	Concentração mássica de alimentação	[ML ⁻³]
C_i	Concentração da zona limite	[ML ⁻³]
C_E	Concentração mássica da lama espessada	[ML ⁻³]
C_L	Concentração mássica do lodo	[ML ⁻³]
C_v	Concentração volumétrica de alimentação	[L ³ L ⁻³]
C_{vu}	Concentração volumétrica no <i>underflow</i>	[L ³ L ⁻³]
C_u	Concentração volumétrica no <i>underflow</i>	[L ³ L ⁻³]
C_D	Coefficiente de Arraste das partículas	[-]
D	Diâmetro do equipamento	[L]
D'	Parâmetro do modelo Sigmóide	[L]
D_c	Diâmetro cilíndrico	[L]
D_i	Diâmetro do duto de alimentação de um hidrociclone	[L]
D_{\min}	Diâmetro mínimo	[L]
D_{\max}	Diâmetro máximo das partículas	[L]
D_p	Diâmetro médio das partículas	[L]
d_{Stokes}	Diâmetro de Stokes	[L]
D_o	Diâmetro do tubo <i>overflow</i>	[L]
D_u	Diâmetro do orifício do <i>underflow</i>	[L]
D^*	Diâmetro de corte das partículas	[L]
E_{global}	Eficiência global de coleta de partículas no hidrociclone	[-]
E_i	Eficiência individual de coleta de partículas de hidrociclone	[-]
Eu	Número de Euler	[-]
g	Aceleração da gravidade	[LT ⁻²]

H	Altura do equipamento	[L]
H _c	Altura do duto de alimentação de um ciclone	[L]
H ₁	Altura da região de líquido clarificado	[L]
H ₂	Altura da região de espessamento	[L]
H ₃	Altura da região de compactação do sedimentador	[L]
I	Eficiência individual de coleta de partículas	[-]
k	Parâmetro do modelo de distribuição granulométrica	[L]
K	Parâmetro de ciclones e hidrociclones	[-]
K ₁	Parâmetro de correlação de Coelho e Massarani (1996)	[-]
K ₂	Parâmetro de correlação de Coelho e Massarani (1996)	[-]
k ₁	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
k ₂	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
k ₃	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
L	Altura total do equipamento	[L]
L _c	Altura da região cilíndrica de um ciclone	[L]
L _i	Largura de cada seção da câmara de poeira	[L]
L ₁	Altura da região cilíndrica do hidrociclone	[L]
L ₂	Altura do <i>vortex finder</i>	[L]
M _{molar}	Massa molar do fluido	[M mol ⁻¹]
massa _{recolhida}	Massa recolhida em cada elutriador	[M]
massa _{total}	Massa total recolhida em todos os elutriadores	[M]
n	Parâmetro do modelo de distribuição granulométrica	[-]
n ₁	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
n ₂	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
n ₃	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
n ₄	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
n ₅	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
n ₆	Parâmetros para equação de hidrociclone	[-]
N _{ciclone}	Número de ciclones unidos paralelamente	[-]
N _{hidrociclone}	Número de Hidrociclones unidos paralelamente	[-]
p	Parâmetro do modelo Sigmóide	[-]
P	Pressão do fluido	[ML ⁻¹ T ⁻²]
Proporção	Proporção de partículas sólidas	[-]

Q	Vazão volumétrica de projeto	$[L^3T^{-1}]$
$Q_{proj.}$	Vazão volumétrica de projeto	$[L^3T^{-1}]$
Q_A	Vazão volumétrica de alimentação	$[L^3T^{-1}]$
$(Q_A/S)_{proj}$	Capacidade de projeto	$[LT^{-1}]$
R	Constante dos gases ideais	$[ML^2T^{-2}mol^{-1}\theta^{-1}]$
Re	Número de Reynolds	[-]
R_{int}	Raio interno da centrífuga	[L]
R_L	Razão de líquido	[-]
R^2	Variância	[-]
R_0	Raio de alimentação de suspensão da centrífuga	[L]
S	Área da seção transversal do equipamento	$[L^2]$
S_c	Comprimento do <i>vortex finder</i> de um ciclone	[L]
S_i	Área da seção transversal em cada instante de tempo	$[L^2]$
Stk*	Número de Stokes	[-]
T	Temperatura	$[\theta]$
t_c	Tempo crítico	[T]
t_i	Tempo em cada instante	[T]
t_R	Tempo para atingir a concentração uniforme	[T]
t^*	Tempo de residência médio dos sólidos	[T]
U	Velocidade de projeto	$[LT^{-1}]$
u_c	Velocidade Operacional	$[LT^{-1}]$
v	Velocidade de descida da interface	$[LT^{-1}]$
v_i	Velocidade de descida em cada instante de tempo	$[LT^{-1}]$
v_t	Velocidade terminal	$[LT^{-1}]$
X_i	Função de distribuição granulométrica	[-]
Z_c	Altura da região cônica de um ciclone	[L]
Z_i	Altura em cada instante de tempo	[L]
Z_{Li}	Altura da interface de líquido clarificado-sedimento	[L]
Z_0	Altura inicial do ensaio de proveta	[L]
X_{mat}	Fração mássica dos materiais sólidos	$[MM^{-1}]$

Símbolos Gregos

β	Número de Euler	[-]
ϕ	Esfericidade das partículas	[-]
μ	Viscosidade do fluido	[ML ⁻¹ T ⁻¹]
ω	Velocidade rotacional	[T ⁻¹]
ρ_{esp}	Massa específica da água	[ML ⁻³]
ρ_f	Massa específica do fluido	[ML ⁻³]
ρ_s	Massa específica do sólido	[ML ⁻³]
Σ	Fator Sigma	[L ²]
θ	Ângulo de tronco cônico de um hidrociclone	[°]
η	Eficiência global de coleta de partículas	[-]
$-\Delta P$	Queda de pressão	[ML ⁻¹ T ⁻²]
ε	Eficiência elétrica de um motor	[-]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 REFERENCIAL TEÓRICO	21
3.1 O CENÁRIO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS.....	21
3.2 APLICATIVOS MÓVEIS.....	23
3.2.1 Dispositivos móveis, sistemas operacionais e repositórios de aplicativos.....	23
3.2.2 Desenvolvimento de aplicativos móveis	24
3.2.2.1 <i>Aplicações Nativas</i>	25
3.2.2.2 <i>Web Apps</i>	26
3.2.2.3 <i>Aplicações Híbridas</i>	27
3.2.3 Frameworks para desenvolvimento de aplicativos híbridos.....	28
3.2.3.1 <i>Apache Cordova</i>	28
3.2.3.2 <i>AngularJs</i>	29
3.2.3.3 <i>Ionic Framework</i>	29
3.3 OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO	30
3.3.1 Centrífugas tubulares.....	31
3.3.2 Ciclones.....	33
3.3.3 Hidrociclones.....	35
3.3.4 Câmaras de poeira e Tanques de areia.....	38
3.3.5 Elutriadores.....	39
3.3.6 Sedimentadores.....	42
3.3.6.1 <i>Método de Kynch</i>	44
3.3.6.2 <i>Método Biscaia Jr</i>	46
3.3.6.3 <i>Altura do sedimentador</i>	47
4 MÉTODOS.....	48
4.1 MÓDULO CENTRÍFUGA	52
4.2 MÓDULO CICLONE	55
4.3 MÓDULO HIDROCICLONE.....	60
4.3.1 Proposta apresentada por Massarani (2002)	62

4.3.2 Proposta de Medronho (1984) e Antunes e Medronho (1992)	64
4.4 MÓDULO CÂMARA DE POEIRA	66
4.4.1 Desenvolvimento de cálculos para determinação da esfericidade das partículas, diâmetro da menor partícula retida ou a faixa granulométrica	67
4.4.2 Desenvolvimento de cálculos para determinação das dimensões da câmara de poeira e dos seus compartimentos	69
4.5 MÓDULO ELUTRIADOR	70
4.6 MÓDULO SEDIMENTADOR	74
4.6.1 Método de Kynch	75
4.6.2 Método de Biscaia Jr.	76
4.6.3 Estimativa da altura do sedimentador	78
4.7 MÓDULO DE CONVERSÃO DE UNIDADES	78
4.8 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO APLICATIVO “PEIQ”	79
4.8.1 Módulo Centrífuga	79
4.8.1.1 <i>Caso 1: Diâmetro de corte</i>	79
4.8.1.2 <i>Caso 2: Raio interno da centrífuga</i>	79
4.8.1.3 <i>Caso 3: Scale Up de centrífugas</i>	80
4.8.2 Módulo Ciclone	80
4.8.2.1 <i>Caso 4: Ciclone Lapple a partir do tamanho médio das partículas</i>	80
4.8.2.2 <i>Caso 5: Ciclone Lapple a partir da distribuição granulométrica</i>	80
4.8.2.3 <i>Caso 6: Ciclone Lapple a partir dos parâmetros do modelo RRB</i>	81
4.8.3 Módulo Hidrociclone	81
4.8.3.1 <i>Caso 7: Hidrociclone Bradley a partir da análise granulométrica</i>	81
4.8.3.2 <i>Caso 8: Hidrociclone Rietema a partir da análise granulométrica</i>	81
4.8.3.3 <i>Caso 9: Hidrociclone Rietema a partir dos parâmetros do modelo RRB</i>	82
4.8.4 Módulo Câmara de Poeira	82
4.8.3.1 <i>Caso 10: Esfericidade das partículas</i>	82
4.8.3.2 <i>Caso 11: Dimensões das seções de uma câmara de poeira</i>	82
4.8.3.3 <i>Caso 12: Faixa granulométrica</i>	83
4.8.4 Módulo Elutriador	83
4.8.3.1 <i>Caso 13: Elutriadores em série</i>	83
4.8.3.2 <i>Caso 14: Distribuição Granulométrica</i>	83
4.8.3.3 <i>Caso 15: Parâmetros do Modelo Sigmóide</i>	84
4.8.4 Módulo Sedimentador	84

4.8.3.1 Caso 16: Análise Comparativa da aplicação do Método de Biscaia Jr. e Kynch	84
4.8.3.2 Caso 17: Análise Comparativa da aplicação do Método de Biscaia Jr. e Kynch	84
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
5.1 MÓDULO CENTRÍFUGA	85
5.1.1 Caso 1: Diâmetro de corte.....	85
5.1.2 Caso 2: Raio interno da centrífuga	87
5.1.3 Caso 3: <i>Scale Up</i> de centrífugas	89
5.2 MÓDULO CICLONE	91
5.2.1 Caso 4: Ciclone Lapple a partir do tamanho das partículas	91
5.2.2 Caso 5: Ciclone Lapple a partir da análise da distribuição granulométrica	93
5.2.3 Caso 6: Ciclone Lapple a partir dos parâmetros do modelo RRB.....	95
5.3 MÓDULO HIDROCICLONE.....	97
5.3.1 Caso 7: Hidrociclone Bradley a partir da análise granulométrica	97
5.3.2 Caso 8: Hidrociclone Rietema a partir da análise granulométrica.....	100
5.3.3 Caso 9: Hidrociclone Rietema a partir dos parâmetros do modelo RRB	101
5.4 MÓDULO CÂMARA DE POEIRA	103
5.4.1 Caso 10: Esfericidade das partículas	103
5.4.2 Caso 11: Dimensões das seções de uma câmara de poeira.....	105
5.4.3 Caso 12: Faixa granulométrica	107
5.5 MÓDULO ELUTRIADOR	109
5.5.1 Caso 13: Elutriadores em série.....	109
5.5.2 Caso 14: Distribuição granulométrica	111
5.5.3 Caso 15: Parâmetros do modelo Sigmóide.....	113
5.6 MÓDULO SEDIMENTADOR	115
5.6.1 Caso 16: Parâmetros Análise comparativa da aplicação do método de Biscaia Jr. e Kynch.....	115
5.6.2 Caso 17: Parâmetros Análise comparativa da aplicação do método de Biscaia Jr e Kynch.....	117
6 CONCLUSÕES.....	120
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS	122
APÊNDICE A	126
APÊNDICE B.....	141
APÊNDICE C	142

ANEXO II.....	170
ANEXO III.....	171
ANEXO IV	172

1 INTRODUÇÃO

Sem dúvida, os avanços tecnológicos estão cada vez mais presentes na sociedade e é notório a rapidez com que as pessoas tornam dependentes de algum tipo de tecnologia, seja para uso pessoal, entretenimento, ou para fins profissionais, científicos e educacionais.

Dentre as tecnologias que mais se destacam, estão os dispositivos móveis, como *smartphones*, *tablets* e telefones com acesso à internet. Estes dispositivos aliam o alcance rápido a funcionalidades de acesso a qualquer momento e lugar e a facilidade de disseminar e compartilhar informações.

Aproveitando dessas características, o sistema educacional tem buscado sua inserção como um instrumento para promover e potencializar o entendimento além de melhor compreender os conteúdos disciplinares, influenciando na formação profissional de alunos (SILVA *et al.*, 2017).

No âmbito de formação de um engenheiro químico, Cremasco (2005) pontua entre outras competências, que este profissional deve praticar os conceitos matemáticos, científicos e tecnológicos; compreender, desenvolver e avaliar sistemas, processos e produtos; distinguir, apresentar e resolver problemas relacionados à área de formação. Mas, para que isso ocorra, o profissional deve se adaptar as constantes mudanças, ser capaz de captar e propor novas tecnologias, estimulando a sua atuação crítica e criativa na resolução de problemas.

De encontro a essas competências, o processo de ensino-aprendizagem na graduação de engenharia química precisa evoluir de forma a melhorar a capacitação dos alunos e ampliar as possibilidades de desenvolvimento de novos conhecimentos. Neste sentido, a utilização da tecnologia pode diversificar a maneira de prover conteúdos disciplinares, como por exemplo, nos cursos de operações unitárias através de alternativas mais práticas para conhecer, projetar, desenvolver e avaliar equipamentos da indústria química (CREMASCO, 2005).

As operações unitárias são muito comuns nos processos industriais, portanto, de grande importância na atuação do engenheiro químico. Por isso, seu estudo requer muita dedicação já que envolve a modelagem matemática e o uso de métodos iterativos tornando sua compreensão mais trabalhosa (GREPINO; RODRIGUES, 2015). A utilização apenas de métodos convencionais de ensino, com a atuação passiva dos alunos, aulas expositivas e métodos avaliativos que visam somente a memorização de equações matemáticas, não tem gerado o conhecimento adequado e tão pouco despertado o interesse dos alunos (SILVA *et al.*, 2017).

Neste cenário e com aumento crescente nas vendas de dispositivos móveis, a área de desenvolvimento de aplicativos direcionados à educação tornou-se desafiante e promissora, principalmente no ensino das operações unitárias.

De modo a superar as dificuldades acadêmicas e possibilitar aos alunos e profissionais de engenharia química o acesso rápido a uma ferramenta computacional, propôs-se neste trabalho o desenvolvimento de um aplicativo móvel direcionado a projetos de equipamentos de separação sólido-fluido presentes na indústria química.

A estrutura deste aplicativo possibilita aos usuários condições de obter o dimensionamento de separadores gravitacionais, como a câmara de poeira, elutriadores, sedimentadores e de separadores centrífugos, caso das centrífugas tubulares, ciclones, hidrociclones. Assim, esta ferramenta auxilia não só os alunos durante a aprendizagem, mas também aos profissionais da área que tem uma ferramenta coadjuvante para avaliação destes equipamentos.

O aplicativo foi nomeado como “Projetando Equipamentos da Indústria Química (PEIQ)” e os conceitos para seu desenvolvimento serão apresentados nas próximas seções.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é o desenvolvimento um aplicativo híbrido utilizando em conjunto os *frameworks Ionic*, *Apache Cordova* e *AngularJs* para proporcionar aos acadêmicos de engenharia química e profissionais da área, o estudo de projetos de equipamentos industriais envolvidos na separação de sólido em meio ao fluido no campo gravitacional e centrífugo. Os equipamentos abordados foram câmeras de poeira, elutriadores, sedimentadores, centrífugas tubulares, ciclones e hidrociclones.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Apresentar um estudo do cenário da inclusão da tecnologia na educação e o uso de ferramentas móveis no ensino;
- ii. Pesquisar uma tecnologia de desenvolvimento rápido, fácil de compreender e que atenda a diferentes plataformas;

- iii. Possibilitar a utilização em qualquer momento e lugar de uma ferramenta computacional desenvolvida para aparelhos celulares com plataforma Android;
- iv. Oferecer à comunidade acadêmica (professores e aluno), e profissional da área, uma solução gratuita que possa auxiliar no dia a dia das salas de aulas e trabalhos profissionais de projetos de equipamentos de separação sólido-fluido na indústria;
- v. Compreender e demonstrar os principais conceitos, variáveis de controle e condições operacionais envolvidos nos equipamentos contemplados pelo aplicativo, através de pesquisas bibliográficas em livros didáticos, artigos e publicações em geral;
- vi. Comparar os resultados propostos em material didático da disciplina de operações unitárias referentes aos equipamentos abordados com os resultados apresentados no aplicativo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O CENÁRIO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS

O termo “operações unitárias” foi originado em 1915 por Arthur Dehon Little para preferir a conceituação de processos físicos ou processos químicos reacionais (PEÇANHA, 2014). Com o passar do tempo, este conceito foi evoluindo e passou a envolver a transferência de matéria, calor e movimento, contemplando diversos equipamentos e acessórios industriais e uma série de equações matemáticas complexas (FOUST *et al.*, 1982). Apesar do termo ter sido desenvolvido para a engenharia química, atualmente essas operações fazem parte do currículo de muitos cursos superiores e profissionais nas áreas de engenharia, incluindo engenharia de processos, de alimentos, ambiental, de segurança do trabalho, de petróleo e de produção (PEÇANHA, 2014).

Nesse contexto, o estudo das operações unitárias tem sido considerado pelos alunos como uma disciplina complexa, uma vez que aborda o conjunto de etapas e processos de transformações de matérias-primas em produto final nas indústrias (SILVA; SOBREIRA, 2016). Dentre os processos contemplados estão os equipamentos que promovem a troca de calor, massa, umidade e as separações de misturas homogêneas e heterogêneas.

Como a principal fonte de atuação dos profissionais de engenharia química são as indústrias, é imprescindível que os alunos tenham ampla compreensão dos assuntos abordados nos cursos de operações unitárias, em destaque os processos de separação de misturas heterogêneas que serão abordados na seção 3.3.

Na maioria dos cursos superiores, o ensino predominante na graduação da engenharia química ainda é a educação tradicionalista, onde se utilizam apenas do quadro negro, giz e livros didáticos (JUCÁ, 2006). Com esse sistema de aulas expositivas, o professor explica e o aluno não participa efetivamente do processo de ensino, tornando a aprendizagem limitada. Assim, os alunos ficam desmotivados, desinteressados e não conseguem absorver conceitos importantes e desenvolver habilidades essenciais à formação profissional, como capacidade de raciocínio para a proposição de soluções diferenciadas (SILVA *et al.*, 2017).

Em busca de um método de ensino-aprendizagem mais interativo, em que a atuação do professor possa despertar no aluno a autonomia para sua aprendizagem, faz necessária a reestruturação dos cursos de graduação em engenharia no Brasil, contemplando as mudanças sociais e tecnológicas dos tempos modernos (ZANROSSO *et al.*, 2017).

Uma possibilidade de reestruturação é a inserção das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), dentre as quais, destaca a inclusão e o avanço dos dispositivos móveis. O uso desses equipamentos portáteis, tão difundido na atualidade, conforme mencionado na notícia assinada por Lobo (2017), veiculada no *FrontPage* da Associação Brasileira de Internet (ABRANET), o Brasil contava com 280 milhões de dispositivos móveis, considerando *notebooks*, *tablets* e *smartphones*, o que representava cerca de 1,4 dispositivos portáteis por habitante.

Nesse contexto, a facilidade de acesso aos dispositivos móveis pela comunidade possibilita realizar mudanças múltiplas no modo de ensino-aprendizagem devido a características como mobilidade e a possibilidade de acesso ao conhecimento a qualquer momento (MELO; CARVALHO, 2014). Surgiu assim, um novo conceito em educação, chamada de aprendizagem móvel, *m-learning* ou *mobile-learning*.

A aprendizagem móvel é uma categoria de ensino-aprendizagem que utiliza os dispositivos móveis através de aplicativos, vídeos e fotos para estimular o aprendizado, sem limitação de tempo e espaço (SOAD, 2017). O uso dessa tecnologia na educação deve ser feito de modo a assessorar o processo de ensino-aprendizagem para a construção do conhecimento de forma eficaz (JUCÁ, 2006).

Conforme Jucá (2006), as ferramentas computacionais utilizadas na educação podem ser distinguidas em *software* aplicativo e *software* educativo. Segundo ele, os *softwares* educativos possuem características que visam ao ensino-aprendizagem, com conteúdo didático em consonância com as regras pedagógicas (JUCÁ, 2006). Um exemplo são os tutoriais, simuladores e jogos educacionais, que permitem aos usuários o conhecimento sem a mediação do professor. Já os *softwares* aplicativos são aqueles não idealizados para a função

educativa, portanto, sem rigor pedagógico, mas que têm sido coadjuvante na educação. Caso das planilhas eletrônicas e gráficas, banco de dados e aplicativos direcionados as áreas profissionais (JUCÁ, 2006).

Em relação a esse novo processo de aprendizagem, existem muitos benefícios, mas também desafios a serem enfrentados. O principal benefício apontado por Soad (2017) é o interesse tecnológico dos jovens, que quando aliado ao ensino, permite uma maior interação, autonomia e organização dos estudos conforme suas necessidades. Os maiores desafios estão relacionados à parte técnica e humana, tais como as dificuldades em desenvolver aplicativos móveis e as desconfianças ou falta de conhecimento por parte dos educadores na eficiência da aplicação de métodos auxiliares de ensino.

De forma a mitigar os desafios técnicos, a próxima seção e suas subseções contemplaram os conceitos relacionados ao desenvolvimento de ferramentas computacionais.

3.2 APLICATIVOS MÓVEIS

3.2.1 Dispositivos móveis, sistemas operacionais e repositórios de aplicativos

Os dispositivos móveis são definidos como qualquer equipamento que pode ser transportado para diferentes lugares, com alto grau de mobilidade e autonomia (MARIMOTO, 2009). São dispositivos móveis considerados neste estudo os *smartphones*, *tablets* e *notebook*.

Incorporados aos dispositivos móveis, existem no mercado mundial algumas plataformas móveis, entre elas estão às plataformas Android e o IOS, sendo que cada qual possui uma linguagem diferenciada para desenvolvimento.

O sistema operacional Android surgiu através de um Startup, a Android Inc. em 2013 que posteriormente foi adquirida pela empresa Google Inc. em 2015 (MATOS; SILVA, 2016). Esse sistema operacional é encontrado na maioria das marcas de aparelhos celulares, como Samsung, Sony, Motorola, LG, Asus, entre outras.

O desenvolvimento de aplicações para Android é realizado na linguagem de programação Java. Não há nenhuma particularidade no uso de sistema operacional específico, assim seu desenvolvimento pode ser realizado utilizando Windows, Linux ou o Mac OS X (MATOS; SILVA, 2016). A empresa Google Inc. indica como interface específica para o desenvolvimento oficial de aplicativos, o Android Studio (MATOS; SILVA, 2016).

O repositório de aplicativos Android é denominado *Google Play Store*. Para que um desenvolvedor possa disponibilizar seu aplicativo nesta loja, é necessário que ele obtenha uma

conta de desenvolvedor, para isso é cobrado uma taxa única de US\$ 25 (GOOGLE INC., 2018). Antes de ser feita qualquer publicação nesta loja, os aplicativos passam por um processo de revisão para garantir a não violação da política da loja virtual (GOOGLE INC., 2018).

A plataforma IOS presente nos dispositivos *iPhone*, *Ipad* e *Ipod Touch* foi desenvolvido pela Apple em 2007. Essa empresa disponibiliza um conjunto de ferramentas específicas para cada tipo de dispositivo, garantindo assim, o melhor aproveitamento de sua tecnologia (BASSOTO, 2014).

A *Apple Incorporation* recomenda o uso do *Xcode* para disponibilização de aplicativos em sua loja virtual, chamada de *Apple Store*, pois esse *framework* contém os recursos necessários para seu correto funcionamento (APPLE INC., 2018).

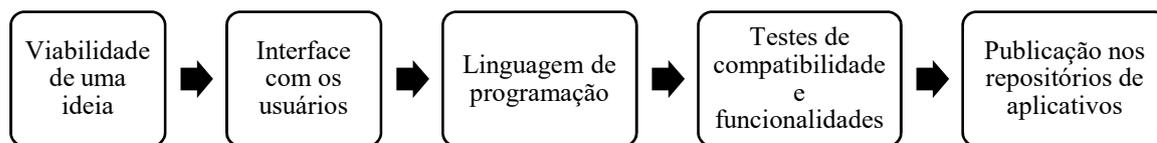
Para o desenvolvimento de aplicativos na plataforma IOS é obrigatório o uso do sistema operacional Mac OS X, presente unicamente em computadores desta marca, além do ambiente de desenvolvimento Xcode na versão atualizada (JUNTUNEN; JALONEN; LUUKKAINEN, 2013). Da mesma forma da *Google Play Store*, o repositório de aplicativo *Apple Store* exige que o desenvolvedor obtenha uma licença que dá direito ao depósito de aplicativos. Em 2018, a taxa de licença da *Apple Store* estava aproximadamente US\$ 99 anuais (APPLE INC., 2018). Ao realizar a publicação, também são realizadas verificações e validações para não infringir a política da empresa.

3.2.2 Desenvolvimento de aplicativos móveis

Por definição, aplicativos móveis são todos os *softwares* criados com o propósito específico para utilização em *smartphones* e *tablets*, disponibilizados em repositórios oficiais de aplicativos em dado sistema operacional (SILVA; LIMA, 2016).

O processo básico para o desenvolvimento de um aplicativo móvel é representado na **Figura 1**. O processo inicia-se com a análise de viabilidade de uma ideia. Em seguida define-se a interface acessível ao usuário, a linguagem de programação que será adotada e as ferramentas necessárias para seu desenvolvimento. Por fim, testam-se as suas funcionalidades em diversos dispositivos e sistemas operacionais, verificando a compatibilidade antes de disponibilizar nas lojas das plataformas, onde passará ainda por novas validações e verificações específicas do repositório de aplicativos (EL-KASSAS *et al.*, 2017).

Figura 1 – Processo inicial de desenvolvimento de um aplicativo móvel.



Fonte: Da Autora (2019).

Apesar de constituir um processo simples, trabalhar na criação de aplicativos móveis requer cuidados diferenciados em relação a outras programações de *softwares*, devido a particularidades e limitações. Dentre elas, El-Kassas *et al.* (2017) e Economides (2008) destacam: os dispositivos móveis possuem capacidade de processamento e armazenamento limitados e inferiores aos computadores em geral, assim as aplicações desenvolvidas devem ser leves, simples e com interface amigável, atendendo às expectativas dos usuários e dos recursos disponíveis em *hardware*; os sistemas operacionais dos aplicativos também sofrem constantemente atualizações, o que pode ocasionar erros que levam ao descarte ou inutilização por parte dos usuários.

Logo, esses aplicativos necessitam de frequentes manutenções e atualizações, dificultando o trabalho de seus desenvolvedores. Além disso, uma particularidade marcante desse tipo de programação é a heterogeneidade de sistemas operacionais, como os Android, IOS, Windows Phone, entre outros, o que implica na necessidade de adequar o seu código-fonte a versões específicas para cada plataforma (EL-KASSAS *et al.*, 2017).

Motivados pelas limitações apresentadas, pela complexidade das tecnologias envolvidas e a disponibilidade de tempo e recursos, os aplicativos móveis foram categorizados em 3 grupos: aplicativos nativos, *web* ou híbridos. El-Kassas *et al.* (2017) recomenda ao desenvolvedor a análise dessas categorias antes de definir propriamente o projeto. O foco desse trabalho é no desenvolvimento de aplicações híbridas, porém serão apresentadas as características, vantagens e desvantagens de cada uma das categorias mencionadas anteriormente.

3.2.2.1 Aplicações Nativas

Os aplicativos nativos são aqueles desenvolvidos única e exclusivamente para uma determinada plataforma. As plataformas móveis englobam diferentes tecnologias entre eles, os sistemas operacionais, linguagens de programação e o ambiente integrado de desenvolvimento (IDEs) (SILVA; SANTOS, 2014).

Segundo Tavares (2016), *Integrated Development Environment (IDE)* é um *software* com funcionalidades e características de apoio ao desenvolvimento ágil de *software* ou aplicativo. A **Tabela 1** apresenta as principais empresas tutoras de sistemas operacionais móveis, sistemas operacionais, linguagem de programação e IDEs de desenvolvimento recomendados por elas.

Tabela 1 – Principais sistemas operacionais, linguagens e IDEs recomendadas.

Empresas	Plataforma	Linguagem	IDE
Google Inc.	Android	Java	Android Studio
Apple Inc.	IOS	Objective C	Xcode
Windows	Windows Phone	C++ ou C#	Visual Studio

Fonte: Adaptado de Prezotto e Boniati (2014).

Os autores Prezotto e Boniati (2014) e Juntunen; Jalonen e Luukkainen (2013) corroboram que as principais vantagens de uso dessa categoria é o melhor desempenho, a possibilidade de comunicação entre aplicativos nativos e melhores usos de recursos disponíveis nos dispositivos como, câmara, GPS, agenda de contatos, e-mail e de *hardware*. Além disso, Juntunen; Jalonen e Luukkainen (2013) pontuam que essa categoria não necessita de acesso à internet e podem ser disponibilizados gratuitamente ou vendidos em repositórios de aplicativos o que possibilita maior facilidade de acesso e consequentemente melhor mercado.

Como principal desvantagem desta modalidade está a necessidade de planejar e reestruturar seu código-fonte para cada plataforma, uma vez que utiliza diferentes linguagens, aumentando o tempo, custo, esforço em desenvolver e conhecer cada uma das linguagens específicas (JUNTUNEN; JALONEN; LUUKKAINEN, 2013).

3.2.2.2 *Web Apps*

Outra categoria de programação é a *Web Apps*. Estas são aplicações multiplataformas que rodam em navegadores como Google Chrome, Safira, Firefox e outros. Utiliza-se tecnologia *Web* com linguagem de programação HTML5, JavaScript, CSS (SILVA; LIMA, 2016). As aplicações *Web Apps* são na verdade o desenvolvimento de *site* com *layout* responsivo, que permite adequar as telas aos dispositivos móveis (PREZOTTO; BONIATI, 2014). Elas podem apresentar funcionalidades semelhantes às aplicações nativas (STARK, 2010).

A vantagem mais impactante é a possibilidade de trabalhar com uma mesma linguagem de programação nas diversas plataformas, já que existe compatibilidade da maioria dos navegadores, reduzindo assim tempo e custo operacional no seu desenvolvimento (PREZOTTO; BONIATI, 2014).

Em contrapartida, requer conexão à internet, disponibilização em servidor remoto e não é acessível nos repositórios virtuais (STARK, 2010). Além disso, possuem restrições ao uso de alguns recursos de *hardwares* e *softwares* dos dispositivos móveis (HEITKOTTER; HANSCHKE; MAJCHRZAK, 2012).

3.2.2.3 Aplicações Híbridas

No cenário mundial de dispositivos móveis, constata-se a existência de uma gama de sistemas operacionais e IDEs de programação. Criar um aplicativo móvel único e que contemple o bom desempenho e acesso disponível em várias plataformas é um dos grandes desafios encontrados pelos desenvolvedores (SILVA; SANTOS, 2014).

Em resposta a esse desafio surgiram as aplicações híbridas. Como o próprio nome sugere, funciona parcialmente nativo e *web Apps*. Estes são desenvolvidos para funcionar em qualquer dispositivo móvel independente do sistema operacional e utilizando de uma única codificação (PREZOTTO; BONIATI, 2014).

Nessa categoria, a programação ocorre na tecnologia *web*, HTML5, CSS3 e JavaScript, ligados a *frameworks*, permitindo que sejam interpretados pelo forma nativa (SILVA; LIMA, 2016; MENDES; GARBAZZA; TERRA, 2014). Dessa maneira o aplicativo fica disponível para baixar nas lojas virtuais e depois de instalados não carecem de conexão à internet e podem aproveitar as funcionalidades do aparelho (TAVARES, 2016).

A principal vantagem está na redução do investimento para o desenvolvimento e manutenção dos aplicativos e do tempo de programação, uma vez que, independentemente da plataforma, planeja-se e desenvolve-se apenas uma única vez o aplicativo. Mendes, Garbazza e Terra (2014) elencam como desvantagem a não recomendação de aplicativos híbridos quando necessitem de maior qualidade gráfica, como é o caso de jogos. Outra desvantagem apontada é a necessidade de utilização de *framework*, o que acaba apresentando um atraso na comunicação, diminuindo assim o desempenho do aplicativo. Dessa forma, a escolha pelo desenvolvimento híbrido deve ser feita apenas para aplicativos menos robustos e com programação mais rápida.

3.2.3 *Frameworks* para desenvolvimento de aplicativos híbridos

Ao analisar as características das categorias acima, vantagens, desvantagens em busca de uma programação mais rápida, leve e sem necessidade de vincular recursos do dispositivo, optou-se pelo desenvolvimento híbrido.

A aplicação híbrida sugere a utilização de várias tecnologias no seu desenvolvimento de modo a unir as tecnologias *web* e nativas através do uso do *frameworks*.

O *framework* é responsável pelo elo entre a aplicação e o dispositivo. Cabe a ele fazer o empacotamento ou gerar o arquivo executável para as diferentes plataformas (PREZOTTO; BONIATI, 2014). Existem no mercado várias combinações de *frameworks* para o desenvolvimento híbrido, destacam-se aqui o uso em conjunto das tecnologias Apache Cordova, AngularJs e o Ionic.

3.2.3.1 *Apache Cordova*

O Apache Cordova recebeu esse nome após o Google Inc. adquirir e dar continuidade ao desenvolvimento do *framework* PhoneGap, criado pela empresa Nitobi (MATOS; SILVA, 2016). Ele possui uma estrutura dinâmica para desenvolvimento de aplicativos *Web* com código aberto e permite o acesso a funcionalidades nativas dos dispositivos (APACHE CORDOVA, 2018).

Segundo informações em documento disponível no sítio do Apache Cordova ele deve ser utilizado quando se deseja gerar o aplicativo em mais de uma plataforma, sem ter que reestruturar seu código-fonte; ou, quando precisa intercalar a utilização de componentes *Web* e aplicativos nativos (APACHE CORDOVA, 2018).

O Apache Cordova apenas consegue desenvolver um aplicativo e fazer funcionar como nativo em sistemas Android ou IOS, através do JavaScript, mas não possui interface gráfica. Logo, todos os processos realizados nele devem ser feitos por linhas de comandos (PREZOTTO; BONIATI, 2014).

A função principal deste *framework* é vincular a programação *front-end* ao dispositivo móvel (TAVARES, 2016; MATOS; SILVA, 2016). Para solucionar o impasse da aparência são utilizados outros *frameworks* em conjuntos, como o Ionic *Framework* (TAVARES, 2016).

3.2.3.2 *AngularJs*

O AngularJs também é uma criação da empresa Google Inc. É um *framework open source* que está intimamente ligada à linguagem de programação *web*, o HTML, permitindo o desenvolvimento de aplicativos com estrutura dinâmica (TAVARES, 2016). Dessa forma, ele estende a sintaxe do HTML para criar páginas dinâmicas diminuindo a incompatibilidade entre aplicativos. Ele também permite a construção em diretivas (ANGULARJS, 2018).

A aplicação do AngularJs pode ser notada quando o usuário faz uma requisição na interface gráfica. O AngularJs interpreta essa ação e pede ao servidor a resposta necessária. Quando esse servidor retorna com a resposta, o resultado é apresentado automaticamente, não sendo necessário realizar atualização da página, tornando o processo mais ágil (MATOS; SILVA, 2016).

3.2.3.3 *Ionic Framework*

O Ionic foi criado pela empresa DriftyCo em 2013 e teve sua primeira versão lançada em novembro do mesmo ano (SILVA; LIMA, 2016). Encontra-se atualmente na versão 4.0. Trata-se de um conjunto de ferramentas de desenvolvimento com código aberto que viabiliza a criação de aplicativos híbridos usando tecnologias *web* conhecidas como HTML5, CSS3 e JavaScript (IONIC, 2018). Após o lançamento da versão 3.0, o *framework* passou a trabalhar com a linguagem TypeScript ao invés do JavaScript. É uma ferramenta rápida e de fácil desenvolvimento.

A linguagem HTML é uma abreviação de *HyperText Markup Language* que significa linguagem de marcação de hipertextos. Esses hipertextos são delimitações marcadas para permitir a inserção de conteúdo, imagens, gráficos, vídeo, áudios ou união de documentos externos da *web* em seu projeto (SILVA, 2014 (a); BASSOTO, 2014). A versão do HTML5 é contemplada no Ionic 4.0. Seu diferencial em relação a versões anteriores é a facilidade na manipulação de elementos e a melhor integração com as ferramentas CSS3 e JavaScript (BASSOTO, 2014).

O CSS3 é responsável pela estilização e padronização das páginas, ou seja, apresentação visual dos elementos do HTML (BASSOTO, 2014).

O JavaScript é utilizado para definir ações de alguns elementos em HTML de modo a hierarquizar esses elementos (BASSOTO, 2014). Já o TypeScript pode ser considerado uma estrutura equivalente ao JavaScript (BASSOTO, 2014). Foi criada de modo a agilizar o

desenvolvimento de aplicativos. Sua linguagem oferece um sistema em módulos, classes e interface permitindo uma transformação mais suave que o JavaScript (BIERMAN; ABADI; TORGERSEN, 2014). A função principal do TypeScript ou JavaScript é controlar serviços através dos *scripts* ou comandos a serem executados (GOIS, 2017).

A estrutura de desenvolvimento do Ionic possui um código que viabiliza trabalhar juntamente com o Apache Cordova e o AngularJs, implementando aplicativos nas plataformas mais utilizadas, IOS e Android (IONIC, 2018). Além disso, esse *framework* atua principalmente na aparência e na interação com usuário, permitindo manipular funções e recursos nativos aos aparelhos celulares através de comandos aplicados em JavaScript/TypeScript e em parceria com Apache Cordova (IONIC, 2018).

No desenvolvimento do trabalho foram utilizados todos os *frameworks* mencionados anteriormente em conjunto. A base de programação utilizou um editor de texto e código-fonte denominado *Visual Studio Code* que permitiu editar e usar todos esses *frameworks* conjuntamente.

3.3 OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO

Os processos de separação estão presentes na maioria das indústrias químicas e são extremamente importantes. Segundo McCabe, Smith e Harriott (2014), eles são agrupados em dois grupos. O primeiro enfatiza os processos envolvendo a transferência de material entre fases, chamados de processos de difusão. E o outro grupo, formados pelos processos de separação que compreendem as misturas heterogêneas.

O foco deste trabalho foi direcionado ao último grupo mencionado, abrangendo mais especificamente os sistemas particulados, cujo objetivo é a separação de partículas sólidas na presença de um fluido, que podem ser líquidos ou gasosos.

Os processos de separação de sistemas particulados são apoiados nas diferenças de características físicas dos materiais sólidos e fluidos envolvidos, como massa específica, tamanho ou formato das partículas, sob a ação de forças de campo centrífugo ou gravitacional, dentre outros (MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2014; CREMASCO, 2014).

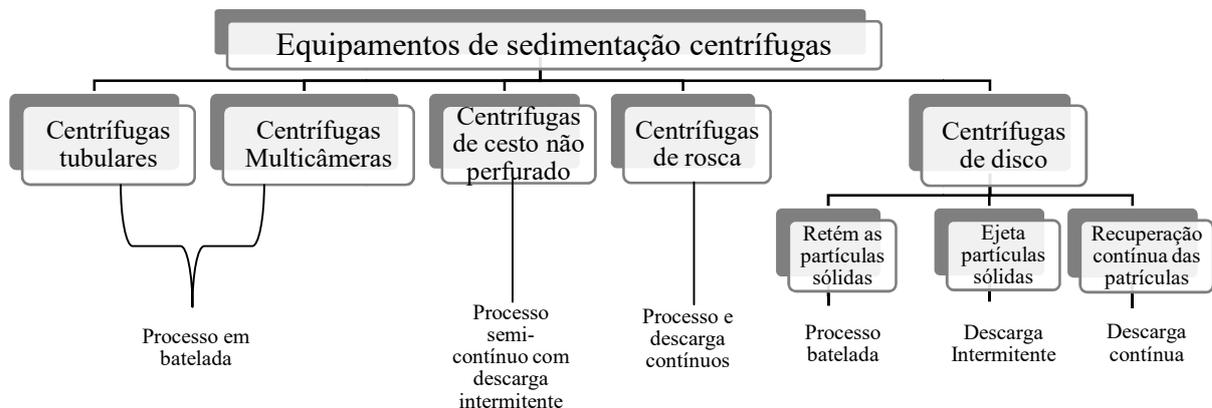
Nas indústrias químicas, dentre os equipamentos de separação sólido e fluido destacam-se as centrífugas, ciclones e hidrociclones, em que atuam as forças centrífugas; além das câmaras de poeira ou tanques de areia, elutriadores e sedimentadores, nos quais a separação ocorre por ação da força gravitacional (CREMASCO, 2014). As características e o funcionamento desses equipamentos serão apresentados nas próximas subseções.

3.3.1 Centrífugas tubulares

A centrifugação é um processo de separação entre sólido e líquido, líquido e líquido ou líquido e gás que opera de forma mais ágil que o processo da decantação ou sedimentação livre devido à atuação do campo centrífugo (CREMASCO, 2014). Processo bastante utilizado industrialmente na produção de óleos lubrificantes, indústrias de tintas, alimentícias e bebidas, além do setor sucroalcooleiro (PEÇANHA, 2014; CREMASCO, 2014; MCCABE; SMITH; HARRIOTT, 2014).

As centrífugas podem ser distinguidas em filtrantes, no qual seu cesto interior possui furos por onde o fluido percorre os meios filtrantes e as sedimentadoras (PEÇANHA, 2014). Svarovsky (2000) afirma existir vários tipos de centrífugas sedimentadoras classificadas de acordo com o seu funcionamento, conforme **Figura 2**. Dentre os mais populares destacam as centrífugas de cesto e as tubulares (PASOTTO; ARNOSTI; PASSOTO, 2011).

Figura 2 – Classificação dos equipamentos de centrífugas.



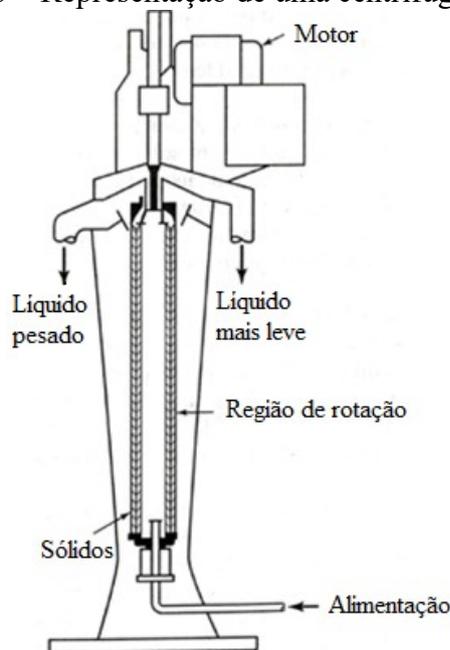
Fonte: Adaptado de Svarovsky (2000).

As centrífugas tubulares, conhecidas também como super centrífugas, possuem geralmente diâmetro do cesto entre 100 e 150 mm e atingem altíssima velocidade operacional (GEANKOPLIS, 2010). Diferentemente, as centrífugas de cesto funcionam com velocidades mais brandas e menores vazões que a anterior. No entanto, operam melhor na presença de soluções com maiores concentrações (PEÇANHA, 2014).

Independentemente do tipo de centrífuga sedimentadora, elas são compostas basicamente por um cesto cilíndrico, que movimenta o material alimentado em torno do eixo central a uma alta velocidade por ação da força centrífuga. Essa força faz com que as

partículas presentes no líquido vão de encontro às paredes do equipamento, depositando-as e posteriormente podem ser removida (PEÇANHA, 2014). Como pode ser visto na **Figura 3**.

Figura 3 – Representação de uma centrífuga tubular.



Fonte: McCabe, Smith e Harriott (2014).

Para que ocorra o movimento rotacional das centrífugas, os equipamentos necessitam acoplar um motor elétrico permitindo, assim, limitar a velocidade de processo (PEÇANHA, 2014). Peçanha (2014) ainda afirma que a velocidade rotacional está diretamente relacionada ao campo centrífugo, logo, a vazão pode ser considerada uma variável importante, já que variação dela permite encontrar o melhor desempenho operacional do processo.

A análise das centrífugas tubulares pode ser realizada prevendo o tamanho das partículas através do conhecimento do diâmetro de corte (D^*), ou seja, aquelas partículas que são recuperadas com eficiência de processo em 50%, vazão, a eficiência de recuperação das partículas através do conhecimento da grade eficiência (SVAROVSKY, 2000). Além dessas análises é possível realizar a ampliação de escala do processo, no qual se ajusta a vazão de suspensão (Q_A) e/ou velocidade de rotação (ω) (PEÇANHA, 2014). Para isso, utiliza-se o conceito do fator sigma (Σ), relacionando à configuração, dimensões e rotação do equipamento (MASSARANI, 2002). É importante frisar que a ampliação do processo só pode ocorrer respeitando as características do material em suspensão e o tipo de centrífuga (MASSARANI, 2002).

Ao contrário dos demais equipamentos de separação mecânica que serão apresentados adiante, as centrífugas são equipamentos com custo mais elevado de instalação, operação e manutenção, logo o preço do produto final da recuperação torna-se mais alto (PEÇANHA, 2014).

3.3.2 Ciclones

Os ciclones são equipamentos de separação de partículas sólidas suspensas em correntes gasosas provenientes dos processos industriais e atuam no controle de poluição ar e recuperação de material arrastado (PEÇANHA, 2014; ZHAO; SU; ZHANG, 2006).

Esses dispositivos são amplamente empregados nas indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas e refinarias de petróleo ao trabalhar na recuperação de partículas muito finas, na faixa 5 a 200 μm (PEÇANHA, 2014). Além disso, são equipamentos facilmente construídos, possui baixo custo operacional e de manutenção e tem a facilidade de se adaptar a diversas condições de temperatura e pressão (ZHAO; SU; ZHANG, 2006; BERNARDO, 2005).

A base da construção dos ciclones conhecidos atualmente surgiu em 1905, quando Orville M. Morse propôs que eles fossem projetados em formato vertical com uma região cônica responsável a direcionar os sólidos para a base do equipamento (HAAKE *et al.*, 2016). Esse modelo se tornou a referência da geometria convencional.

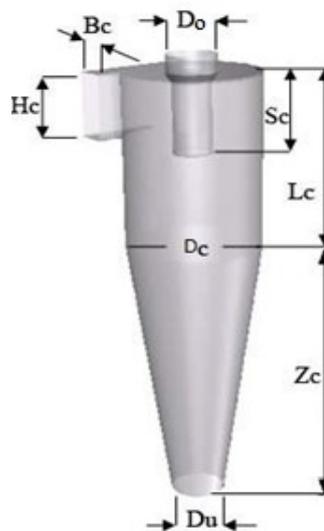
Os separadores ciclônicos são projetados basicamente por um vaso cilíndrico sem partes móveis conectados a um tronco com formato cônico conectado a um depósito de partículas (PEÇANHA, 2014). O esquema de um ciclone convencional é apresentado na **Figura 4**.

Nessa representação é visto que o equipamento é composto por uma entrada e duas saídas. A corrente gasosa contendo particulados em suspensão alimenta o equipamento de forma tangencial à câmara cilíndrica, dando início ao movimento de vórtice - **Figura 5** (BERNARDO, 2005; PEÇANHA, 2014). Durante esse movimento, aparecem duas regiões distintas. Uma região localizada próxima às paredes do ciclone, denominado de vórtice externo ou forçado que se encontra em movimento descendente e contém a maior massa específica de partículas, no qual as permitirá coletar na região inferior. E a outra região, denominada de vórtice interno ou livre, gira-se em torno do eixo central do equipamento com

baixa concentração de particulados. No vórtice livre obtêm os gases na saída superior (PEÇANHA, 2014).

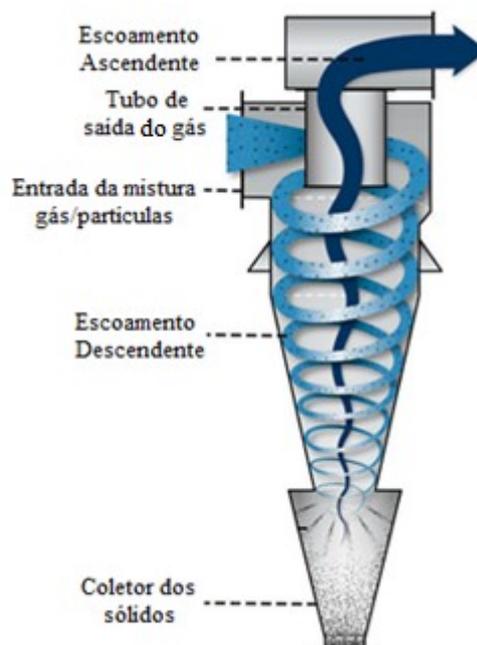
Os ciclones conforme se nota na **Figura 4** possui um conjunto de dimensões, que deram origem a diferentes famílias, dentre eles, os mais conhecidos são os ciclones Stairmand e o Lapple. Cada um dessas famílias contém proporções diferentes que compõem suas dimensões em relação ao seu diâmetro cilíndrico. As características geométricas estão apresentadas na **Tabela 2**.

Figura 4 – Representação de um ciclone convencional.



Fonte: Adaptado de Utikar *et al.* (2010).

Figura 5 – Representação esquemática simplificada do escoamento em um ciclone.



Fonte: Adaptado de Gamohar (2016).

Tabela 2 – Configuração de ciclones Lapple e Stairmand.

Família de ciclone	B_c/D_c	D_o/D_c	H_c/D_c	L_c/D_c	S_c/D_c	Z_c/D_c	D_u/D_c
Lapple	0,25	0,50	0,50	2,00	0,62	2,00	0,25
Stairmand	0,20	0,50	0,50	1,50	0,50	2,50	0,37

Fonte: Massarani (2002).

As dimensões acima citadas representam: L_c é a medida de altura da parte cilíndrica, Z_c altura da parte cônica, D_c é o diâmetro cilíndrico, S_c é comprimento do *vortex finder*, D_u é o diâmetro do orifício do *underflow*, D_o é o diâmetro do tubo *overflow*, H_c é altura do duto de alimentação e B_c o comprimento do mesmo duto.

Os projetos de equipamentos ciclônicos visam a aperfeiçoar o desempenho, ou seja, obter alta eficiência de coleta com baixa queda de pressão e alta vazão (BERNADO, 2005). Logo, para avaliar um ciclone é necessário conhecer as variáveis de processos (massas específicas do sólido e do fluido, viscosidade, tamanho de partículas), variáveis de operação (vazão), variáveis de projeto e as dimensões da família (PEÇANHA, 2014).

3.3.3 Hidrociclones

Os hidrociclones, também conhecido como ciclones hidráulicos, são equipamentos pertencentes à separação centrífuga, e assim como os ciclones não tem a presença de parte móvel. Eles são utilizados em diversas áreas das indústrias químicas, metalúrgica, têxtil, petroquímica, alimentícia e de bioengenharia e atuam principalmente na separação de sólido e líquido (SVAROVSKY, 2000).

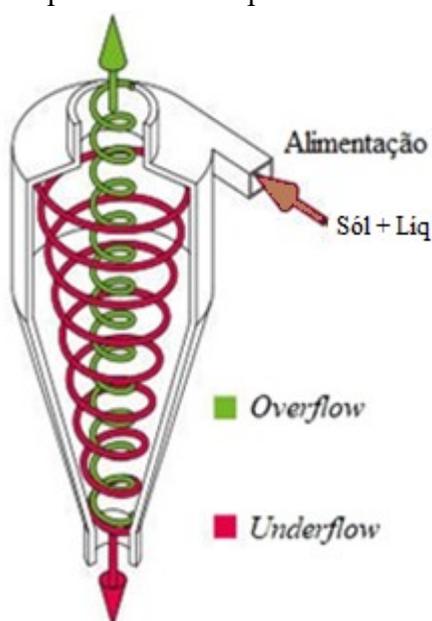
O primeiro registro de patente dos hidrociclones pertenceu a Eugene Bredney na data de 1891, intitulado “Purificador de água” (PEÇANHA, 2014). Esses dispositivos difundiram facilmente nas indústrias por serem equipamentos simples e de fácil manutenção. Eles têm como função principal a separação de partículas por diferenças no tamanho das partículas, massa específica ou velocidade terminal de queda, que estão suspensas em líquido de baixa massa específica; remoção de sólidos suspensos no líquido; separação de líquidos imiscíveis de diferentes massas específicas e remoção de líquido para fornecer um produto mais concentrado (SILVA (b), 2014).

As características de seu funcionamento são semelhantes ao ciclone. A separação do material particulado é possível devido a diferenças nas massas específicas com o líquido e da atuação da força centrífuga (PEÇANHA, 2014). Os hidrociclones são compostos por uma seção cilíndrica agregados a parte cônica. A alimentação do líquido com partículas suspensas ocorre tangencialmente através da entrada lateral na parte cilíndrica e como resultado dessa

entrada forma-se um forte movimento (SVAROVSKY, 2000). Devido a esse movimento, uma fração de líquido contendo finas partículas é retirada no topo do equipamento, também chamado de *overflow* e na outra saída, o *underflow* localizado na parte final cônica é retirada a fração mais densa de partículas e o líquido remanescente (SVAROVSKY, 2000). A **Figura 6** apresenta esquematicamente o fluxo em um hidrociclone.

Considerando que nenhum equipamento de separação trabalha com eficiência real de 100%, por essa razão não é possível obter somente líquido no *overflow* ou somente partículas no *underflow* em equipamentos industriais reais (SVAROVSKY, 2000).

Figura 6 – Representação esquemática e simplificada no interior de um hidrociclone.



Fonte: Adaptado de AKW (2018).

Antunes e Medronho (1992) apontam que as empresas produtoras de hidrociclone trabalham limitando a faixa de diâmetros desses equipamentos, portanto, é importante conhecer as proporções geométricas que pode influenciar no desempenho deles. A **Tabela 3** e **Figura 7** trazem as informações das proporções geométricas das duas principais famílias de hidrociclones: Bradley e Rietema.

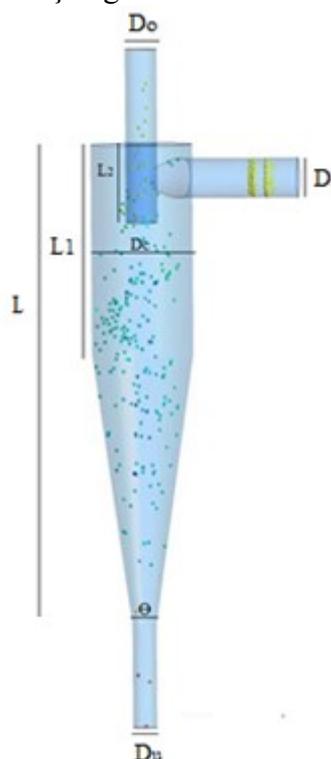
Tabela 3 – Configuração de hidrociclones Rietema e Bradley.

Hidrociclone	D_i/D_c	D_o/D_c	L/D_c	L_1/D_c	L_2/D_c	θ
Bradley	1/7	1/5	-	1/2	1/3	9°
Rietema	0,28	0,34	5,00	-	0,40	15-20°

Fonte: Massarani (2002).

No qual, D_c é o diâmetro da parte cilíndrica, D_i o diâmetro de alimentação, D_o diâmetro no *overflow*, D_u diâmetro no *underflow*, L é a altura total do hidrociclone, L_1 altura da seção cilíndrica, L_2 altura do vortex *finder* e θ é o ângulo do tronco cônico.

Figura 7 – Representação geométrica de hidrociclones.



Fonte: Adaptado de Barros e Alves (2014).

Em uma análise mais detalhada do funcionamento dos hidrociclones é possível verificar a implicação de dois recursos: a sedimentação em campo centrífugo e o efeito direcionado a coleta de sólidos (PEÇANHA, 2014).

Os hidrociclones trabalham dividindo a vazão de alimentação em duas correntes, *overflow* e *underflow*, originando o fenômeno conhecido como “efeito T” ou “efeito divisor de vazão”. O “efeito T” independentemente de ocorrer ou não a separação centrífuga, os particulados sempre serão coletados simplesmente pelo fato de estarem suspensos no líquido que os arrastam para a saída inferior, *underflow*. Dessa forma, Peçanha (2014) afirma que foi estabelecido experimentalmente que a eficiência de coleta dos sólidos considerando o “efeito T” se dá em razão da eficiência de coleta de líquido pelo hidrociclone obtido através da razão de líquido (R_L). Essa razão de líquidos dimensiona a eficiência de coleta de fluido em um hidrociclone. O valor de R_L para hidrociclones estão, em geral, em torno de 0,6 ou menos (PEÇANHA 2014).

A presença desses recursos dificulta a análise de desempenho, sendo necessária a utilização de correlações experimentais envolvendo as variáveis de processo (massas específicas e viscosidade do fluido), variáveis de projeto (diâmetro da parte cilíndrica) e as variáveis operacionais como vazão de alimentação, queda de pressão e diâmetro de corte (PEÇANHA, 2014).

3.3.4 Câmaras de poeira e Tanques de areia

A separação de um grupo de partículas sólidas em um campo gravitacional pode ser realizada por equipamentos conhecidos como câmaras de poeira, tanques de areia ou tanques de sedimentação gravitacional. Esses dispositivos são responsáveis pela retirada de partículas sólidas suspensas em gases em razão da diferença de massa específicas entre eles (PEÇANHA, 2014; FOUST *et al.*, 1982). A sua operação é fundamentada na diferença entre o tempo de permanência de um particulado e o tempo que essa partícula leva para sedimentar em uma coluna (CREMASCO, 2014).

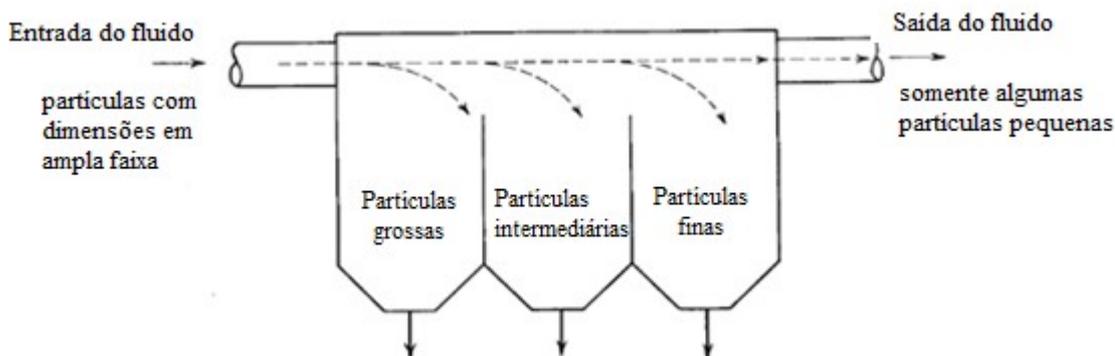
Foust e colaboradores (1982) consideram este dispositivo como sendo a forma mais simples de recuperação de sólidos dispersos em fluidos gasosos. Por essa razão tem aplicação ampla em vários setores industriais, mas são encontrados preferencialmente em indústrias metalúrgicas e siderúrgicas (PEÇANHA, 2014).

A câmara de poeira, representada na **Figura 8** é composta por um grande tanque subdividido em várias seções com uma única entrada, no qual o material suspenso no fluido adentra o equipamento e uma saída, onde é retirado o fluido com partículas muito pequenas que não conseguiram ser separadas durante o processo (FOUST *et al.*, 1982). Assim que o material disperso no gás entra no corpo da câmara de poeira a velocidade de alimentação é reduzida gradativamente devido ao aumento da área de escoamento, com a ajuda do campo gravitacional terrestre as partículas sedimentam no fundo do tanque. As partículas mais densas rapidamente vão em direção ao fundo do equipamento, as partículas mais leves, portanto, com sedimentação mais lenta são arrastadas e podem posteriormente, sedimentarem em outras regiões do equipamento ou ainda, serem carregadas para fora da câmara (FOUST *et al.*, 1982; PEÇANHA, 2014).

Ao avaliar um projeto direcionado à câmara de poeira espera-se o conhecimento das dimensões do equipamento, variáveis de projeto (massas específicas do fluido e das partículas, esfericidade, diâmetros e viscosidade dinâmica) e das variáveis operacionais como vazão e velocidade (PEÇANHA, 2014). Diante dessas informações prevêem-se o tamanho das

partículas, as faixas granulométricas de recuperação e o comprimento de cada seção do equipamento.

Figura 8 – Câmara de poeira ou tanque de sedimentação gravitacional.



Fonte: Foust *et al.* (1982).

Com intuito de tornar a avaliação mais concreta, Peçanha (2014) sugere trabalhar no limite mais desfavorável do processo, ou seja, considerando aquela partícula que entra no dispositivo em condição inadequada, próximo ao topo do equipamento, e deve ser coletada no final da câmara.

3.3.5 Elutriadores

A elutriação é uma operação de separação entre sólidos que ocorre na presença de um fluido e em campo gravitacional. Esse fluido tem o objetivo de realizar o arraste seletivo das partículas separando-as de acordo com as diferenças nas características físicas como tamanho das partículas, massa específica ou formato de um mesmo sólido ou entre dois sólidos (PEÇANHA, 2014).

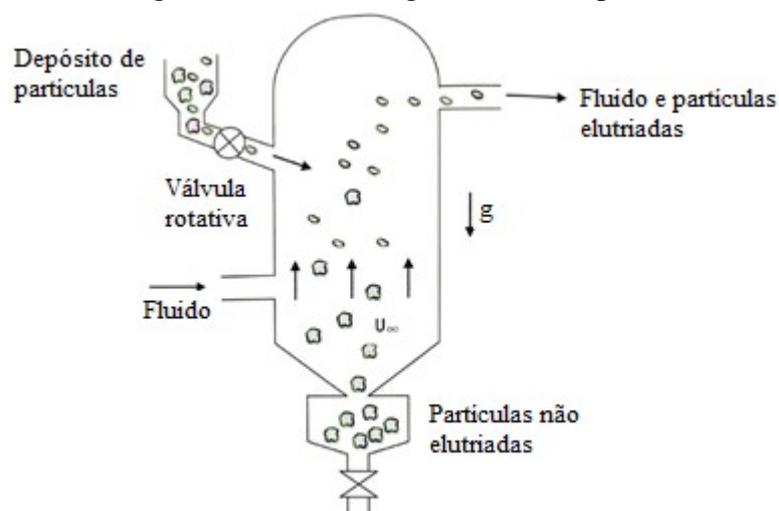
O processo de elutriação começou a ser empregado industrialmente nas operações metalúrgicas, visto a necessidade de separar os minérios com valor agregado da parcela sem valor comercial, chamada de gangas (PEÇANHA, 2014; MACCABE; SMITH; HARRIOTT, 2014). A realização deste tipo de separação objetiva recuperar partículas finas, para isso utiliza-se de um equipamento denominado elutriador.

Os elutriadores são constituídos por uma câmara vertical com dois dutos de alimentação. Próximo ao topo da coluna é alimentado o material alvo da separação que se junta ao fluido com fluxo ascendente presente no tubo próximo à base do equipamento, como observado na **Figura 9** (PEÇANHA, 2014; FOUST *et al.*,1982).

Vale ressaltar que o processo de escoamento do fluido nos elutriadores não ocorre de forma uniforme, ou seja, as áreas próximas as paredes do equipamento, possuem menor velocidade do fluido se comparada com a região central. Dessa forma, as partículas de mesmos diâmetros ao serem processadas em regiões distintas do equipamento podem ser direcionadas tanto para os sólidos elutriados como os decantados (PEÇANHA, 2014).

De maneira a minimizar essa ocorrência, Peçanha (2014) descreve que, alguns elutriadores possuem uma seção transversal maior no topo do equipamento com uma velocidade mais branda, o que possibilita com que as partículas processadas na região central possam ser reprocessadas distante do centro do equipamento.

Figura 9 – Elutriador gravitacional típico.



Fonte: Peçanha (2014).

A separação das partículas nesses equipamentos ocorre devido à diferença entre a velocidade média do fluido e a velocidade terminal das partículas (CREMASCO, 2014). De tal maneira que é possível se deparar com três situações durante o processo (PEÇANHA, 2014).

- Caso 1 – A velocidade média do fluido é maior que a velocidade terminal, então a velocidade das partículas é positiva e elas são elutriadas;
- Caso 2 – As velocidades terminal e média do fluido são idênticas. Neste caso, as partículas permanecem paradas no equipamento e,
- Caso 3 – A velocidade média do fluido é menor que a velocidade terminal das partículas, logo, as partículas ficam retidas.

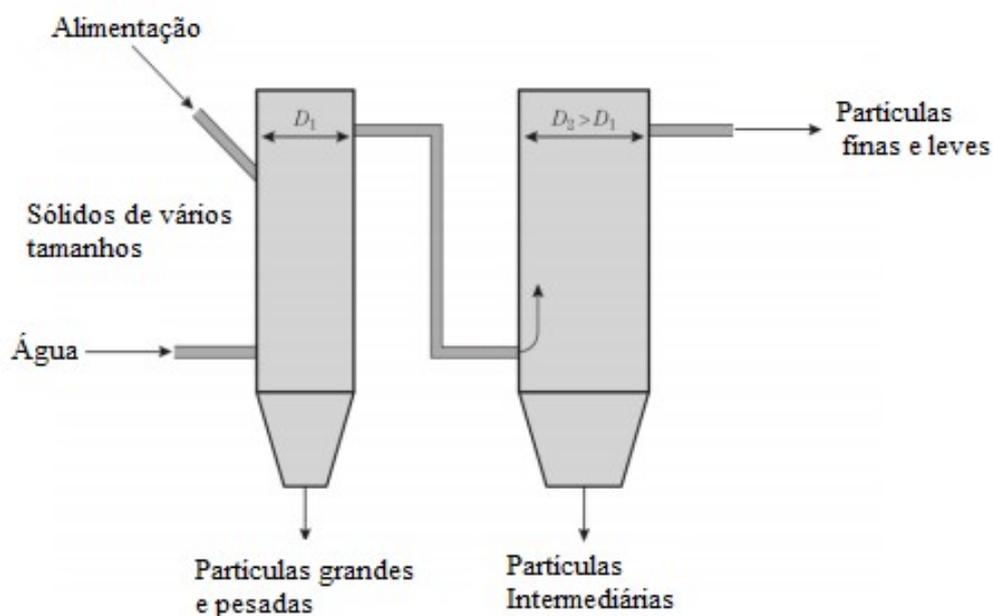
Na prática, durante o processo de desenvolvimento de um projeto, avaliação ou realização de ajustes operacionais neste equipamento, almeja-se determinar o tamanho das

partículas que ficam em estado estacionário no equipamento quando expostas a uma dada velocidade de elutriação. A partir dessas informações, sabe-se que partículas maiores serão retidas e as menores acompanham o fluido, portanto, são elutriadas (PEÇANHA, 2014).

Para obter um melhor resultado na separação, os elutriadores também podem ser acoplados em série, como apresentado na **Figura 10**. Neste caso, os equipamentos, normalmente possuem diâmetros diferentes, e as partículas são carregadas pelo fluido em um equipamento e alimentadas em uma nova coluna, refinando cada vez mais o processo de separação (CREMASCO, 2014).

Ao analisar o sistema de elutriação é fundamental o conhecimento das características físicas das partículas sólidas, como distribuição granulométrica, tamanho médio das partículas ($D_{partículas}$), esfericidade (ϕ) e a massa específica dos sólidos (ρ_s); das características do fluido (viscosidade dinâmica (μ) e massa específica do fluido (ρ_f)); das condições operacionais como temperatura (T), vazão (Q), velocidade (u_c), altura (H) e diâmetro da coluna (D).

Figura 10 – Sistema de elutriadores em série.



Fonte: Cremasco (2014).

Além disso, são necessárias correlações para definição do coeficiente de arraste das partículas (C_D) em função do número de Reynolds (Re), a fim de que seja contabilizada a transferência de quantidade de movimento entre a fase fluida e particulada devido ao atrito (forças de superfície). Massarani (2002) e Cremasco (2014) citam, entre outras, a correlação de Coelho e Massarani (1996), válida para partículas isométricas e isoladas, com esfericidade entre 0,65 e 1 e $Re < 50.000$, como mostra a **Tabela 4**.

Tabela 4 – Fluidodinâmica de partícula isométrica isolada.

Correlação de Coelho e Massarani (1996)	N	
$C_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re} \right)^n + K_2^n \right]^{1/n}$	0,85	$Re = \frac{D_p u_c \rho_f}{\mu}$
$Re = \left[\left(\frac{K_1 C_D Re^2}{24} \right)^{-n} + \left(\frac{C_D Re^2}{K_2} \right)^{-n/2} \right]^{1/n}$	1,20	$C_D Re^2 = \frac{4 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g D_p^3}{3 \mu^2}$
$Re = \left[\left(\frac{24}{K_1 C_D / Re} \right)^{n/2} + \left(\frac{K_2}{C_D / Re} \right)^n \right]^{1/n}$	1,30	$\frac{C_D}{Re} = \frac{4 (\rho_s - \rho_f) \mu g}{3 \rho_f^2 u_c^3}$

*Em que, $K_1 = 0,843 \log_{10} (\phi / 0,065)$ e $K_2 = 5,31 - 4,88\phi$.

Fonte: Massarani (2002).

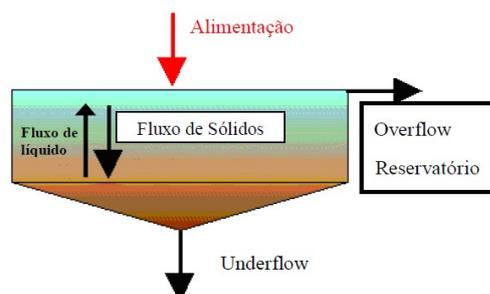
3.3.6 Sedimentadores

A sedimentação, também conhecida como decantação, é uma operação unitária que separa sólidos de líquidos por ação da força gravitacional. Isto ocorre em razão das partículas sólidas serem mais densas que o líquido (PEÇANHA, 2014).

Esta operação unitária é utilizada industrialmente quando se tem algum processo envolvendo grande volume de suspensão e o material com baixo valor agregado (PASOTTO; ARNOSTI; PASSOTO, 2011). A sedimentação é empregada usualmente em sistemas de tratamento de efluentes, recuperação de água para reciclo, recuperação de partículas ou soluções em processos de lixiviação (SPIRANDELI *et al.*, 2015; PASOTTO; ARNOSTI; PASSOTO, 2011).

Os sedimentadores são equipamentos abertos para a atmosfera e é composto espessadores e três correntes: alimentação, *overflow* e *underflow*. Na corrente *overflow* saem a solução líquida com finas partículas que não conseguiram ser retiradas na corrente de retidos. Devido à ação da gravidade, o material particulado contendo o líquido remanescente fica depositado e são retirados através da corrente *underflow* (PEÇANHA, 2014). Na **Figura 11** tem-se a representação esquemática de um sedimentador.

Figura 11 – Representação esquemática de um sedimentador.



Fonte: Guimarães (2010).

Os equipamentos de sedimentação podem ser classificados de acordo com a geometria, características de alimentação ou com o objetivo do processo. Neste último caso, subdivididos em clarificadores ou espessadores (PEÇANHA, 2014; CREMASCO, 2014). O primeiro se refere quando o objetivo é um líquido com menos impurezas sólidas. Ao passo que os espessadores direcionam o foco para o aumento na concentração do material retido (PEÇANHA, 2014). Em relação à alimentação podem ser de forma contínua ou em batelada (CREMASCO, 2014).

Pasotto, Arnosti e Passoto (2011) mencionam ainda, que a sedimentação é realizada de forma discreta, em flocos de pequena concentração, em massa ou na zona de compreensão de acordo com a concentração de sólidos e as características das partículas.

A sedimentação em massa é preferencialmente encontrada nas indústrias. Neste caso, a alimentação é realizada continuamente através de dutos subterrâneos. A parte superior do equipamento é composta por um distribuidor de fluxo, responsável por evitar turbulências (PEÇANHA, 2014). Esses equipamentos, em geral, operam abertos para atmosfera.

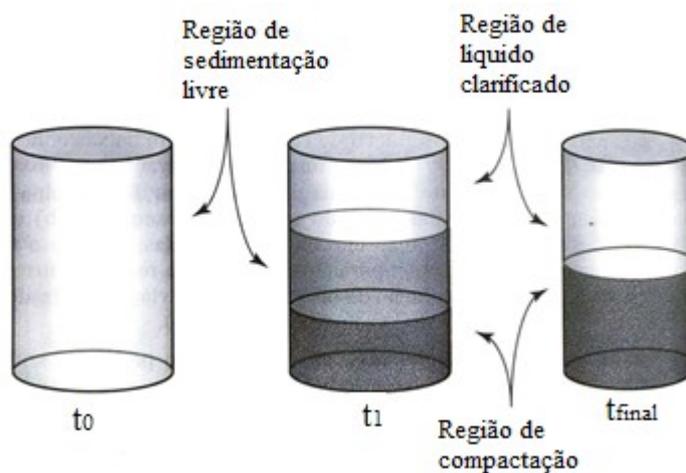
A elaboração de projeto de sedimentador em massa requer o dimensionamento da área de seção transversal e da altura do tanque de sedimentação (PEÇANHA, 2014). A obtenção dessas variáveis de projeto está relacionada às informações como: diâmetro das partículas ($D_{particulas}$), viscosidade (μ) e massa específica do líquido (ρ_f), características do sólido e das variáveis de processo (PASOTTO; ARNOSTI; PASSOTO, 2011). Encontra-se nas literaturas científicas algumas metodologias para essa finalidade. Entre estas, estão os métodos de Kynch e Biscaia Jr. Em ambos os métodos é realizado uma simulação do processo em bancadas laboratoriais através de um teste conhecido como, teste de proveta. Somente após o ensaio de proveta é que se aplicam os métodos citados.

O teste de proveta consiste na utilização da solução suspensa que é colocada em uma proveta, normalmente de 2 litros e agitada (PEÇANHA, 2014), como visto na **Figura 12**. O processo consiste na verificação do tempo de sedimentação. No tempo inicial (t_0) o material particulado encontra-se homogeneamente distribuído no líquido, portanto, a uma concentração constante ao longo da proveta. Na proveta à esquerda da **Figura 12** depois de transcorrido um tempo do início do teste, as partículas maiores ou mais densas começam a ir para o fundo da proveta e sedimentar, formando uma fina camada, denominada de região de compactação. A partícula mais fina, logo mais leve, tem um tempo de sedimentação mais lento formando assim uma região intermediária, que é a região de sedimentação livre. Neste momento, começa a formação da região de líquido clarificado, onde não há presença de sólidos. Algum tempo depois, as partículas sedimentam e é possível ver o líquido mais

clarificado. As divisões das regiões citadas anteriormente são mais bem vistas nas provetas central e a direita da **Figura 12** (CREMASCO, 2014).

No decorrer do ensaio de proveta é observado e medido a alteração da interface do líquido clarificado a partir da base da proveta e o tempo gasto (PEÇANHA, 2014; PASOTTO; ARNOSTI; PASSOTO, 2011).

Figura 12 – Regiões características de um ensaio de proveta.



Fonte: Cremasco (2014).

Através das informações obtidas é construída a curva de sedimentação, traçando-se uma reta do tempo em função da altura de sedimentação que servirá de base para aplicação dos métodos de Kynch e Biscaia Jr. Segundo Cremasco (2014), esses dados fornecem informações da taxa de sedimentação, razão da concentração entre alimentação e espessado, concentração máxima do espessado entre outras.

Embora o teste de proveta ocorra em batelada e os sedimentadores industriais operam em regime contínuo, a realização do teste de proveta se torna importante na determinação da capacidade máxima de sedimentação e na relação vazão e altura da compactação (MASSARANI, 2002).

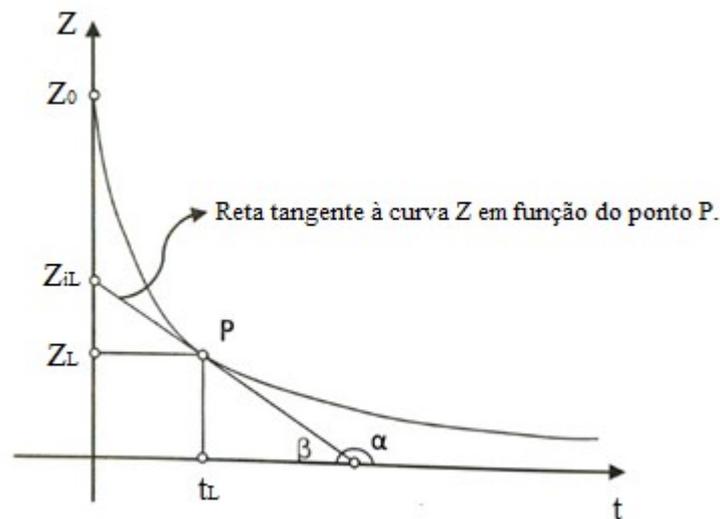
3.3.6.1 Método de Kynch

O método de Kynch propõe a utilização apenas de um único teste de proveta capaz de fornecer a curva de decantação, altura de sedimentação (Z) em função tempo (t), **Figura 13** (PEÇANHA, 2014).

A aplicação desse método considera as seguintes hipóteses para descrever a sedimentação livre em batelada (CREMASCO, 2014).

- i) A sedimentação unidimensional;
- ii) A concentração aumenta com o tempo no sentido do fundo da proveta;
- iii) A velocidade tende a zero quando a concentração tende ao valor máximo;
- iv) A velocidade depende apenas da concentração local das partículas
- v) Desconsidera os efeitos nas paredes do equipamento.

Figura 13 – Determinação de concentração e velocidade através do teste de proveta.



Fonte: Peçanha (2014).

A partir do gráfico de decantação os pares de concentração (C) e velocidade de descida da interface (v) podem ser obtidos traçando-se tangentes em diversos pontos da curva e arranjando os pares (t_i, Z_i). Ao passo que a altura da interface clarificado e sedimento (Z_{Li}) são alcançados considerando o instante em que a concentração dos sólidos é homogênea. Essas informações também são obtidas calculando-se a derivada de posição (Z) em relação ao tempo (t) (PEÇANHA, 2014).

A partir do conhecimento prévio obtido pela análise gráfica (**Figura 13**), a vazão de alimentação (Q_A), concentração inicial da suspensão (C_A), concentração da lama espessada (C_E), calcula-se a velocidade em cada ponto (v_i) e sua devida concentração na zona limite (C_i), conforme equações 1 e 2 e conseqüentemente a área de seção transversal (S_i) para cada par de pontos (t_i, Z_i), Equação 3.

$$C_i = \frac{C_A Z_0}{Z_{Li}} \quad (1)$$

$$v_i = \frac{Z_{Li} Z_L}{\theta} \quad (2)$$

$$S_i = \frac{Q_A C_A \left(\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_E} \right)}{v_i} \quad (3)$$

A área mínima exigida para o projeto de sedimentador será aquela que apresenta o maior valor de área (S_i) calculada entre os pares (t_i, Z_i) (GUIMARÃES, 2010).

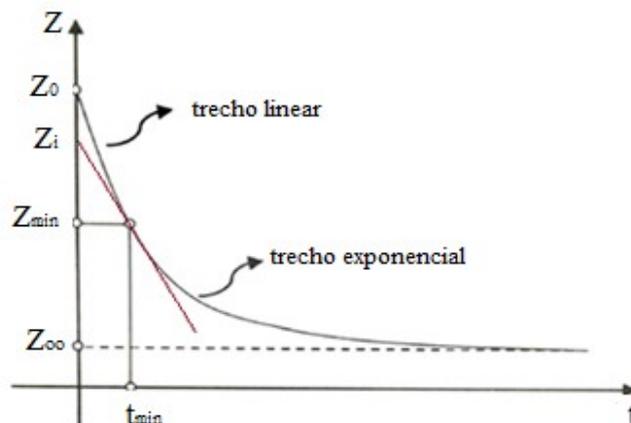
Neste método, há a necessidade de trabalhar a curva na região de transição, para obter a maior área, o que representa uma inconveniência do método (CREMASCO, 2014).

3.3.6.2 Método Biscaia Jr.

Outro método de obtenção das variáveis de projeto dos sedimentadores foi proposto por Biscaia Jr. Ele observou enquanto fazia testes de proveta que parte dos dados tinha uma curva característica e outra parcela tinha perfil linear, e que esses pontos poderiam ser ajustados em uma função exponencial e uma função linear, como apresentado na **Figura 14** (PEÇANHA, 2014).

Pressupondo que se conheçam as variáveis: concentração inicial (C_0), altura inicial (Z_0), concentração da lama espessada (C_E) é possível obter o Z_{\min} conforme Equação 4. A partir dessa informação define o instante de tempo (t_{\min}) associado a essa altura mínima (Z_{\min}) na curva de sedimentação e, por conseguinte, através da Equação 5 obtém a capacidade do projeto $(Q_A/S)_{\text{proj}}$, que significa a vazão máxima de suspensão que pode ser alimentada (Q_A) em determinada área de seção transversal (S) (CREMASCO, 2014; PEÇANHA, 2014).

Figura 14 – Trecho linear e exponencial do teste de proveta.



Fonte: Adaptado de Peçanha (2014).

$$Z_{\min} = \frac{C_0 Z_0}{C_E} \quad (4)$$

$$\left(\frac{Q_A}{S} \right)_{proj} = \frac{Z_0}{t_{\min}} \quad (5)$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad (6)$$

De posse dessas informações obtêm-se o diâmetro e as demais dimensões do modelo do sedimentador utilizando a Equação de área cilíndrica (S), conforme Equação 6.

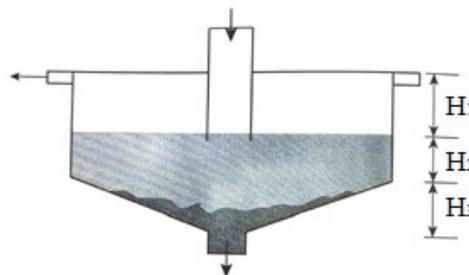
Os métodos de Kynch e Biscaia Jr. apresentam particularidades para o cálculo da área da seção transversal dos sedimentadores, mas não vincula nenhuma particularidade no que diz respeito à obtenção da altura do sedimentador, assim a proposta de cálculo da altura do sedimentador apresentada a seguir pode ser aplicados para ambos os métodos.

3.3.6.3 Altura do sedimentador

A determinação da altura do sedimentador citada em Cremasco (2014) considera que o equipamento seja dividido em três zonas, representados como altura da região de líquido clarificado (H_1), região de espessamento (H_2) e por fim, região de compactação do sedimentador (H_3). Essas regiões estão podem ser visualizadas na **Figura 15**. O somatório dessas zonas fornece a altura do equipamento.

Cremasco (2014) cita que a região H_1 pode variar entre 0,45 e 0,75 m. Usualmente em projetos adota-se o valor médio, portanto, 0,60 m. A região do espessamento pode ser estimada pela Equação 7. E, a região mais profunda do sedimentador através da Equação 8.

Figura 15 – Regiões de separação de altura de um sedimentador.



Fonte: Cremasco (2014).

$$H_2 = \frac{4Q_A C_A t^* (\rho_s - \rho_f)}{3A_{\min} \rho_s (\rho_{esp} - \rho_f)} \quad (7)$$

$$H_3 = 0,073D_{\min} \quad (8)$$

No qual, ρ_s , ρ_f e ρ_{esp} correspondem respectivamente, a massa específica das partículas, massa específica de líquido e a massa específica do espessado e D_{\min} é o diâmetro do sedimentador.

É possível verificar que a altura da região espessada (H_2) é uma função do tempo de residência média dos sólidos (t^*) que pode ser obtido na Equação 9. Em que, o primeiro termo (t_R), trata-se do tempo necessário para atingir a concentração uniforme durante o teste de proveta e o tempo crítico (t_c), deve ser obtido analisando o exato instante que a curva deixar de comportar linearmente (CREMASCO, 2014).

$$t^* = t_R - t_c \quad (9)$$

Conhecendo o tempo de residência média (t^*), obtém a altura do sedimentador através do somatório das três regiões mencionadas (H_1 , H_2 e H_3).

4 METÓDOS

A partir dos aspectos apresentados na fundamentação teórica foi desenvolvido o produto “Projetando Equipamentos da Indústria Química (PEIQ)”. Trata-se de um *software* aplicativo educacional, desenvolvido em tecnologia híbrida, utilizando *frameworks open source* com programação apenas no *front-end*, portanto, sem armazenamento de dados.

O aplicativo foi idealizado na versão inglesa e portuguesa para atingir maior abrangência de usuários pelo mundo. Para que ocorresse seu desenvolvimento, utilizou-se o sistema operacional Windows 10. A configuração inicial consistiu na instalação dos *frameworks* Ionic na versão 4.0.6, AngularJs 6.1.0, Cordova 8.0.0 e o Android Studio 3.1.3. Este último foi a IDE definida para disponibilização do aplicativo em tecnologia Android, conforme recomendado pelo repositório de aplicativos, o Google *Play Store*.

O aplicativo foi estruturado para funcionar em plataforma Android e *Web* e tem como público alvo: docentes, acadêmicos de engenharia química e profissional desta área de atuação ao redor do mundo. É importante ressaltar que a sua utilização requer conhecimento prévio sobre os temas abordados.

A primeira etapa de desenvolvimento do aplicativo foi estruturar a ideia do projeto em módulos e definir a interface para com os usuários de maneira a tornar o contato com a ferramenta simples e intuitiva. Assim, o “PEIQ” foi organizado em dez módulos, sendo seis destinados aos equipamentos industriais. Destes, três estão relacionados à separação de sólido-fluido na presença de campo gravitacional. São eles: câmara de poeira, elutriador e

sedimentador e os demais à separação sólida em fluido na atuação do campo centrífugo, como a centrífuga, ciclone e hidrociclone. Os outros módulos são destinados as páginas informativas ou de complementação denominadas “Página inicial”, “Contatos”, “Sobre” e “Conversão de unidades” conforme **Figura 16**.

Figura 16 – Informações dos módulos contemplados no aplicativo.



Fonte: Da Autora (2019).

Todos os módulos destinados aos equipamentos de separação foram padronizados de forma a apresentar botões para realização de cálculos, informações, limpeza de dados e geração de arquivo em formato PDF, como mostra a **Figura 17**.

O botão “Limpar” foi idealizado para retirar todos os dados informados pelo usuário na tela, ou seja, retornar a página ao estado inicial. O botão “Informações” teve como propósito disponibilizar aos usuários o conceito principal do equipamento, aplicação no processo industrial, as equações abordadas e o caminho para realização dos cálculos de projeto. Com o acesso a essas informações, os usuários têm melhor compreensão dos métodos aplicados aos equipamentos uma vez que contem o caminho e as expressões matemáticas envolvidas nos cálculos do aplicativo. Todo o material informativo que consta no aplicativo pode ser consultado no Apêndice A.

Figura 17 – Organização estrutural dos módulos de equipamentos industriais.

The image shows a mobile application interface for a dust chamber. At the top, there is a back arrow and the title 'Câmara de Poeira'. Below the title, there is a section for 'Propriedades do fluido' with several input fields: 'Viscosidade (cP):', 'Densidade (g/cm³):', 'M molar(g/mol):', 'P(atm):', and 'T (°C):'. A note '*Informe densidade OU dados abaixo:' is placed between the density and molar mass fields. At the bottom of the form area is a blue button labeled 'CALCULAR'. Below this are three smaller blue buttons: 'INFORMAÇÕES', 'LIMPAR', and 'PDF'. The bottom of the screen shows the standard Android navigation bar with back, home, and recent apps icons.

Fonte: Da Autora (2019).

O módulo denominado “Página Inicial” não pareceu na lista lateral do aplicativo, porém, essa tela atua automaticamente ao iniciar a ferramenta trazendo informações como o nome e logomarca do aplicativo (**Figura 18a**). Toda vez que um dos módulos é fechado, o aplicativo retorna a “Pagina Inicial” de onde o usuário tem a opção de continuar a utilizá-lo através do acesso ao “Menu”.

A aba “Contatos”, representada na **Figura 18b**, disponibiliza os meios de contatos com desenvolvedor em caso de sugestões, dúvidas, reclamações de falhas e/ou problemas técnicos do aplicativo.

A aba “Sobre” pontua informações básica do objetivo do aplicativo, os equipamentos abordados, autoria, versão e data de lançamento, como visto na **Figura 18c e 18d**.

A funcionalidade apresentada através do botão “PDF” possibilita aos usuários realizar o *download* das informações apresentadas na tela do *smartphone* em formato PEIQ_equipamento_dataatual.pdf para que possa ser compartilhado ou impresso.

Durante o processo de desenvolvimento do “PEIQ” foram consideradas as contribuições de diversos autores, entre eles, Cremasco (2014), Massarani (2002), Peçanha (2014), Svarovsky (2000), Geankoplis (2010), Castilho e Medronho (2010) que formaram a base teórica dos métodos de dimensionamento dos equipamentos abordados nesta aplicação e suas particularidades. É importante ressaltar, que os usuários precisam atentar as unidades de medidas adotadas em cada módulo. Caso essas informações não estejam nas unidades de medidas exigidas pelo aplicativo, o usuário tem a opção de recorrer o módulo de “Conversão

de unidades” disponibilizada no próprio aplicativo. Esse módulo permite a conversão de unidades de comprimento, área, massa, temperatura, velocidade, massa específica, viscosidade, vazão, pressão e potência.

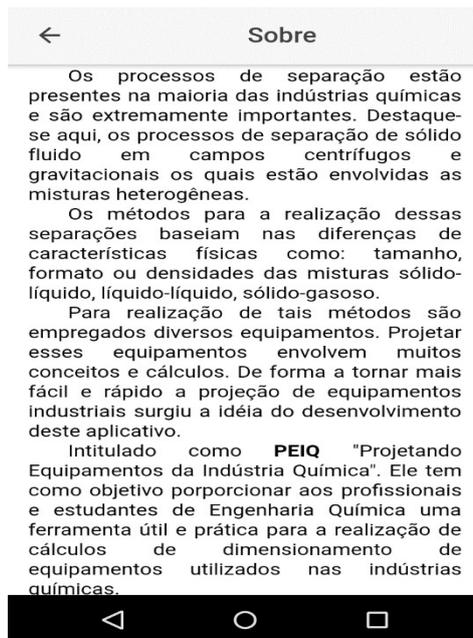
Figura 18 – Páginas Inicial (a), Contatos (b), Sobre (c e d).



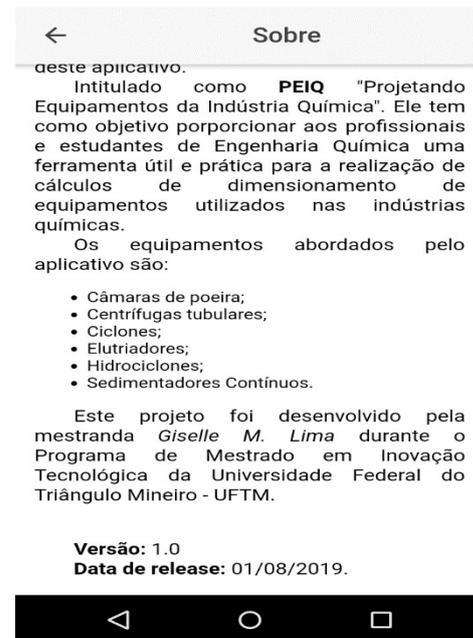
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Da Autora (2019).

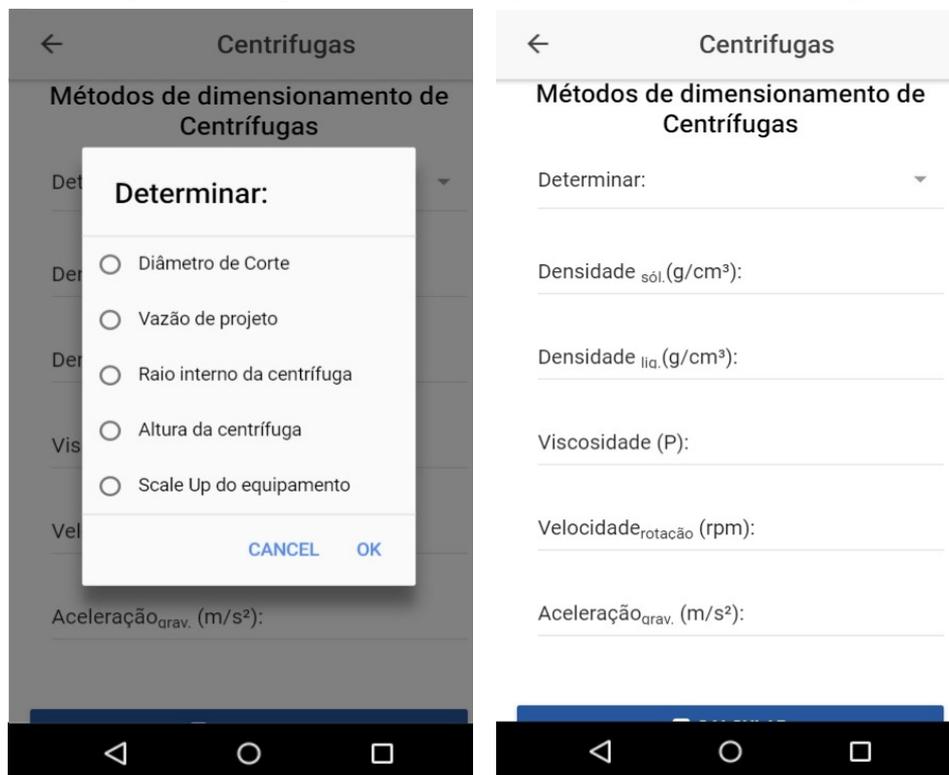
4.1 MÓDULO CENTRÍFUGA

O método aplicado ao dimensionamento de centrífugas tubulares baseou-se em material apresentado por Svarovsky (2000), Peçanha (2014), Silva e Santos (2017) e Cremasco (2014).

Ao analisar as atividades propostas em alguns desses materiais, notou-se que existiam particularidades que inviabilizaria uma coleta única de dados, uma vez que os projetos de centrífuga tubular buscam informações das variáveis de projeto como altura (L), raio interno (R_{int}), raio de alimentação da suspensão (R_0), vazão de alimentação (Q_A), ou ainda do diâmetro de corte (D^*). Portanto, o processo para obtenção dos dados desse módulo vinculou-se a opção escolhida pelo usuário e a finalidade dos cálculos.

O módulo foi organizado para exibir por padrão as variáveis de processo que remetem as características físicas dos sólidos e do fluido, tais como: massas específicas da partícula (ρ_s) e do fluido (ρ_f), viscosidade do fluido (μ), variáveis operacionais como velocidade rotacional (ω) e aceleração da gravidade (g) e as opções de funcionalidades conforme exibida na **Figura 19**.

Figura 19 – Apresentação do Layout do módulo “Centrífuga”.



Fonte: Da Autora (2019).

Nota-se na **Figura 19** que as opções disponíveis para o módulo “Centrífuga” são a determinação do diâmetro de corte (D^*), vazão (Q_A), raio interno da centrífuga (R), altura do equipamento (L) e a ampliação de escala “Scale Up”. Com exceção da opção *Scale Up*, em todas as demais opções foram apresentadas a grade de eficiência do projeto, o diâmetro máximo e mínimo que podem ser coletados nessas condições e o fator sigma (Σ). De acordo com a opção selecionada pelo usuário, o aplicativo adiciona campos complementares para os cálculos, tais como vazão, altura, raio interno e de alimentação do equipamento.

De acordo com Peçanha (2014), o diâmetro de corte (D^*) é o diâmetro das partículas que podem ser depositados no fundo do equipamento e posteriormente, coletados considerando uma eficiência de processo em 50%.

De forma a simplificar os cálculos neste módulo trabalhou considerando partículas esféricas (esfericidade igual a 1) e o processo obedecendo ao regime de Stokes. Segundo Svarovsky (2000) ao atender essas hipóteses as opções de determinação do D^* , Q_A , R_{int} , L podem ser obtidos através de manipulações da Equação 10, em que K é determinado na Equação 11.

$$(D^*)^2 = \left(\frac{Q_A}{2\pi LK} \right) \ln \left[\frac{2R_{int}^2}{R_{int}^2 + R_0^2} \right] \left(\frac{1}{R_{int}^2 - R_0^2} \right) \quad (10)$$

$$K = \frac{(\rho_s - \rho_f)\omega^2}{18\mu} \quad (11)$$

Ao manipular a Equação 10 para obtenção do raio interno (R_{int}), conforme apresentada na Equação 12, notou-se que R_{int} estava implicitamente expresso, portanto, não pode ser obtido de forma direta. Para solucionar essa situação, empregou-se um processo iterativo adotando como valor inicial de verificação, o valor do raio de alimentação com incremento de 0,001 até obter uma igualdade de valores entre os lados direito e esquerdo da Equação 12. Para verificar essa igualdade adotou-se a análise apenas de três casas decimais para ambos os lados.

$$\frac{(D^*)^2}{\left(\frac{Q_A}{2\pi LK} \right)} = \ln \left[\frac{2R_{int}^2}{R_{int}^2 + R_0^2} \right] \left(\frac{1}{R_{int}^2 - R_0^2} \right) \quad (12)$$

Ao analisar as configurações geométricas das centrífugas tubulares, Peçanha (2014) observou que o raio da bacia é muito maior que raio de alimentação ($R_{int} \gg R_0$), a partir disso, conclui que não havia variação do campo centrífugo, logo o produto $\omega^2 R_{int}$ seria constante. Essa constatação possibilitou estimar um diâmetro mínimo (D_{min}) correspondente a captura da

menor partícula retida com eficiência de 100%, independentemente da posição em que ela entra no equipamento. Assim, para obter o diâmetro mínimo utilizou a Equação 13 (PEÇANHA, 2014).

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{9\mu Q_A}{\pi R_{\text{int}}^2 L (\rho_s - \rho_f) \omega^2}} \quad (13)$$

Por fim, obtidas as informações pertinentes ao projeto de uma centrífuga, as variáveis de processo e operacionais, este módulo ainda apresenta a grade de eficiência individual de coleta das partículas na centrífuga (SVAROVSKY, 2000). Para a construção da grade de eficiência foram empregadas as Equações 11, 14, 15 e 16. Observa-se na Equação 14 que a eficiência individual de coleta ($G(D)$) é dependente de K (Equação 11), K_2 (Equação 15) e do diâmetro máximo de coleta ($D_{\text{máx}}$), descrito pela Equação 16 (SILVA; SANTOS, 2017).

$$G(D) = \frac{1 - e^{(-2KK_2D^2)}}{1 - 2^{(-2KK_2D_{\text{máx}}^2)}} \quad (0 \leq x \leq D_{\text{máx}}) \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{\pi L (R^2 - R_0^2)}{Q_A} \quad (15)$$

$$D_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{Q_A \ln\left(\frac{R_{\text{int}}^2}{R_0^2}\right)}{\pi L K (R_{\text{int}}^2 - R_0^2)}} \quad (16)$$

Outro critério importante empregado no módulo é o estabelecimento dos parâmetros para a ampliação de escala do processo de centrifugação, chamado de fator sigma (Σ). Esse fator relaciona as configurações, dimensões e a rotação do equipamento, sendo expressa numericamente através da Equação 17 (CREMASCO, 2014).

$$\Sigma = \frac{\pi L \omega^2 (R_{\text{int}}^2 - R_0^2)}{g \ln\left(\frac{R_{\text{int}}^2}{R_0^2}\right)} \quad (17)$$

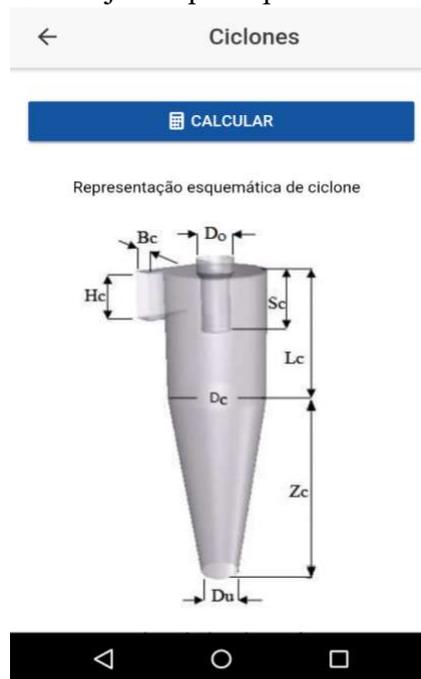
Ao conhecer as informações de vazão e fator sigma de uma centrífuga, os cálculos de ampliação de escala (*Scale Up*) foram realizados a partir das informações de uma centrífuga em escala de laboratório determinando-se assim as condições operacionais e geométricas de outra centrífuga em escala industrial. Considerou-se neste processo que as centrífugas envolvidas sejam do mesmo tipo e operando com o mesmo material de alimentação, conforme recomendações feitas em Massarani (2002). A Equação 18 expressa a relação de ampliação de escala de uma centrífuga tubular de laboratório para uma centrífuga industrial.

$$\left(\frac{Q_A}{\Sigma}\right)_{\text{banca}} = \left(\frac{Q_A}{\Sigma}\right)_{\text{industrial}} \quad (18)$$

4.2 MÓDULO CICLONE

O módulo “Ciclone” visou a obter as configurações geométricas representadas na **Figura 20**, conforme particularidades de cada família. As configurações foram mencionadas anteriormente na **Tabela 2** considerando a altura da parte cilíndrica (L_c), altura da parte cônica (Z_c), o diâmetro da parte cilíndrica (D_c), comprimento do tubo de saída (*vortex finder*) (S_c), o diâmetro da corrente de saída dos particulados ou *underflow* (D_u), o diâmetro do tubo de saída do fluido conhecido também como saída no *overflow* (D_o), altura do tubo de alimentação (H_c) e a largura do mesmo do tubo de alimentação (B_c).

Figura 20 – Objetivo principal do módulo Ciclone.

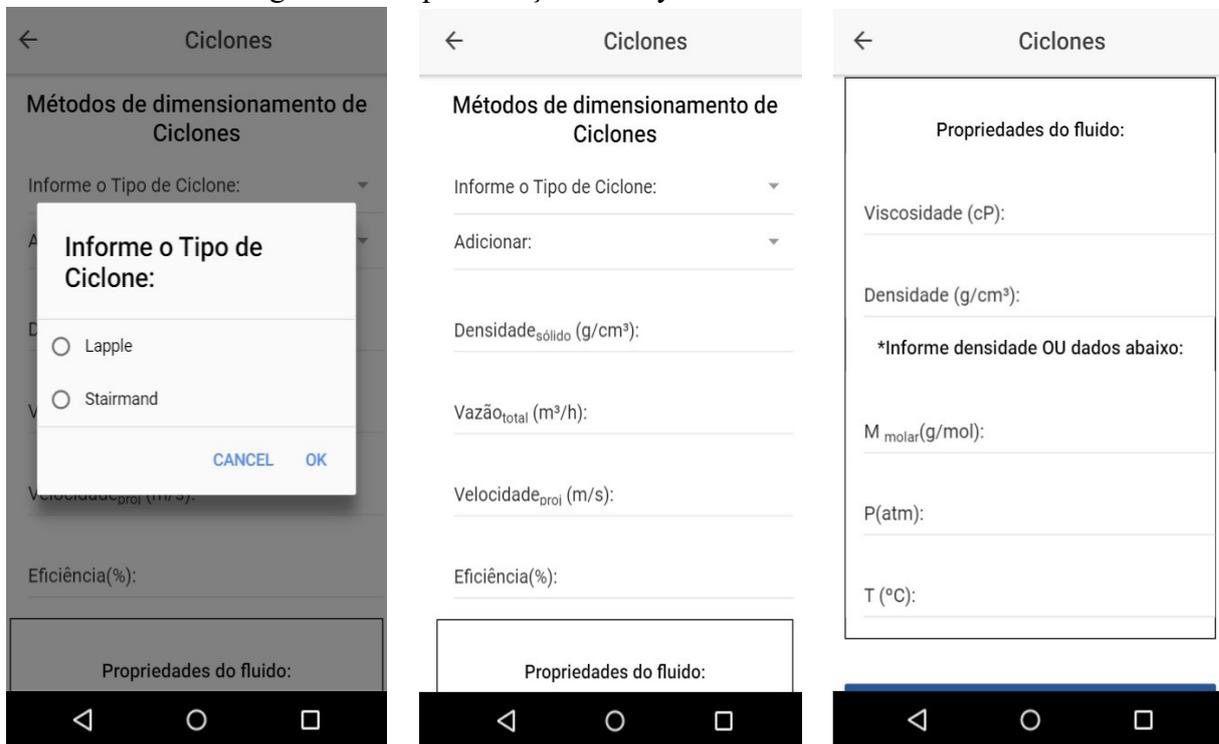


Fonte: Da Autora (2019).

Para atingir os objetivos deste módulo, foi estabelecido a escolha de opção entre configuração Lapple ou Stairmand. Após essa definição, foram conduzidos a informar a densidade das partículas (ρ_s), eficiência esperada (η) e vazão da alimentação (Q_A), além dos dados das propriedades do fluido gasoso. Neste caso, o aplicativo permitiu ao usuário informar a viscosidade (μ) e a massa específica do fluido (ρ_f) ou, ao invés desta última

variável, os parâmetros para sua obtenção, tais como a massa molar (M_{molar}), pressão (P) e temperatura (T) conforme a interface apresentada na **Figura 21**.

Figura 21 – Apresentação do Layout do módulo “Ciclone”.



Fonte: Da Autora (2019).

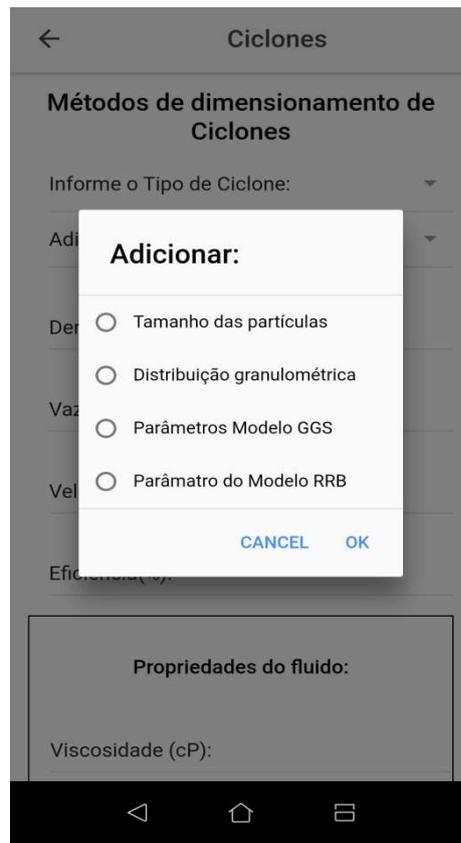
Ainda, considerando a interface do aplicativo com o usuário, cabe a ele, a definição do procedimento adotado para a obtenção do diâmetro de corte (D^*) do equipamento. Importante variável obtida por caminhos distintos, sendo fornecida uma lista com quatro opções apresentadas na **Figura 22**.

Após capturar as informações coletadas na tela do aplicativo, verifica a inclusão da massa específica do fluido ou dos parâmetros para seu cálculo. Neste o último caso, utilizou a Equação 19, em que a pressão (P), massa molar do fluido gasoso (M_{molar}) e a temperatura (T) foram informadas pelo usuário.

$$\rho_f = \frac{P M_{molar}}{R T} \quad (19)$$

Na etapa seguinte obtêm-se o diâmetro de corte (D^*). O aplicativo permite quatro opções de cálculos conforme **Figura 22**. Dependendo da escolha do usuário solicitam-se informações adicionais.

Figura 22 – Opções para determinação do diâmetro de corte para o módulo Ciclone.



Fonte: Da Autora (2019).

Para o caso da Opção 1, “Tamanho médio das partículas”, o aplicativo aplicou a Equação 20 para obter o D^* .

$$\eta = \frac{\left(\frac{D_p}{D^*} \right)^2}{1 + \left(\frac{D_p}{D^*} \right)^2} \quad (20)$$

Ao escolher a Opção 2, “Distribuição granulométrica”, solicitou ao usuário a tabela de distribuição granulométrica. De acordo com Cremasco (2014), independentemente do modelo de distribuição granulométrica, ele pode ser escrito na forma de função $X = X(D)$, portanto, em função do diâmetro. As equações 21 e 22 representam respectivamente, os modelos de distribuição granulométrica RRB e GGS. Esses modelos foram linearizados e apresentados na forma das equações 23 e 24, respectivamente.

$$X_i = 1 - e^{-\left(\frac{D_p}{k} \right)^n} \quad (21)$$

$$X_i = \left(\frac{D_p}{k} \right)^n \quad (22)$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - X_i} \right) \right] = n \ln[D_i] - n \ln[k] \quad (23)$$

$$\log[X_i] = n \log[D_i] - n \log[k] \quad (24)$$

Conhecendo a forma linearizada dos modelos e aplicando o método de mínimos quadrados e eliminação de Gauss, procedimentos apresentados nos anexos III e IV obtêm-se os parâmetros do modelo e, por conseguinte, o coeficiente de correlação da equação linear (R^2). Com essas informações, o aplicativo verifica o melhor ajuste analisando os respectivos coeficientes de correlação (R^2). A escolha correta do modelo é determinante na definição dos parâmetros empregados nos cálculos de projeto do equipamento (CREMASCO, 2014).

Diante dos parâmetros dos modelos, n e k ou D_i , as Equações 21 e 22 foram reorganizadas, isolando o D_p . Em seguida, substituiu na Equação 20 e aplicou a integração como apresentado na Equação 25. Os autores Cremasco (2014) e Massarani (2002), pontuam que além da Equação 25, uma solução analítica pode ser empregada (Equação 26), porém, apenas no caso do modelo RRB.

$$I = \int_0^1 \eta dX \quad (25)$$

$$I = \frac{\frac{1,11n}{0,118+n}}{1,81-0,322n+\left(\frac{k}{D^*}\right)} \left(\frac{k}{D^*} \right) \quad (26)$$

Para o caso do modelo GGS, não existe uma equação como no modelo RRB (Equação 26). A solução encontrada foi empregar o conceito da integral definida através do cálculo da área sob a curva. Para a realização deste cálculo primeiramente, manipulou a Equação 21 de forma a obtê-la em função do D_p substituindo na Equação 20 e em seguida, na Equação 25. Adotou-se inicialmente o diâmetro de corte como sendo o diâmetro inicial da tabela de distribuição granulométrica ou no caso da opção 3 o valor de 0,01. Segmentou o intervalo de integração em 0,1 e aplicou método numérico conhecido como a regra de trapézio para obter o diâmetro de corte correspondente.

Para as Opção 3 e 4, “Parâmetros do modelo GGS ou RRB”, o processo foi ainda mais simples que o anterior, pois o usuário forneceu os parâmetros do modelo de distribuição.

Logo, os parâmetros foram moldados em função do D_p (Equação 20) obtendo o diâmetro de corte através da Equação 25 ou 26, de acordo com as recomendações para cada modelo.

Definido o diâmetro de corte, o processo de dimensionamento passou a ser único para todas as opções. E consistiu em determinar a vazão de projeto e o diâmetro cilíndrico teórico através das Equações 27 e 28. Os parâmetros B_c , H_c e K foram fixados de acordo com o tipo de ciclone e constam na **Tabela 5**.

$$Q = u_c B_c H_c \quad (27)$$

$$\frac{D^*}{D_c} = K \sqrt{\frac{\mu D_c}{Q(\rho_s - \rho_f)}} \quad (28)$$

Nota-se na Equação 28 a dependência da vazão (Q). Conforme recomendações de Massarani (2002), a vazão foi definida através da Equação 27 no qual o usuário informou a velocidade de projeto (u_c). Esse valor deve permanecer na faixa de 5 a 20 m s^{-1} para ciclones Lapple ou entre 10 e 30 m s^{-1} para o modelo Stairmand.

Tabela 5 – Configurações e parâmetros para ciclones Lapple e Stairmand.

Ciclone	B_c/D_c	H_c/D_c	K	β	U
Lapple	0,25	0,50	0,095	315	5 a 20 m s^{-1}
Stairmand	0,20	0,50	0,041	400	10 a 30 m s^{-1}

Fonte: Adaptado de Massarani (2002).

Os ciclones também podem ser agrupados em paralelo ou em série para melhorar a eficiência de coleta. A configuração em paralelo permite que o sistema opere com maior capacidade de recuperação de particulados, logo, melhor eficiência de coleta em função do aumento da velocidade de alimentação em cada equipamento (CREMASCO, 2014).

Considerando a organização em paralelo dos ciclones, a quantidade de equipamentos alinhados foi determinado utilizando a Equação 29. No qual, a variável Q_A presente na Equação 29, referenciou à vazão de alimentação do processo fornecido pelo usuário.

$$N_{\text{ciclones}} = \frac{Q_A}{Q} \quad (29)$$

Para os casos em que número de ciclones seja maior que uma unidade, o aplicativo automaticamente aloca-os em paralelos. Para essa situação, considerou o número de ciclones o número inteiro superior mais próximo. A vazão de alimentação (Q_A) foi repartida igualmente entre os ciclones paralelos. A partir dessa manobra, recalculou-se o valor de D_c conforme Equação 30, levando em consideração a variável Q calculada a partir da Equação 27.

$$Q = \frac{Q_A}{N_{\text{ciclone}}} \quad (30)$$

Após recalcular D_c , as demais dimensões foram obtidas respeitando as relações geométricas abordadas na **Tabela 2**.

Outras variáveis operacionais importantes no aplicativo é a queda de pressão e, por conseguinte, a potência total do soprador (W). Além destas, destaca-se o parâmetro β , o número de Euler, no qual fornece a relação da queda de pressão do ciclone em função da energia cinética. Quanto maior o número de Euler, maior a necessidade energética. Este parâmetro é dependente da geometria do ciclone.

Segundo Massarani (2002), as expressões 31 e 32 relacionam a queda de pressão à vazão de operação dos ciclones. Considerou a eficiência elétrica de um motor na ordem de 50% ($\varepsilon = 0,5$) definindo a potência do soprador através da Equação 33 (MASSARANI, 2002).

$$-\Delta P = \frac{\beta \rho_f u_c^2}{2} \quad (31)$$

$$u_c = \frac{4Q_A}{\pi D_c^2} \quad (32)$$

$$W_{\text{paralelo}} = \frac{Q_A (-\Delta p)}{\varepsilon} \quad (33)$$

Em que, β tem valor tabelado e foi fornecida na **Tabela 5**, a velocidade operacional (u_c) também tem limitações conforme apresentado na **Tabela 5**. A vazão (Q_A) foi convertida no aplicativo para unidade $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; a queda da pressão ($-\Delta p$) em pascal e a potência do soprador resultaram na unidade (W) que posteriormente, foram exibidos para o usuário na unidade cavalo-vapor (cv).

4.3 MÓDULO HIDROCICLONE

A separação de partículas em hidrociclones ocorre por atuação de força no campo centrífugo resultante da configuração do equipamento e da corrente de alimentação (CREMASCO, 2014).

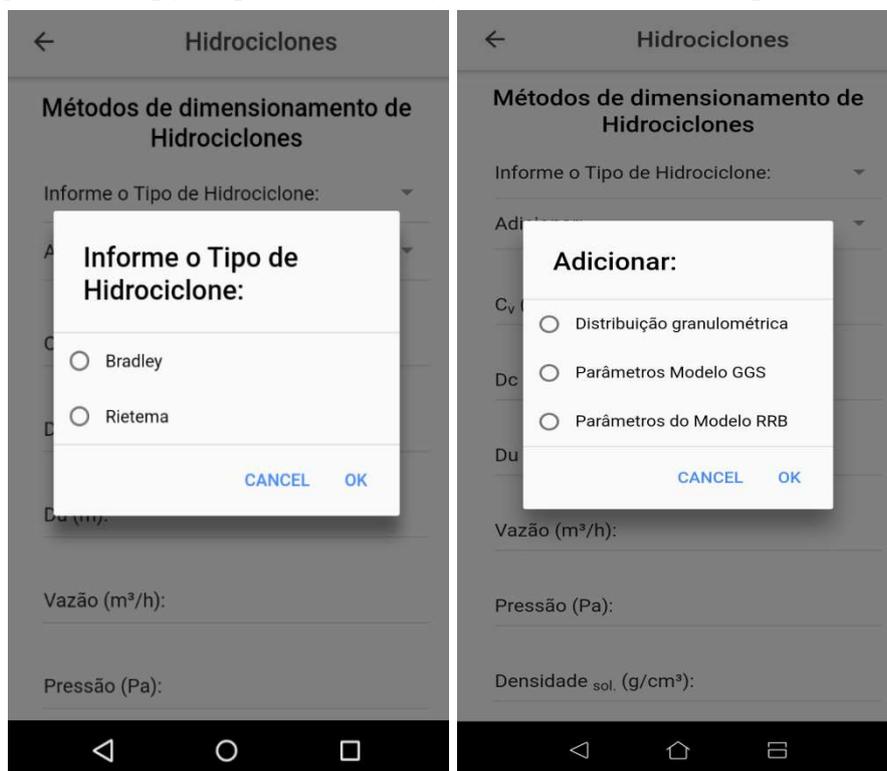
A análise de um hidrociclone consiste em definir a configuração do equipamento, a partir do diâmetro de corte (D^*) e com isso obter as dimensões geométricas detalhadas na **Tabela 3** e **Figura 7**. Estabelecido D^* determina-se a eficiência do processo e a concentração do produto final retirado na corrente *underflow* (PEÇANHA, 2014).

O módulo de dimensionamento de hidrociclone no PEIQ foi desenvolvido para trabalhar com geometrias Bradley ou Rietema. Neste módulo, o usuário precisa fornecer ao aplicativo informações de concentração volumétrica de alimentação (C_v), diâmetros da parte cilíndrica (D_c) e do *underflow* (D_u), vazão do processo (Q_A), pressão (P), viscosidade do fluido (μ), massas específicas do fluido (ρ_f) e das partículas (ρ_s).

De forma semelhante ao módulo “Ciclone”, o aplicativo exibe opções de determinação de diâmetro de corte resultando em campos complementares do qual o usuário precisa informar primeiramente qual família de hidrociclone. Cabe ao usuário escolher ainda a distribuição granulométrica para ajustes nos modelos GGS ou RRB ou os parâmetros dos modelos. Essas opções estão apresentadas na **Figura 23**.

O processo de ajuste por distribuição granulométrica foi realizado igualmente ao módulo anterior, utilizando as equações linearizadas 20 e 21 e os anexos III e IV, obtendo consequentemente os parâmetros n e k dos modelos de distribuição granulométrica e seus respectivos variância (R^2), conforme apresentado no anexo IV.

Figura 23 – Opções para determinação do diâmetro de corte para hidrociclone.



Fonte: Da Autora (2019).

Este módulo foi baseado em procedimentos citados em Massarani (2002), Peçanha (2014) e por Castilho e Medronho (2000). Os últimos autores sugeriram um dimensionamento

fundamentado em trabalhos publicados por Medronho em 1984 e por Antunes e Medronho em 1992.

4.3.1 Proposta apresentada por Massarani (2002)

Após a concessão das informações solicitadas no aplicativo para o método descrito por Massarani (2002), o dimensionamento de hidrociclone iniciou-se com a determinação da vazão de projeto (Q_{proj}), para isso, determinou a velocidade do projeto (u_c) através da Equação 34. Em seguida, a Equação 35 permitiu obter a vazão. Observa-se na Equação 34 a presença do parâmetro β . Este parâmetro foi apresentado por Massarani (2002) e encontra-se disponível para consulta na **Tabela 6**. Estabelecido a vazão de projeto determinou-se o diâmetro de corte (D^*) através da Equação 36.

$$\beta = \frac{(-\Delta p)}{\frac{\rho u_c^2}{2}} \quad (34)$$

$$Q_{proj} = \frac{\pi u_c D_c^2}{4} \quad (35)$$

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q_A (\rho_s - \rho_f)} \right]^{0.5} f(R_L) g(C_v) \quad (36)$$

Ao reparar na Equação 36 percebeu a presença de $g(C_v)$ e $f(R_L)$. Este é um fator corretivo, denominado Razão de Líquido (R_L) aplicado ao dimensionamento do diâmetro de corte em razão uma parcela de partículas coletadas no *underflow* não terem sido ali depositado por atuação da força centrífuga. E aquele, é um fator que integra a concentração volumétrica da alimentação ao processo (MASSARANI, 2002). A aplicação dos fatores de correção foi realizada através das equações 37 e 38, respectivamente.

$$g(c_v) = \frac{1}{\sqrt{4,8(1-c_v)^2 - 3,8(1-c_v)}} \quad (37)$$

$$f(R_L) = 1 + AR_L \quad (38)$$

$$R_L = B \left(\frac{D_u}{D_c} \right)^c \quad (39)$$

De acordo com a Equação 38, o fator de correção $f(R_L)$ associa a razão entre a vazão no *underflow* com a vazão de alimentação através do parâmetro R_L (MASSARANI, 2002). Para obter essa relação foi empregada a Equação 39.

As equações 34 a 39 necessitam dos parâmetros A , B , C , β e K associados a cada configuração de hidrociclone. Esses parâmetros foram apresentados por Massarani (2002) e encontra-se na **Tabela 6**.

Tabela 6 – Parâmetros de configuração de hidrociclones Bradley e Rietema.

Hidrociclone	β	K	A	B	C
Bradley	7500	0,016	1,73	55,3	4,75
Rietema	1200	0,039	1,73	145	2,63

Fonte: Adaptado de Massarani (2002).

Outra característica do projeto de hidrociclone contemplado no PEIQ foi a verificação da necessidade de atuação dos equipamentos em paralelo visando a melhorias no processo. Para esta análise aplicou a Equação 40, em que a vazão alimentada no processo (Q_A) foi informada pelo usuário e a vazão obtida através da Equação 35, identificada como Q .

$$N_{hidrociclones} = \frac{Q_A}{Q} \quad (40)$$

Segundo Peçanha (2014), de forma análoga aos ciclones, o desempenho dos hidrociclones também pode ser validado através da eficiência global de coleta (E_{global}) desde que conhecidos a vazão, a concentração de sólidos em suspensão e as distribuições granulométricas ou modelos de distribuição granulométrica. Para o cálculo da eficiência global de coleta (E_{global}), empregou a Equação 41, em que a eficiência de coleta no campo centrífugo (I) e a eficiência individual (η) foram obtidas empregando as equações 42 e 43.

$$E_{global} = (1 - R_L)I + R_L \quad (41)$$

$$I = \int_0^1 \eta dX \quad (42)$$

$$\eta = \frac{e^{\left(\frac{5Dp}{D^*}\right)^2 - 1}}{1 + e^{\left(\frac{5Dp}{D^*}\right)^2 + 146}} \quad (43)$$

Assim como nos ciclones, Massarani (2002) afirma que a Equação 42 quando aplicada ao modelo de distribuição granulométrica RRB, pode ser substituída pela Equação 44. Logo, para esse caso, I foi determinado pela Equação 44. Considerando k e n os parâmetros do modelo RRB.

$$I = \frac{\frac{1,13n}{0,138 + n}}{1,44 - 0,279n + \left(\frac{k}{D^*}\right)} \left(\frac{k}{D^*}\right) \quad (44)$$

Caso em que a Equação 44 não se aplica obteve-se I conforme o conceito de integração, área sob a curva de distribuição. Para isso, separou a curva obtida em função de dX (Equação 42) em pequenos trapézios com largura 0,1 dentro do intervalo de 0 a 1 conforme apresentado na equação. Em seguida, empregou o método numérico conhecido como regra do trapézio e obteve a eficiência de coleta no campo centrífugo (I). Por fim, a concentração volumétrica no *underflow* (c_{vu}) foi obtida combinando-se as Equações 41 e 45.

$$C_{vu} = \frac{E_{global} C_v}{R_L - R_L C_v + E_{global} C_v} \quad (45)$$

4.3.2 Proposta de Medronho (1984) e Antunes e Medronho (1992)

Segundo Peçanha (2014), nos hidrociclones atuam dois efeitos simultâneos, o que dificulta a análise de desempenho deste equipamento. Assim sendo, Castilho e Medronho (2000) sugeriram avaliar os hidrociclones baseando-se em estudos experimentais. Nestes estudos são contemplados três grupos de interesse, número de Stokes (Stk^*), número de Euler (Eu) e número de Reynolds (Re) para a definição da configuração geométrica dos hidrociclones, conforme apresentados na **Tabela 3** e **Figura 7** (CASTILHO; MEDRONHO, 2000).

A partir de alguns trabalhos experimentais foram propostos correlações. Dentre as correlações, optou-se por reproduzir a metodologia apresentada por Castilho e Medronho (2000) e também contemplando em Peçanha (2014). As correlações foram desenvolvidas por Medronho em 1984 para a geometria Rietema e para os hidrociclones Bradley foram incrementados por Antunes e Medronho em 1992.

Após as informações prestadas pelo usuário, a primeira etapa de dimensionamento de hidrociclones foi definir a vazão (Q) amparada pela Equação 46 para a família Bradley ou Equação 47 para Rietema (PEÇANHA 2014; CASTILHO; MEDRONHO, 2000).

$$D_c = \frac{3,5 \rho_f^{0,31} Q^{0,54}}{\mu^{0,085} \Delta p^{0,23}} \quad (46)$$

$$D_c = \frac{4,0 \rho_f^{0,27} Q^{0,51}}{\mu^{0,028} \Delta p^{0,24}} \quad (47)$$

A partir do conhecimento da vazão (Q), e se conhecido a vazão de alimentação do processo (Q_A) definiu-se o número de hidrociclones que devem ser agrupados em paralelos para melhor desempenho do sistema. Para essa finalidade empregou novamente a Equação 40.

O procedimento seguinte visou a determinação do diâmetro de corte (D^*). Segundo Svarovsky (2000), para certa geometria, os equipamentos contêm as mesmas proporções geométricas entre o número de Stokes e o número de Euler ($Stk * Eu$) e são aproximadamente constantes e estão representados pela Equação 48.

$$Stk * Eu = \frac{\pi D^{*2} (-\Delta p) D_c (\rho_s - \rho_f)}{\mu \rho_f Q_A} \quad (48)$$

Em que, o diâmetro de corte é representado por D^* , a queda de pressão por $-\Delta p$, o diâmetro da parte cilíndrica (D_c), ρ_s e ρ_f tratam-se respectivamente, da massa específica das partículas e do fluido e a vazão de projeto (Q). Esta última variável obtida utilizando as Equações 46 ou 47 conforme determinação da configuração geométrica estabelecida.

De modo a obter a relação $Stk * Eu$ empregou-se as Equações 49 a 52. Em que, os parâmetros $k_1, k_2, k_3, n_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$ foram apresentados na **Tabela 7**. Considerando Cv a concentração volumétrica de alimentação, D_u e D_c respectivamente, o diâmetro do duto do *underflow* e o diâmetro cilíndrico. Após aplicar as equações abaixo, o diâmetro de corte (D^*) foi obtido igualando as Equações 48 e 49.

$$Stk * Eu = k_1 \left[\ln \frac{1}{R_L} \right]^{n_1} e^{(n_2 C_v)} \quad (49)$$

$$Eu = k_2 Re^{n_3} e^{(n_4 C_v)} \quad (50)$$

$$R_L = k_3 \left[\frac{D_u}{D_c} \right]^{n_5} Eu^{n_6} \quad (51)$$

$$Re = \frac{4 \rho_f Q}{\pi \mu D_c} \quad (52)$$

Tabela 7 – Parâmetros equacionais para configuração Bradley e Rietema.

Parâmetros	Bradley	Rietema
k_1	0,0550	0,0474
k_2	258,0	371,5
k_3	$1,21 \times 10^6$	1218
n_1	0,66	0,74
n_2	12,0	9,0
n_3	0,37	0,12
n_4	0	-2,12
n_5	2,63	-1,12
n_6	4,75	-0,30

Fonte: Adaptado de Castilho e Medronho (2000).

Conhecendo o diâmetro de corte, as dimensões do hidrociclone foram apresentadas respeitando as proporções divulgadas na **Tabela 3**.

Outra análise contemplada em ambos os métodos de dimensionamento de hidrociclones é a concentração do produto que sai na corrente *underflow* (c_{vu}). Sua determinação ocorreu por intermédio da análise de eficiência global de coleta (E_{global}).

Para obter a E_{global} , primeiramente definiu a eficiência individual de coleta (E_i) integrando a função da Grade eficiência ($G'(X)$), conforme Equação 53 (CASTILHO; MEDRONHO, 2000). Em que X corresponde a equação de modelo de distribuição granulométrica RRB ou GGS, mencionadas nas Equações 21 e 22.

Neste caso, empregou unicamente o conceito de integral. Assim sendo, a eficiência global (E_{global}) foi determinada de acordo com a Equação 54. E, por conseguinte, utilizou-se a Equação 54 para definir a concentração volumétrica na corrente *underflow* (c_{vu}) descrita pela Equação 45.

$$E_i = \int_0^1 G'(X) dX \quad (53)$$

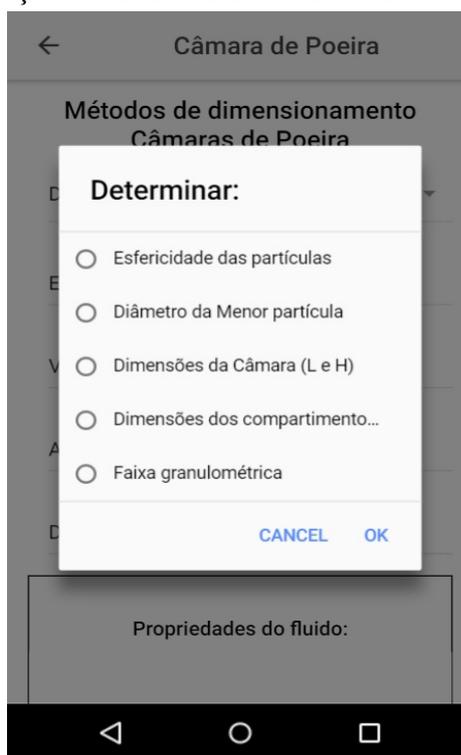
$$E_{global} = \frac{E_i - R_L}{1 - R_L} \quad (54)$$

4.4 MÓDULO CÂMARA DE POEIRA

O módulo “Câmara de poeira”, assim como no módulo “Centrífuga” não foi desenvolvido para uma abordagem única de recepção de variáveis devido a não uniformidade dos critérios avaliativos. Por essa razão, o aplicativo disponibilizou uma lista de funcionalidades, das quais são necessários dados complementares apresentados na interface com usuário.

Por padrão a tela inicial solicita informações da eficiência do processo (η), vazão de alimentação (Q_A), aceleração da gravidade (g), massa específicas das partículas (ρ_s), propriedades do fluido e ainda apresenta uma lista de opções de cálculos. Compõe a lista de funcionalidade do módulo a determinação da esfericidade das partículas, diâmetro da menor partícula recuperada, dimensões do equipamento e suas seções além da faixa granulométrica de retenção em todos os compartimentos. Estas opções são visualizadas na **Figura 24**.

Figura 24 – Apresentação das funcionalidades do módulo "Câmara de Poeira".



Fonte: Da Autora (2019).

Os métodos propostos para esse módulo basearam em autores como Massarani (2002), Cremasco (2014) e Peçanha (2014).

4.4.1 Desenvolvimento de cálculos para determinação da esfericidade das partículas, diâmetro da menor partícula retida ou a faixa granulométrica

Para os casos de determinação da esfericidade das partículas, o diâmetro da menor partícula ou a faixa granulométrica, primeiramente estabeleceu-se a velocidade terminal de acordo com a Equação 55. Nesta Equação, E_{global} corresponde à eficiência global, Q_A , a vazão de alimentação, B e L são as dimensões da câmara de poeira, largura e comprimento, respectivamente.

$$v_t = \frac{E_{global} Q_A}{BL} \quad (55)$$

Para o caso de obtenção da faixa granulométrica foi definida a velocidade terminal em cada seção.

Após a determinação da velocidade terminal, aplicou-se as correlações de Coelho e Massarani, mencionada em Massarani (2002). Considerando para essa situação, as Equações 56 e 57 em que a velocidade terminal foi representada por v_t , a massa específica do fluido e

das partículas por ρ_f e ρ_s , a viscosidade por μ , o diâmetro das partículas, D_p e a esfericidade das partículas por ϕ .

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4(\rho_s - \rho_f)\mu g}{3\rho_f^2 v_t^3} \quad (56)$$

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log \frac{\phi}{0,065 Re} \frac{C_D}{Re}} \right)^{\frac{1,3}{2}} + \left(\frac{5,31 - 4,88\phi}{\frac{C_D}{Re}} \right)^{1,3} \right]^{\frac{1}{1,3}} \quad (57)$$

$$Re = \frac{D_p v_t \rho_f}{\mu} \quad (58)$$

Para os casos em que não é informada a massa específica do fluido, mas sim, a massa molar, pressão e temperatura, a mesma foi obtida por meio da Equação 19 também conhecida com equação dos gases ideais.

A determinação da opção esfericidade das partículas (ϕ) foi obtida por meio da Equação 57, porém trata-se de um método implícito. A solução encontrada foi partir de uma esfericidade inicial a 0,6501 e ir incrementado 0,0001 até que o segundo da igualdade entre os termos na Equação 57 fosse igual ao primeiro termo. Para isso, o número de Reynolds (Re) foi obtido na Equação 58. Considerou-se para a comparação de igualdade apenas uma casa decimal.

A escolha por iniciar o valor da esfericidade em 0,6501 foi justificado através das recomendações feitas para a aplicação da correlação Coelho e Massarani em que a correlação aplica-se somente para esfericidades entre 0,65 e 1.

Para determinar o diâmetro da menor partícula e da faixa granulométrica primeiramente foi obtido o número de Reynolds aplicando a Equação 57 e, posteriormente, a Equação 58 obtendo assim, os diâmetros das partículas que compõem a faixa granulométrica.

Novamente, a composição da faixa granulométrica envolve a presença de mais de uma seção da câmara de poeira, portanto, obteve-se velocidade terminal e diâmetro distintos para em cada compartimento. É importante frisar ainda, que se espera que as partículas mais densas sejam retidas no primeiro compartimento e as partículas mais leves tendem a serem depositadas no último compartimento (CREMASCO, 2014).

4.4.2 Desenvolvimento de cálculos para determinação das dimensões da câmara de poeira e dos seus compartimentos

Para situações no qual o objetivo principal foi o dimensionamento do equipamento ou seus compartimentos (L_i), o primeiramente verificou-se a existência da informação de massa específica do fluido ou condições para se obter tal parâmetro. Nesta última opção, aplicou-se novamente a Equação 19.

Encontrada a massa específica do fluido, a etapa seguinte averiguou a relação do número de Reynolds e o coeficiente de arraste ($C_D Re^2$) aplicando da correlação Coelho e Massarani (1996), informada por Massarani (2002) através da Equação 59. No qual, D_p é o diâmetro das partículas, ρ_s e ρ_f são respectivamente, as massas específicas das partículas e do fluido, g é a aceleração da gravidade e μ a viscosidade do fluido.

$$C_D Re^2 = \frac{4(\rho_s - \rho_f)\rho_f g D_p^3}{3\mu^2} \quad (59)$$

Ao conhecer $C_D Re^2$ aplicou-o na Equação 60 para determinar o número de Reynolds e também na Equação 61, no qual forneceu a velocidade terminal (v_t).

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log \frac{\phi}{0,065 C_D Re^2}} \right)^{1,2} + \left(\frac{C_D Re^2}{5,31 - 4,88\phi} \right)^{\frac{1,2}{2}} \right]^{-\frac{1}{1,2}} \quad (60)$$

$$Re = \frac{D_p v_t \rho_f}{\mu} \quad (61)$$

Em situações em que o usuário informou mais de um compartimento (L) o processo de determinação da velocidade terminal se repetiu em igual número de compartimentos.

Na opção de determinação do dimensionamento da câmara de poeira, o aplicativo considerou base e largura iguais ($B = L$) e fixou-se a velocidade operacional (u_c) em $0,5 \text{ m s}^{-1}$. De posse dessas informações a determinação da largura do compartimento (L) foi baseada na Equação 62 e sua altura (H) na Equação 63. Considerando a eficiência do processo (η).

$$L = \sqrt{\frac{Q_A \eta}{v_t}} \quad (62)$$

$$H = \frac{L v_t}{\eta u_c} \quad (63)$$

Para o caso específico de determinação dos comprimentos das seções da câmara de

poeira (L_i), não foi calculado a altura, restringindo-se apenas na definição dos comprimentos, Equação 64, em que B é a base do equipamento.

$$L_i = \frac{Q_A \eta}{v_i B} \quad (i= 1, 2, 3, \dots, n \text{ compartimentos}) \quad (64)$$

Além dos cálculos obtidos através da aplicação das seções 4.4.1 ou 4.4.2, em todas as funcionalidades apresentadas neste módulo determinou-se ainda o diâmetro mínimo de coleta para uma eficiência de 100% conforme apresentado por Peçanha (2014) através da Equação 65 e em seguida realizou-se a construção da grade de eficiência de acordo com Equação 66.

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{18 \mu Q_A}{BL(\rho_s - \rho_f)g}} \quad (65)$$

$$\eta = 0,5 \frac{i\sqrt{2}}{D_{\min}} \quad (0 \leq i \leq D_{\min}) \quad (66)$$

4.5 MÓDULO ELUTRIADOR

Ao deparar com o módulo de dimensionamento de elutriador, o usuário forneceu ao aplicativo as propriedades do fluido, aceleração da gravidade e os as informações complementares de acordo com a seleção da funcionalidade. As opções destinadas ao módulo estão apresentadas na **Figura 25**.

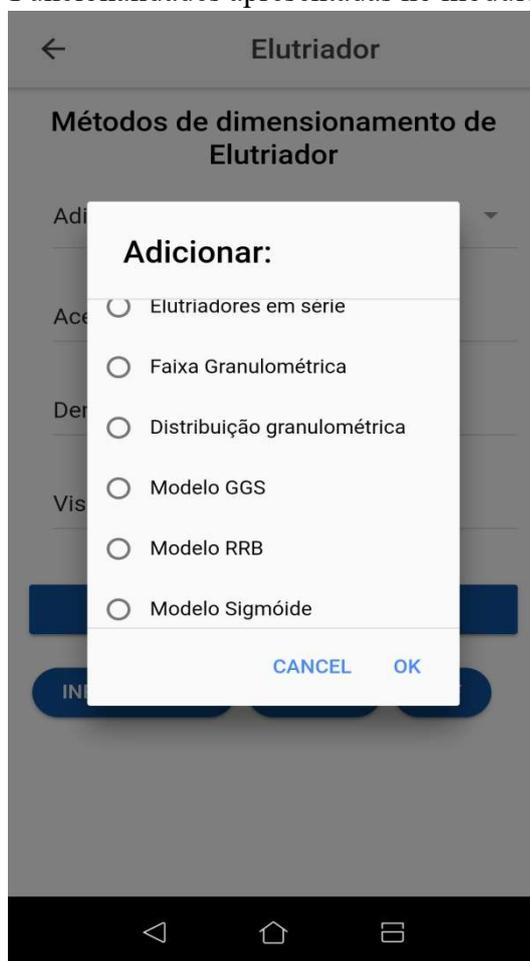
A opção “elutriadores em série”, permitiu ao usuário o acréscimo da quantidade de elutriadores organizados em série, os diâmetros de cada elutriador e as massas recolhidas em cada um dos equipamentos. Além é claro, das condições operacionais e informações dos sólidos destinados ao processo de separação. A escolha dessa opção levou ao conhecimento do usuário informações da distribuição granulométrica aplicada a esse sistema.

A seleção seguinte, faixa granulométrica, forneceu ao usuário a opção de informar os diâmetros de partículas recuperadas que compõem cada faixa. Com essas informações, obteve-se a velocidade terminal estabelecida para cada faixa de recuperação dos sólidos.

Outra possibilidade do módulo consistiu em informar a distribuição granulométrica. Neste caso, considerou uma mistura binária de compostos sólidos obedecendo a uma mesma distribuição granulométrica. Desse modo, o aplicativo mostrou os ajustes da distribuição granulométrica para o modelo RRB, GGS e Sigmóide e a partir disso, o percentual de material arrastado, recuperado no fundo e no topo para cada um dos modelos.

Por fim, as demais opções permitiram informar os parâmetros dos modelos de distribuição granulométrica para realizar os cálculos e apresentar o percentual de material recolhido no topo, fundo e os arrastados para o modelo selecionado.

Figura 25 – Funcionalidades apresentadas no módulo Elutriador.



Fonte: Da Autora (2019).

Os equacionamentos matemáticos deste módulo foram fundamentados em Cremasco (2014) e Massarani (2002).

Existiram dois possíveis cenários para obter a distribuição granulométrica a partir de um arranjo de elutriadores em série. O primeiro considerando o diâmetro de Stokes, opção que o usuário pôde definir durante a etapa de coleta de dados. Nestas circunstâncias, não era aguardado a informação da esfericidade das partículas. No outro cenário, esperou-se do usuário a informação da esfericidade das partículas e os cálculos basearam-se na correlação de Coelho e Massarani, mencionados por Massarani (2002). Os procedimentos seguintes foram replicados por igual quantidade de elutriadores.

Para o cenário envolvendo o diâmetro de Stokes, o diâmetro das partículas foi obtido considerando a velocidade de arraste do fluido (u) ao invés da velocidade terminal (v_t) (CREMASCO, 2014). Dessa forma, primeiramente obteve-se a velocidade de arraste, a partir da Equação 67 e em seguida a aplicou na Equação 68 obtendo o diâmetro de Stokes. Nestas equações, considerou a viscosidade do fluido (μ), a aceleração da gravidade (g) e as massas específicas das partículas (ρ_s) e do fluido (ρ_f) capturadas através da tela do aplicativo.

$$u = \frac{4Q_A}{\pi D_p^2} \quad (67)$$

$$d_{Stokes} = \frac{18\mu u}{g(\rho_s - \rho_f)} \quad (68)$$

Para o cálculo do diâmetro no segundo cenário, novamente utilizou a Equação 66 para obter a velocidade operacional e posteriormente, calculou a relação do coeficiente de arraste e número de Reynolds (C_D/Re) através da Equação 69.

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4}{3} \frac{\mu g(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f^2 u^3} \quad (69)$$

Conhecido C_D/Re aplicou a correlação de Coelho e Massarani, Equação 70 e em seguida utilizou a Equação 71 para determinar o diâmetro das partículas (D_p).

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log \frac{\phi}{0,065 Re}} \right)^{\frac{1,3}{2}} + \left(\frac{5,31 - 4,88\phi}{\frac{C_D}{Re}} \right)^{1,3} \right]^{\frac{1}{1,3}} \quad (70)$$

$$Re = \frac{D_p v_t \rho_f}{\mu} \quad (71)$$

Para finalizar o processo, a distribuição granulométrica (X) foi obtida considerando a razão da massa recolhida e a massa total, conforme Equação 72.

$$X = 1 - \sum_0^i \frac{massa_{recolhida}}{massa_{total}} \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n) \text{ elutriadores anteriores} \quad (72)$$

A determinação da velocidade terminal de um processo necessitou do usuário a informação das faixas granulométricas. Neste caso, os cálculos também foram replicados para cada faixa e realizados considerando apenas o maior valor do diâmetro de cada faixa.

Uma vez conhecido o diâmetro das partículas, aplicou a Equação 73 em cada faixa para obter a relação ($C_D Re^2$). Posteriormente obteve-se o número de Reynolds (Re) através da correlação de Coelho e Massarani, Equação 74.

$$C_D \text{Re}^2 = \frac{4(\rho_s - \rho_f)\rho_f g D_p^3}{3\mu^2} \quad (73)$$

$$\text{Re} = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log \frac{\phi}{0,065} C_D \text{Re}^2} \right)^{1,2} + \left(\frac{C_D \text{Re}^2}{5,31 - 4,88\phi} \right)^{\frac{1,2}{2}} \right]^{\frac{-1}{1,2}} \quad (74)$$

Apoiado pelo número de Reynolds obtido na Equação 74, a etapa subsequente utilizou a Equação 71 para definir a velocidade de arraste das partículas, ou velocidade de elutriação (v_t) de acordo com as faixas granulométricas.

Outra opção para ao usuário foi o acréscimo da distribuição granulométrica. Neste contexto, os dados fornecidos foram ajustados aos modelos GGS, RRB e Sigmóide de acordo com as equações 75 a 77.

Os parâmetros dos modelos de distribuição granulométrica foram conhecidos realizando o processo de linearização, equações 78 a 80, seguida da aplicação dos métodos de mínimos quadrados e eliminação de Gauss seguindo os procedimentos apontados anexo III - Equação linear e os coeficientes de correlação (R^2) da equação linear apresentada no anexo IV. A realização desse processo considerou x os diâmetros e y o material retido na distribuição granulométrica (X).

$$\text{Modelo GGS: } X = \left(\frac{D_p}{k} \right)^m \quad (75)$$

$$\text{Modelo RRB: } X = 1 - e^{-\left(\frac{D_p}{D'}\right)^n} \quad (76)$$

$$\text{Modelo Sigmóide: } X = \frac{1}{1 + \left(\frac{D'}{D_p}\right)^p} \quad (77)$$

Nas formas linearizadas,

$$\text{Modelo GGS: } \log[X] = m \log[D_p] - m \log[k] \quad (78)$$

$$\text{Modelo RRB: } \ln \left[\ln \frac{1}{1-X} \right] = n \ln[D_p] - n \ln[D'] \quad (79)$$

$$\text{Modelo Sigmóide: } \log \left(\frac{1-X}{X} \right) = p \log[D'] - p \log[D_p] \quad (80)$$

Após a realização dos ajustes e obtidos os parâmetros dos modelos, o passo seguinte consistiu em determinar a razão C_D/Re através da aplicação da Equação 69 e o número de

Reynolds (Re), Equação 70. Posteriormente, considerou a Equação 71 para determinar o diâmetro das partículas para cada material.

Com o conhecimento do diâmetro das partículas estimou o percentual de partículas menores do que o diâmetro de corte, portanto, percentual de material arrastado (X) através da aplicação das equações 75 a 77. Procedimento realizado para os dois materiais.

Sabendo a quantidade de material arrastado e respeitando a proporção de material informado pelo usuário estimou-se os percentuais recuperados no topo através das equações 81 e 82 e o percentual recuperado no fundo do equipamento, equações 83 e 84.

$$\text{Topo: \%mat}_1 = \frac{\text{proporção}_{mat1} X_{mat1}}{(\text{proporção}_{mat1} X_{mat1}) + (\text{proporção}_{mat2} X_{mat2})} 100\% \quad (81)$$

$$\text{Topo: \%mat}_2 = \frac{\text{proporção}_{mat2} X_{mat2}}{(\text{proporção}_{mat1} X_{mat1}) + (\text{proporção}_{mat2} X_{mat2})} 100\% \quad (82)$$

$$\text{Fundo: \%mat}_1 = \frac{\text{prop}_{mat1} - (\text{proporção}_{mat1} X_{mat1})}{\text{prop}_{mat1} (\text{proporção}_{mat1} X_{mat1}) + \text{prop}_{mat2} (\text{proporção}_{mat2} X_{mat2})} 100\% \quad (83)$$

$$\text{Fundo: \%mat}_2 = \frac{\text{prop}_{mat2} - (\text{proporção}_{mat2} X_{mat2})}{\text{prop}_{mat1} (\text{proporção}_{mat1} X_{mat1}) + \text{prop}_{mat2} (\text{proporção}_{mat2} X_{mat2})} 100\% \quad (84)$$

Por fim, casos em que o usuário forneceu os parâmetros de um dos modelos de distribuição granulométrico o procedimento foi similar ao apresentado para a distribuição granulométrica, com exceção apenas dos ajustes dos modelos. Considerou-se nesta situação, os cálculos direcionados ao modelo específico selecionado pelo usuário.

4.6 MÓDULO SEDIMENTADOR

O módulo “Sedimentador” abordou os métodos de Kynch e Biscaia Jr. para seu dimensionamento. Neste caso, o usuário informou os valores encontrados durante o ensaio de proveta, como número de amostragem, tempo (t) e altura da região de sedimentação (Z), além de variáveis como vazão (Q_A), concentração de alimentação (C_A), concentração do *underflow* (C_u) e massa específica das partículas (ρ_s). A partir dessas informações, o aplicativo permitiu escolher entre a aplicação do método de Kynch ou Biscaia Jr. como vista na **Figura 26**. Os métodos foram baseados em Cremasco (2014) e Peçanha (2014).

Figura 26 – *Layout* e identificações dos métodos aplicados ao módulo Sedimentador.

← Sedimentadores

Métodos de dimensionamento de Sedimentadores Contínuos

Quantidade de amostragem em Proveta: _____

Vazão (m³/h): _____

C_{aliment.} (kg/m³): _____

C_{lodo} (kg/m³): _____

Massa Espec. partícula (g/cm³): _____

KYNCH

BISCAIA JR.

INFORMAÇÕES LIMPAR PDF

Fonte: Da Autora (2019).

4.6.1 Método de Kynch

Para aplicar o método de Kynch, foi necessária a aplicação do teste de proveta medindo a altura a partir do fundo da proveta até a região de sedimentação livre (Z) ao longo do tempo (t). Esse tempo e altura foram registrados até que houvesse a separação da região de compactação e a de líquido clarificado, ou seja, até uma altura constante. O processo foi realizado em batelada e as informações de tempo e altura de sedimentação deram origem aos pontos (t_i , Z_i) solicitados pelo aplicativo.

Depois de informados os pontos do ensaio de proveta, o aplicativo realizou o ajuste para função exponencial através da técnica de mínimos quadrados e Eliminação de Gauss, de acordo com o anexo II. E a partir da equação exponencial determinou as velocidades de sedimentação (v_i) e as concentrações (C_i) em cada um dos pares coordenados conforme Equações 85 e 86, respectivamente.

$$v_i = \frac{-dZ}{dt} = \frac{Z_i - Z}{t} \quad (85)$$

$$C_i = \frac{C_A Z_0}{Z_i} \quad (86)$$

No qual, Z_i é a altura da interface clarificado-sedimento no instante t definido a partir do início da sedimentação; Z é a altura de sedimentação na instante t ; C_A a concentração de alimentação e Z_0 a altura inicial do ensaio de proveta.

O Z_i foi obtido pela equação da reta tangente ao ponto. Neste caso, para determinar o coeficiente angular substitui-se o valor do tempo na derivada da equação exponencial. Logo após foi realizado uma correção nos valores informados no teste de proveta (Z) considerando a equação exponencial obtida pelo ajuste do ensaio de proveta.

Os valores de v_i e C_i formaram a base deste método para determinação da área de seção transversal do sedimentador contínuo (PEÇANHA, 2014). Assim, a área de seção transversal (S_i) foi definida a partir do balanço material resultando-se na Equação 86. Aplicou-se essa equação a todas as amostras coletadas no ensaio de proveta adotando a vazão de alimentação (Q_A), as concentrações de alimentação (C_A) e do lodo no *underflow* (C_{vu}) informadas pelo usuário.

$$S_i = Q_A C_A \left(\frac{1}{C_i} - \frac{1}{C_{vu}} \right) \quad (87)$$

A área de seção transversal do sedimentador foi definida como sendo a maior área alcançada pela aplicação da Equação 87 nas amostras do ensaio de proveta.

4.6.2 Método de Biscaia Jr.

Conforme Cremasco (2014) o método de Biscaia Jr. considerou a curva de sedimentação uma combinação de uma reta com uma função exponencial. Assim, os dados coletados no teste de proveta, tempo e altura de sedimentação formaram os pontos (t_i, Z_i) que compõem o aplicativo. Esses pontos foram ajustados considerando que uma parte dos dados tem comportamento linear, portanto, enquadram em uma equação linear (1º Grau) e a outra parte a uma função exponencial. Para obter as equações mencionadas e seus coeficientes de correlação (R^2) utilizou-se o método de mínimos quadrados e Eliminação de Gauss, anexos II, III e IV.

Para definir os pontos que compõem a equação linear considerou aqueles que mantiveram proporcionalidade em relação ao ponto inicial. Os demais pontos foram utilizados

para a construção da curva exponencial. A equação linear e exponencial está genericamente representada pelas Equações 88 e 89.

$$Z_{\min} = At_{\min} + B \quad (88)$$

$$Z_{\min} = Be^{At_{\min}} \quad (89)$$

Para dimensionar um sedimentador, através desse método determinou a área da seção transversal (A_{\min}) utilizando a Equação 90 apresentada por Cremasco (2014) em que, a vazão de alimentação (Q_A) e a altura inicial do teste (z_0) foram fornecidos pelo usuário.

$$A_{\min} = \frac{Q_A t_{\min}}{Z_0} \quad (90)$$

Nota-se que a Equação 89 depende do tempo mínimo (t_{\min}). Para determinar o t_{\min} , inicialmente, definiu a altura mínima (Z_{\min}) conhecendo a concentração de alimentação (C_A) e a concentração do lodo no *underflow* (C_u) através da Equação 91. Depois de definir a altura mínima, para determinar o t_{\min} analisou se o valor de Z_{\min} encontrava-se na faixa dos pontos ajustados linearmente. Caso verdadeiro, calculou-se do t_{\min} através da Equação 92. Caso contrário, aplicou a Equação 93.

$$Z_{\min} = \frac{C_A Z_0}{C_{vu}} \quad (91)$$

$$t_{\min} = \frac{Z_{\min} - B_{eq.1^\circ grau}}{A_{eq.1^\circ grau}} \quad (92)$$

$$t_{\min} = \left(\frac{\ln \left(\frac{Z_{\min}}{B_{eq.exp.}} \right)}{A_{eq.exp.}} \right) \quad (93)$$

$$A_{\min} = \frac{\pi D_{\min}^2}{2} \quad (94)$$

Em seguida, obteve-se a área mínima do sedimentador (A_{\min}) de acordo com a Equação 90 e o diâmetro mínimo (D_{\min}), Equação 94.

Neste módulo considerou o acréscimo de um fator de segurança de dez por cento para o dimensionamento de A_{\min} e D_{\min} correspondendo a área e o diâmetro do projeto de um sedimentador contínuo.

4.6.3 Estimativa da altura do sedimentador

Para finalizar o dimensionamento dos sedimentadores, foi importante definir a altura do equipamento. Adotou-se o mesmo procedimento para os métodos apresentados anteriormente.

A altura de um sedimentador é uma função do tempo de residência médio dos sólidos (t^*) representado pela Equação 95. No qual, considera-se o tempo necessário para atingir a concentração uniforme durante o teste de proveta (t_R) e o tempo crítico (t_c), ou seja, o instante que os pontos deixaram ter comportamento linear (CREMASCO, 2014).

Para obter o t_R traçou-se uma reta tangente a curva que atravessou o eixo y no ponto em de altura mínima (Z_{min}) e encostou-se na curva de sedimentação. Este exato momento que essa reta tangente atingiu a curva foi considerado o retirado o valor de t_R .

$$t^* = t_R - t_c \quad (95)$$

Conhecendo o tempo de residência médio (t^*), calculou-se a altura do sedimentador considerando a formação de três zonas distintas representadas na Equação 96.

$$H = H_1 + H_2 + H_3 \quad (96)$$

Para a altura da região de líquido clarificado (H_1), considerou-se o ponto médio entre 0,45 e 0,75m, sendo adotado usualmente em projetos de sedimentadores valor médio de 0,6 metros (CREMASCO, 2014). A altura do espessador (H_2) foi estabelecido através da Equação 97. E a altura da região espessada (H_3) expressa conforme Equação 98.

$$H_2 = \frac{4 Q_A C_A t^* (\rho_s - \rho_f)}{3 A_{min} \rho_s (\rho_{esp} - \rho_f)} \quad (97)$$

$$H_3 = 0,073 D_{min} \quad (98)$$

Considerando ρ_s , ρ_f e ρ_{esp} , respectivamente, a massa específica das partículas, massa específica do líquido e a massa específica do espessado, Q_A e C_A , a vazão e a concentração de alimentação e D_{min} o diâmetro mínimo do sedimentador.

Neste módulo também considerou o acréscimo de fator de segurança de dez por cento em relação à altura mínima do equipamento.

4.7 MÓDULO DE CONVERSÃO DE UNIDADES

Este módulo foi desenvolvido pensando em facilitar o uso do aplicativo quando o usuário estivesse exposto a uma unidade de medida diferente a solicitada no aplicativo

evitando a inutilização do aplicativo devido à impossibilidade de recorrer de consultas a tabelas de conversão ou acesso à *internet* para realizar as mudanças de unidades necessárias.

O módulo permitiu através de uma lista horizontal escolher a unidade de conversão a ser realizadas tais como comprimento, área, massa, temperatura, velocidade, massa específica, viscosidade, vazão, pressão e potência.

Para utilizar essa funcionalidade, o usuário forneceu o valor numérico e definiu a unidade de medida, em seguida o aplicativo mostrou a conversão para todas as unidades de medidas relacionadas com opção escolhida de conversão de unidades.

No apêndice B existe uma simulação de conversão de unidades de vazão. Nota-se que o usuário informou o valor da vazão e a unidade de medida, retornando a conversão para as outras unidades dessa medida.

4.8 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO APLICATIVO “PEIQ”

A partir da definição dos métodos aplicados em cada módulo e confeccionado o código-fonte do aplicativo, a etapa seguinte ao desenvolvimento do PEIQ consistiu na realização do processo de validação de suas funcionalidades e aplicabilidade. Para esta etapa, foi proposta a análise de 17 estudos de casos encontrados cotidianamente em salas de aulas ou livros didáticos relacionadas aos equipamentos contemplados no aplicativo.

4.8.1 Módulo Centrífuga

4.8.1.1 Caso 1: Diâmetro de corte

Este estudo baseou-se em uma atividade apresentada por Svarovsky (2000) e reproduzida também por Silva; Santos (2017). Eles propuseram obter o diâmetro de corte de um material suspenso em água com massa específica de $2,64 \text{ g cm}^{-3}$. Considerou-se a massa específica do fluido de $1,00 \text{ g cm}^{-3}$ e viscosidade de 0,01 P. A separação foi realizada em uma centrífuga com vazão de $8 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ operando em 20000 rpm. A centrífuga adotada apresentava raio de alimentação ($R_0 = 1,1 \text{ cm}$), raio interno ($R_{\text{int}} = 2,2 \text{ cm}$) e altura ($L = 20 \text{ cm}$).

4.8.1.2 Caso 2: Raio interno da centrífuga

Uma centrífuga com as mesmas dimensões do caso anterior, $R_0 = 1,1 \text{ cm}$ e $L = 20 \text{ cm}$,

operando a uma vazão de $8 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ e velocidade 20000 rotações por minuto foi utilizado para determinar o raio interno. Considerou-se para neste caso o diâmetro médio das partículas igual a $0,144 \mu\text{m}$ (SILVA; SANTOS, 2017).

4.8.1.3 Caso 3: Scale Up de centrífugas

Um técnico foi solicitado para separar um material microbiológico suspenso em um fluido utilizando uma centrífuga tubular industrial. Para um estudo preliminar, o técnico optou-se por utilizar uma centrífuga tubular disponível no laboratório com dimensões de $R_0 = 1,0 \text{ cm}$; $R_{\text{int}} = 2,5 \text{ cm}$ e $L = 20 \text{ cm}$. Considerou-se para o processo a velocidade rotacional de 18000 rotações por minuto e vazão de $8,333 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. Conhecendo apenas as características operacionais da centrífuga industrial, velocidade de 12000 rpm, $R_0 = 5,0 \text{ cm}$; $R = 7,5 \text{ cm}$ e $L = 50 \text{ cm}$ o técnico realizou o processo de ampliação de escala para obter a vazão da centrífuga industrial (CREMASCO, 2014).

4.8.2 Módulo Ciclone

4.8.2.1 Caso 4: Ciclone Lapple a partir do tamanho médio das partículas

O estudo visou a especificar um sistema alinhado paralelamente de ciclones Lapple para a separação de bagaço da cana de açúcar de massa específica de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ e o ar como fluido a temperatura de 210°C e 1 atm. O ciclone foi alimentado com partículas maiores que $40 \mu\text{m}$ a vazão de $140 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e eficiência de 95% (MASSARANI, 2002).

4.8.2.2 Caso 5: Ciclone Lapple a partir da distribuição granulométrica

O aplicativo também foi testado quanto à utilização da análise granulométrica. Para isso, adotou-se a atividade apresentada por Massarani (2002) que consistiu em especificar uma bateria de ciclones Lapple conforme a distribuição granulométrica apresentada na **Tabela 8**.

O sistema foi realizado para separar cinzas de carvão ($\rho_s = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$) com vazão de $100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e eficiência de remoção de partículas acima de 80%. Considerou-se o ar como fluido na temperatura de 520°C , pressão de 1 atm e viscosidade de $0,031 \text{ cP}$.

Tabela 8 – Distribuição granulométrica para Caso 5.

D (μm)	5	10	15	20	30	40
x (%)	12	27	48	63	80	88

Fonte: Massarani (2002).

4.8.2.3 Caso 6: Ciclone Lapple a partir dos parâmetros do modelo RRB

Nesta situação, o estudo teve como princípio projetar uma bateria de ciclones Lapple para a separação de um material com massa específica de $2,3 \text{ g cm}^{-3}$ na presença de ar a 520°C e 1 atm e viscosidade de 0,0347 cP. O processo operou com eficiência de 80% e velocidade de 16 m s^{-1} sendo o mesmo ajustado ao modelo RRB conforme Equação 99. (Moreira, 2017).

$$X = 1 - e^{-\left(\frac{D_{particulas}}{21,5}\right)^{1,35}} \quad (99)$$

4.8.3 Módulo Hidrociclone

4.8.3.1 Caso 7: Hidrociclone Bradley a partir da análise granulométrica

Neste caso, desejou-se definir uma bateria de hidrociclones do tipo Bradley, no qual o diâmetro cilíndrico (D_c) continha 6 cm e o diâmetro no *underflow* (D_u) 0,8 cm. O processo tratou uma vazão de $50 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com pressão de 50 psi de uma solução aquosa com 1% de carbonato de cálcio. Considerou-se para tal as propriedades do fluido, massa específica de 1 g cm^{-3} e viscosidade de 1 cP e os dados da análise granulométrica (**tabela 9**).

Tabela 9 – Distribuição granulométrica para Caso 7.

D (μm)	5	10	15	20	30	40
X (%)	12	29	46	60	80	92

Fonte: Adaptado de Medronho (2012).

4.8.3.2 Caso 8: Hidrociclone Rietema a partir da análise granulométrica

De modo semelhante ao caso anterior, o estudo envolveu a averiguação do uso de hidrociclones Rietema, em um processo industrial para separação de partículas com massa específica de $2,4 \text{ g cm}^{-3}$ e concentração volumétrica (C_{vu}) de 9%. O equipamento utilizado para o estudo possuía dimensões de 1 cm e 0,27 cm para os diâmetros da parte cilíndrica e do *underflow*, respectivamente e o fluido utilizado no processo apresentou massa específica de 1 g cm^{-3} e viscosidade de 1 cP. Sua operação ocorreu a uma pressão de 30 psi e vazão de 12,96

$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$. Para este processo contemplou-se a distribuição granulométrica organizada na **Tabela 10**.

Tabela 10 – Distribuição granulométrica para Caso 8.

D (μm)	2	4	6	8	10	14	20
X (%)	35,5	59,0	72,0	80,5	86,0	92,0	96,0

Fonte: Medronho (2012).

4.8.3.3 Caso 9: Hidrociclone Rietema a partir dos parâmetros do modelo RRB

Para finalizar esse módulo, o desenvolvimento deste caso baseou no estudo anterior utilizando os parâmetros ajustado para o modelo R.R.B. mencionados no caso 8 bem como a replicação das variáveis de modo a averiguar consistência nos resultados entre as duas funcionalidades do aplicativo.

4.8.4 Módulo Câmara de Poeira

4.8.3.1 Caso 10: Esfericidade das partículas

Neste, foi realizado um estudo para determinar a esfericidade das partículas alimentadas em uma câmara de poeira com dimensões de 1 metro por 1 metro por 1 metro funcionando a velocidade de 5 m s^{-1} com um material suspenso de massa específica ($\rho_s = 4,7 \text{ g cm}^{-3}$) em ar a 80° C , 1 atm e viscosidade de 0,018 cP. Para esse processo, as partículas foram coletadas com 100% de eficiência e possuíam diâmetro de $400 \mu\text{m}$ (MEDRONHO, 2012).

4.8.3.2 Caso 11: Dimensões das seções de uma câmara de poeira

Para avaliar o aplicativo nesta funcionalidade utilizou-se um separador de poeira contendo quatro compartimentos com as faixas de separação da seguinte forma: Faixa 1: maior que $91 \mu\text{m}$; Faixa 2: $91 \mu\text{m} - 59,6 \mu\text{m}$; Faixa 3: $59,6 \mu\text{m} - 47,9 \mu\text{m}$; Faixa 4: $47,9 \mu\text{m} - 41,3 \mu\text{m}$. O equipamento operou com vazão de $70 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ com um material suspenso de massa específica de $4,5 \text{ g cm}^{-3}$ e esfericidade de 0,75. A câmara de poeira possuía largura (B) de 1,5 m e altura (H) de 1,0 m, a massa específica do fluido adotada foi de $1,091 \text{ kg m}^{-3}$ e sua viscosidade de 0,01909 cP.

4.8.3.3 Caso 12: Faixa granulométrica

O caso 12 ocorreu em uma câmara de poeira com largura (B) de 4 metros, altura (H) de 0,5 metros em que continham três compartimentos (L) medindo 1,5 metros cada. Esta câmara foi utilizada para determinar as faixas granulométricas retidas no processo. O equipamento foi operado com ar a 20° C e 1 atm a vazão de 140 m³ min⁻¹, a massa específica das partículas testadas foram de 3 g cm⁻³ e esfericidade 0,75 (MASSARANI, 2002).

4.8.4 Módulo Elutriador

4.8.3.1 Caso 13: Elutriadores em série

Na primeira situação deste módulo foi realizado um processo de elutriação de 25 g de um pó presente na água a 30°C e vazão operacional de 37 cm³ min⁻¹ obtendo a informações demonstradas na **Tabela 11**. A partir destes dados, o autor propôs apresentar a distribuição granulométrica, considerando o processo em termos de diâmetro de Stokes com massa específica do sólido de 1,8 g cm⁻³ e viscosidade do fluido de 1,005 cP (MASSARANI, 2002).

Tabela 11 – Informações dos elutriadores em série.

Elutriador	D _{tubo} (m)	Massa recolhida (g)
1	0,03	4,62
2	0,04	6,75
3	0,06	7,75
4	0,12	4,42

Fonte: Massarani (2002).

4.8.3.2 Caso 14: Distribuição Granulométrica

A averiguação do caso baseou em uma atividade também enunciada por Massarani (2002). Nesta, cogitou-se a separação de uma mistura de galena e calcário alimentada em razão mássica de 1 para 4. O processo foi feito com água à velocidade de elutriação de 0,05 cm s⁻¹. Considerando que os dois materiais possuem distribuição granulométrica apresentada na **Tabela 12**. As massas específicas da galena e do calcário e suas esfericidades foram respectivamente de 7,5 g cm⁻³ e 2,7 g cm⁻³; 0,8 e 0,7.

Tabela 12 – Distribuição granulométrica (Caso 14).

D_p (µm)	20	30	40	50	60	70	80	100
X (%)	15	28	43	54	64	72	78	88

Fonte: Massarani (2002).

4.8.3.3 Caso 15: Parâmetros do Modelo Sigmóide

De modo a avaliar uma possível falha na aplicação do método elutriador adotou-se as mesmas informações do caso anterior e considerou a troca das informações da distribuição granulométrica para os parâmetros do modelo Sigmóide (D' igual a 44,6 µm e p valendo 2,27) informadas pelo autor do caso anterior.

4.8.4 Módulo Sedimentador

O último módulo contemplado no PEIQ foi validado através da aplicação dos casos 16 e 17. Ambos baseados no mesmo ensaio de proveta apresentados na **Tabela 13**.

Tabela 13 – Ensaio de proveta para casos 16 e 17.

t (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Z (cm)	40	32,8	25,5	18,8	14,2	11,2	9,6	6,6	5,2	4,0

Fonte: Massarani (2002) e Cremasco (2014).

4.8.3.1 Caso 16: Análise Comparativa da aplicação do Método de Biscaia Jr. e Kynch

Em uma atividade apresentada por Cremasco (2014), desejava-se estimar o valor do diâmetro de um sedimentador para tratamento de óxido de cálcio. O equipamento foi alimentado a vazão de 30 m³h⁻¹ com o material de massa específica de 2,7 g cm⁻³ e concentração de 60 g L⁻¹. Após a sedimentação, o material concentrado chegou a 170 g L⁻¹.

4.8.3.2 Caso 17: Análise Comparativa da aplicação do Método de Biscaia Jr. e Kynch

O último caso avaliativo do aplicativo foi fundamentado em uma atividade apresentada por Massarani (2002), no qual se desejou dimensionar um sedimentador Dorr-Oliver operado a 30 m³ h⁻¹ e com concentração de 0,08 g cm⁻³ de suspensão. O sistema derivou em uma solução concentrada com 0,25 g cm⁻³. A massa específica das partículas adotada foi de 2,2 g cm⁻³ e respeitaram-se os mesmos pontos do ensaio de proveta apresentada na **Tabela 13**.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentadas as simulações e um comparativo dos resultados obtidos através do aplicativo “PEIQ” e os apresentados pelos autores de referência baseado nos casos disponibilizados na seção 4.8.

5.1 MÓDULO CENTRÍFUGA

O módulo “Centrífuga” foi contemplado com os estudos de casos 1, 2 e 3.

5.1.1 Caso 1: Diâmetro de corte

Para essa situação o usuário definiu a opção relacionada ao diâmetro de corte e, posteriormente, informou a massa específica do material particulado e do fluido, viscosidade, velocidade, aceleração da gravidade e o dimensionamento da centrífuga. Essas informações foram apresentadas na **Figura 27**.

Ao solicitar ao aplicativo para “calcular”, o usuário foi informado além do diâmetro de corte (D^*), o diâmetro mínimo, diâmetro máximo da centrífuga e a grade de eficiência individual de coleta das partículas, **Figura 28**.

O diâmetro de corte considerou o tamanho das partículas retidas no fundo do equipamento com eficiência de 50%. O diâmetro mínimo foi conceituado por Peçanha (2014) como sendo o menor diâmetro possível de ser coletado pelo equipamento adotando sempre com eficiência máxima de 100%. Já o diâmetro máximo relaciona o maior diâmetro que o equipamento conseguiu separar nas condições operacionais mencionadas (SVAROVSKY, 2000).

Como visto na **Figura 28** as informações relativas à grade de eficiência de coleta não foi facilmente visualizada. Neste caso, conforme mensagem apresentada pelo aplicativo recomenda-se para melhor visualização ativar o modo rotacional do android e posicionar a tela do *smartphone* na horizontal.

Figura 27 – Recepção de informações para cálculo do diâmetro de corte (Caso 1).

Centrifugas

Métodos de dimensionamento de Centrífugas

Determinar:

- Diâmetro de Corte
- Vazão de projeto
- Raio interno da centrífuga
- Altura da centrífuga
- Scale Up do equipamento

CANCEL OK

Centrifugas

Métodos de dimensionamento de Centrífugas

Determinar: Diâmetro de...

Densidade_{sól.}(g/cm³): 2,64

Densidade_{liq.}(g/cm³): 1

Viscosidade (P): 0,01

Velocidade_{rotacão} (rpm): 20000

Aceleração_{grav.} (m/s²): 9,81

Vazão (cm³/s): 8

Centrifugas

Vazão (cm³/s): 8

Raio_{alimentação} (R₀)(cm): 1,1

Raio_{interno do equipamento} (R)(cm): 2,2

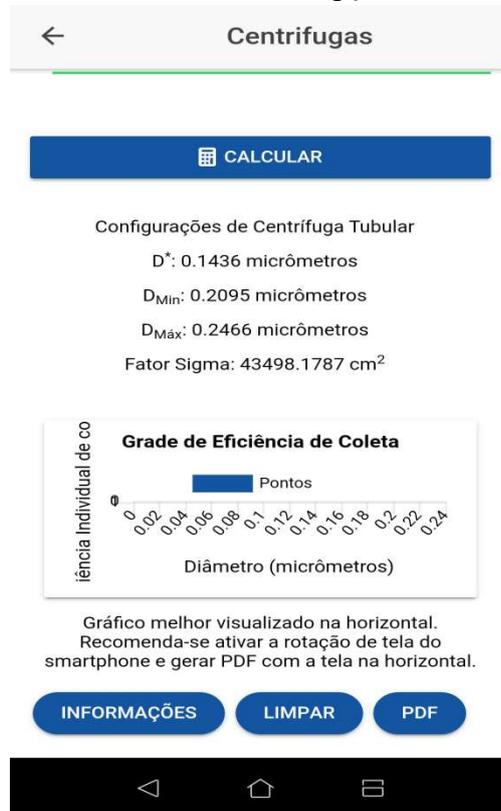
Altura_{equipamento} (L)(cm): 20

CALCULAR

INFORMAÇÕES LIMPAR

Fonte: Da Autora (2019).

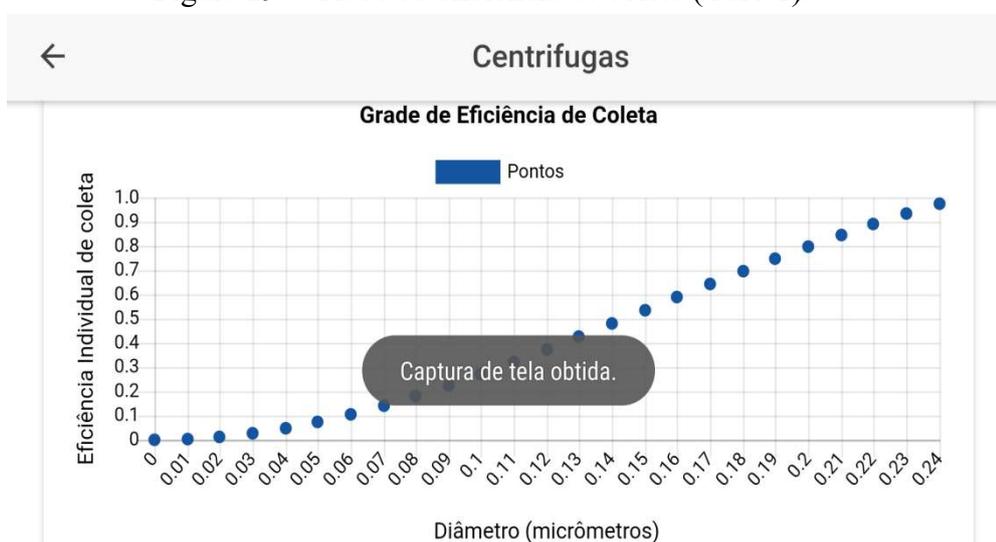
Figura 28 – Resultados de acordo com a opção diâmetro de corte (Caso 1).



Fonte: Da Autora (2019).

Em atividade semelhante Silva e Santos (2017), determinou valor idêntico ao diâmetro de corte do aplicativo de 0,1436 μm . Em contrapartida, Svarovsky (2000) nessas mesmas condições, apresentou diâmetro de corte de 0,142 μm . Ele explicou que para cálculo dessa atividade utilizou-se o conceito da velocidade terminal e fator sigma. Segundo Svarovsky (2000) este conceito é mais realista. Ele sugeriu também realizar a análise da grade de eficiência de coleta. Dessa forma, o aplicativo exibiu através da **Figura 29** a grade de eficiência de coleta conforme sugestão do autor. Ao verificar a figura, percebeu que a grade de eficiência fornecia um valor aproximado de diâmetro de corte de 0,14 μm .

Figura 29 – Grade de eficiência de coleta (Caso 1).



Fonte: Da Autora (2019).

A experiência visual notada no aplicativo apresentou uma limitação ou peculiaridade em relação à confecção de gráficos. Devido ao tamanho da tela do *smartphone*, os pontos intermediários aos demonstrados no gráfico não foram facilmente retirados. Além do mais, a margem gráfica limita a distribuição dos resultados na tela do aplicativo.

Depois de analisados os resultados apresentados pelo aplicativo, o usuário pôde realizar o procedimento para gerar o arquivo da atividade em formato pdf clicando no botão “PDF” e o resultado observado encontra-se no apêndice C.

5.1.2 Caso 2: Raio interno da centrífuga

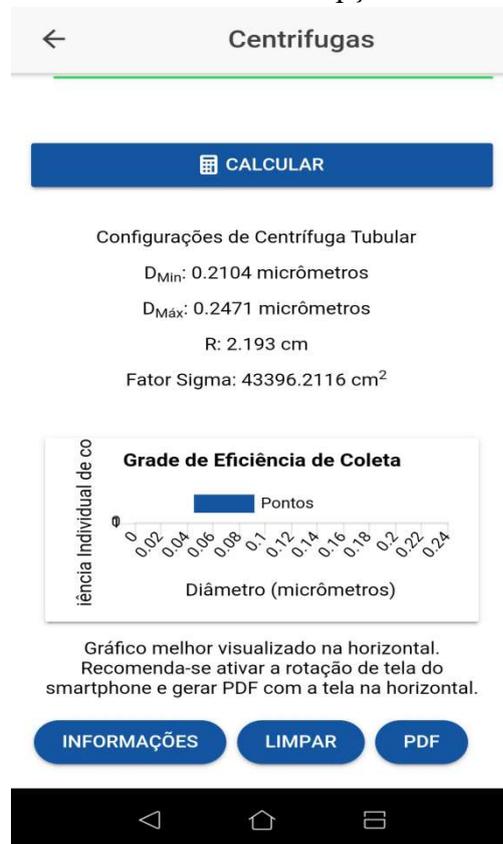
Semelhantemente ao caso anterior, primeiramente o usuário escolheu a opção “Raio interno do equipamento” e preencher as informações solicitadas conforme a **Figura 30**.

Figura 30 – Recepção de informações para cálculo do raio interno (Caso 2).

The figure consists of three sequential screenshots of a mobile application interface for calculating centrifuge parameters. The first screenshot shows a 'Determinar:' (Determine) menu with five options: 'Diâmetro de Corte', 'Vazão de projeto', 'Raio interno da centrifuga' (selected), 'Altura da centrifuga', and 'Scale Up do equipamento'. The second screenshot shows the main input screen with the following parameters: 'Determinar:' set to 'Raio interno ...', 'Densidade sól.(g/cm³):' 2,64, 'Densidade liq.(g/cm³):' 1, 'Viscosidade (P):' 0,01, 'Velocidade de rotação (rpm):' 20000, 'Aceleração grav. (m/s²):' 9,81, and 'Diâmetro partículas (micrometros):' 0,144. The third screenshot shows the 'CALCULAR' button, 'INFORMAÇÕES' button, and 'LIMPAR' button.

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 31 – Resultados de acordo com a opção de raio interno (Caso 2).



Fonte: Da Autora (2019).

Este segundo estudo procurou demonstrar que as funcionalidades do aplicativo estavam condizentes umas com as outras. Neste caso, esperava-se um resultado próximo ao raio interno do caso 1 que foi de 2,2 cm. O valor calculado pelo aplicativo foi demonstrado na **Figura 31**.

Observou na **Figura 31** um raio interno de 2,193 cm. Ao considerar os Algarismos significativos o resultado tornou-se de 2,2 cm como era aguardado, cumprindo assim as expectativas. O *layout* do arquivo em pdf deste caso também se encontra disponível no Apêndice C.

5.1.3 Caso 3: *Scale Up* de centrífugas

Diante desta atividade o usuário optou no aplicativo para função *Scale Up* do equipamento, pois a partir da realização da ampliação de escala o técnico conseguiu determinar a vazão de alimentação que deveria entrar na centrífuga tubular industrial.

Ao selecionar a opção “*Scale Up* do equipamento” o usuário foi direcionado a informar as condições de operação da centrífuga de laboratório tais como vazão (Q), velocidade (v) e aceleração gravitacional além dos dados dimensionais (R_{int} , R e L). Posteriormente, foram acrescentadas as condições almejadas para a ampliação de escala. Essa coleta de dados foi apresentada na **Figura 32**.

Figura 32 – Recepção de informações para cálculo de *Scale Up* (Caso 3).

The figure consists of three sequential screenshots of a mobile application interface for centrifuge calculations. The first screenshot shows a menu titled "Métodos de dimensionamento de Centrífugas" with a "Determinar:" section. The option "Scale Up do equipamento" is selected with a blue radio button. The second screenshot shows the "Informações da Centrífuga Tubular Laboratorial:" screen with the following input fields: Vazão (cm³/s): 8,333; Velocidade_{rotacão} (rpm): 18000; Aceleração_{grav.} (m/s²): 9,81; Fator_{sigma}: 1; and Raios (cm): 2,5. Below these fields is the instruction "*Informe fator sigma OU dados abaixo:". The third screenshot shows the "Informações da Centrífuga Tubular Industrial:" screen with the following input fields: Altura_{equipamento} (L)(cm): 20; Velocidade_{rotacão} (rpm): 12000; Raio_{alimentação} (R_o) (cm): 5; Raio_{interno do equipamento} (R) (cm): 7,5; and Altura_{equipamento} (L)(cm): 50. A blue "CALCULAR" button is visible at the bottom of the screen.

Fonte: Da Autora (2019).

Após a coleta de dados, ao clicar em “Calcular”, o resultado trouxe as informações do fator sigma das centrífugas de laboratório e industrial além do objeto de estudo, a vazão de alimentação. Esses resultados foram demonstrados na **Figura 33**, cuja vazão estabelecida no PEIQ foi aproximadamente de $124,55 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

Figura 33 – Resultados de acordo com o *Scale Up* do equipamento (Caso 3).

Centrifugas

Raio_{alimentação} (R₀) (cm):
5

Raio_{interno do equipamento} (R) (cm):
7,5

Altura_{equipamento} (L)(cm):
50

CALCULAR

Configurações de Centrifuga Tubular

Q_{Ind}: 124.5459 cm³/s

Fator Sigma_{Lab}: 10513.0688 cm²

Fator Sigma_{Ind}: 157129.4255 cm²

INFORMAÇÕES **LIMPAR**

Fonte: Da Autora (2019).

O resultado previsto para essa atividade e disponibilizado por Cremasco (2014) encontra-se organizados através da **Tabela 14**.

Tabela 14 – Resultados apresentados por Cremasco (2014) para o Caso 3.

Centrífuga	L (cm)	R ₀ (cm)	R (cm)	Ω (RPM)	Σ (cm ²)	Q (L h ⁻¹)
Laboratório	20	1,0	2,5	18000	10513,069	30
Industrial	50	5,0	7,5	12000	157129,425	448,383

Fonte: Adaptado de Cremasco (2014).

Notou-se que a unidade de vazão apresentada pelo aplicativo foi $\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}$ e na atividade em L h^{-1} . Para tornar o resultado ainda mais nítido converteu-se a vazão do aplicativo para a mesma unidade apresentada por Cremasco (2014) utilizando o módulo de conversão de unidades obtendo resultado de $448,365 \text{ L h}^{-1}$, valor ligeiramente menor que a vazão de referência. Isto pode estar relacionado à conversão da vazão de alimentação da centrífuga de laboratório do qual gerou em um número dizimal.

Da mesma forma que o caso anterior, no Apêndice C encontram-se os resultados gerados pelo usuário ao clicar em “PDF” para essa atividade.

Apesar de terem realizados apenas três testes de validação do aplicativo, o módulo foi considerado apto no atendimento de suas funcionalidades como nota-se na **Tabela 15**. Ela apresenta resumidamente as informações das atividades, resultados apontados pelos autores e aplicativo, além dos desvios.

Tabela 15 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Centrífuga”.

	Função	Informações das atividades		Resultados		Desvio (%)	
				Esperados	PEIQ		
Caso 1	D*	$\rho_s = 2,64 \text{ g cm}^{-3}$ $\rho_f = 1,00 \text{ g cm}^{-3}$ $\mu = 0,01 \text{ P}$ $\omega = 2000 \text{ RPM}$	$Q_A = 8 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $R_0 = 1,1 \text{ cm}$ $R_{int} = 2,2 \text{ cm}$ $L = 20 \text{ cm}$	Silva; Santos (2017)	0,1436 μm	0,1436 μm	0,00
				Svarovsky (2000)	0,142 μm		1,13
Caso 2	R_{int}	$\rho_s = 2,64 \text{ g cm}^{-3}$ $\rho_f = 1,00 \text{ g cm}^{-3}$ $D^* = 0,144 \mu\text{m}$ $\omega = 2000 \text{ RPM}$	$Q_A = 8 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ $R_0 = 1,1 \text{ cm}$ $\mu = 0,01 \text{ P}$ $L = 20 \text{ cm}$	Silva; Santos (2017)	2,2 cm	2,193 cm	0,32
Caso 3	Scale Up	$R_0 = 1,0 \text{ cm}$ $R_{int} = 2,5 \text{ cm}$ $L = 20 \text{ cm}$ $\omega = 18000 \text{ RPM}$ $Q_A = 8,333 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	$R_0 = 5,0 \text{ cm}$ $R_{int} = 7,5 \text{ cm}$ $L = 500 \text{ cm}$ $\omega = 12000 \text{ RPM}$	Cremasco (2014)	$Q=448,383 \text{ L h}^{-1}$	$Q=448,365 \text{ L h}^{-1}$	0,00
					$\Sigma=157129,4 \text{ cm}^2$	$\Sigma=157129,4 \text{ cm}^2$	0,00

Fonte: Da Autora (2019).

5.2 MÓDULO CICLONE

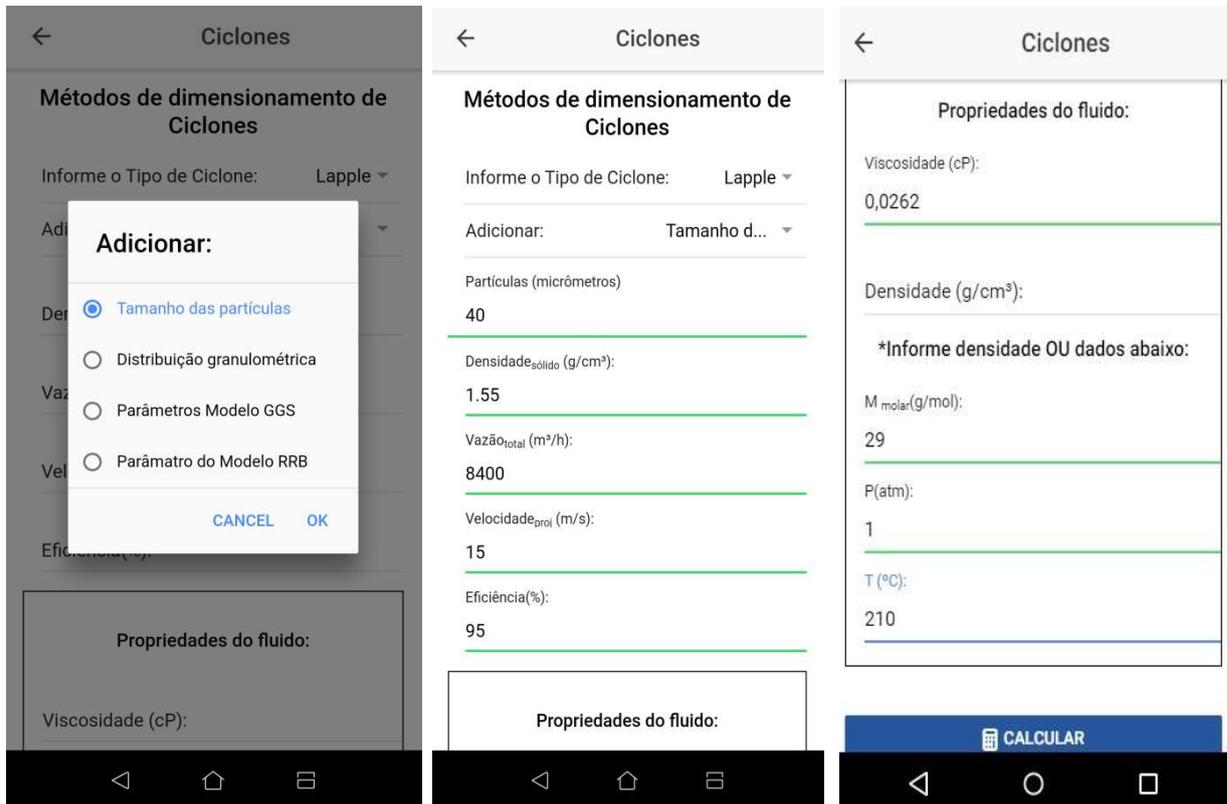
A validação do módulo “Ciclone” foi testada com os casos 4 a 6 direcionados a configuração de ciclones Lapple.

5.2.1 Caso 4: Ciclone Lapple a partir do tamanho das partículas

Para verificar o posicionamento estabelecido por Massarani (2002) foi utilizado o aplicativo “PEIQ” na modalidade “Ciclone”. Neste, o usuário selecionou o tipo de equipamento “Lapple” e em seguida, a opção de cálculo do diâmetro de corte através do tamanho das partículas. A essa requisição solicitou ainda, o diâmetro das partículas e as condições operacionais como vazão, velocidade de projeto, eficiência, além da massa específica de partículas e das propriedades do fluido.

Neste caso, o usuário teve que recorrer ao livro do Geankopolis (2010) para obter a viscosidade do fluido, informação não mencionada por Massarani (2002), considerou-se o valor de 0,0262 cP. A coleta das informações pelo aplicativo foi demonstrado na **Figura 34**.

Figura 34 – Recepção das informações para a configuração de ciclones Lapple (Caso 4).

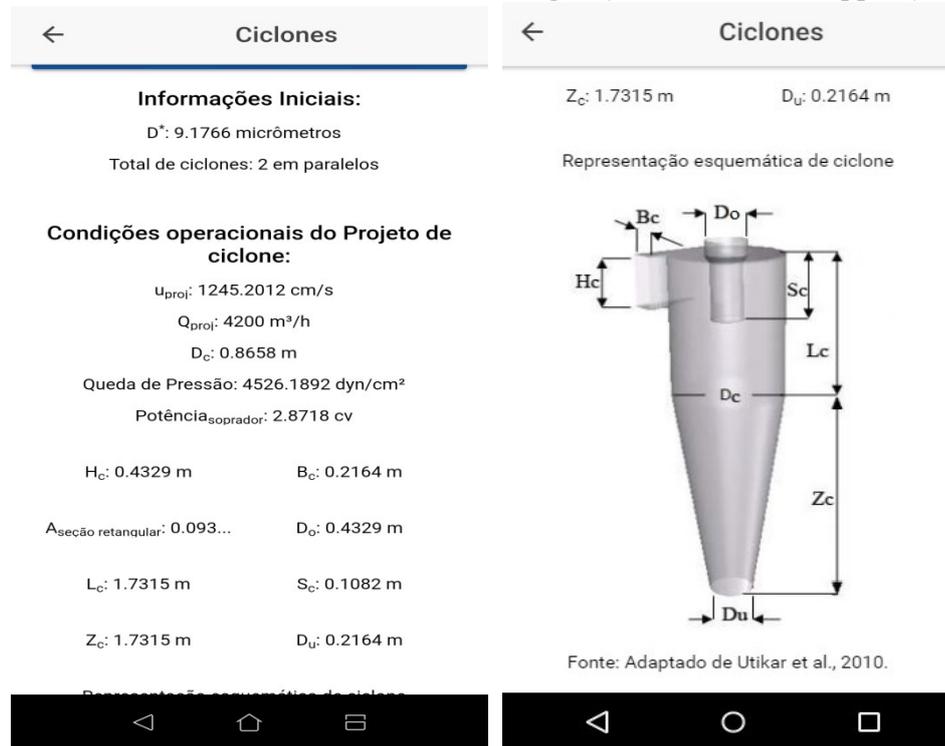


Fonte: Da Autora (2019).

O usuário ao clicar no botão “calcular” visualizou a necessidade de o sistema operar com 2 ciclones Lapple alinhados paralelamente e com diâmetro da parte cilíndrica (D_c) de aproximadamente 0,9 m. Além dessas informações, o aplicativo indicou o diâmetro de corte, a velocidade e a vazão de operação desses ciclones e, ainda, as dimensões do equipamento como notado na **Figura 35**.

De acordo com Massarani (2002) para atingir a eficiência desejada seria necessário utilizar 2 ciclones paralelo com diâmetro aproximadamente 1 metro, confirmando as informações visualizados no aplicativo. No Apêndice C encontra-se a disponibilidade de informações apresentadas no arquivo gerado em pdf este estudo de caso.

Figura 35 – Resultados de acordo com a configuração de ciclones Lapple (Caso 4).



Fonte: Da Autora (2019).

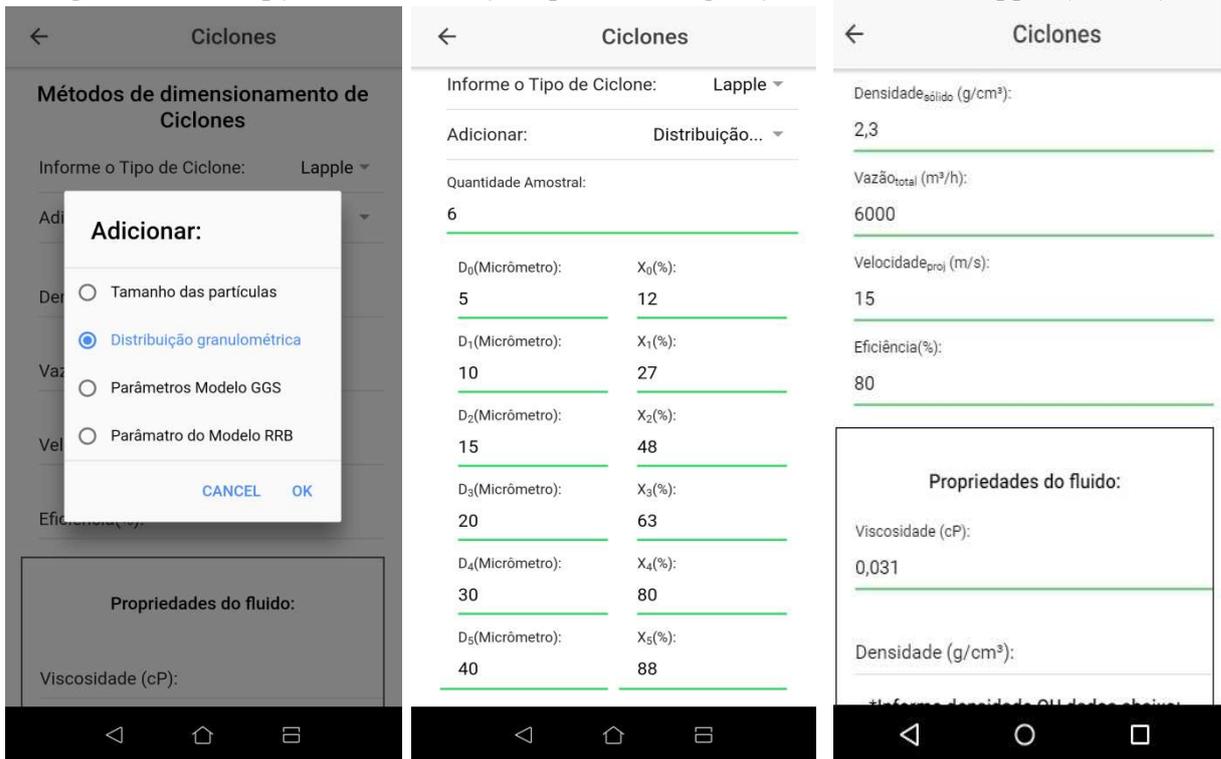
5.2.2 Caso 5: Ciclone Lapple a partir da análise da distribuição granulométrica

Para o contexto citado, o usuário do aplicativo escolheu o tipo Lapple e a segunda opção de cálculo do diâmetro de corte através da distribuição granulométrica. Registrou-se o número de amostras habilitando a inserção da tabela de distribuição granulométrica (**Tabela 8**), das condições operacionais e das propriedades das partículas e fluido, etapa visualizada na **Figura 36**.

Após o levantamento de dados, o resultado foi apresentado na **Figura 37** constatando a configuração com 10 equipamentos Lapple de 0,30 metros de diâmetro cilíndrico e potência de 1,76 cv. Foi citado resultado semelhante por Massarani (2002), em que apontou para esta atividade 10 ciclones organizados em paralelo com diâmetro cilíndrico de 30 cm e potência do soprador aproximadamente de 2 cv.

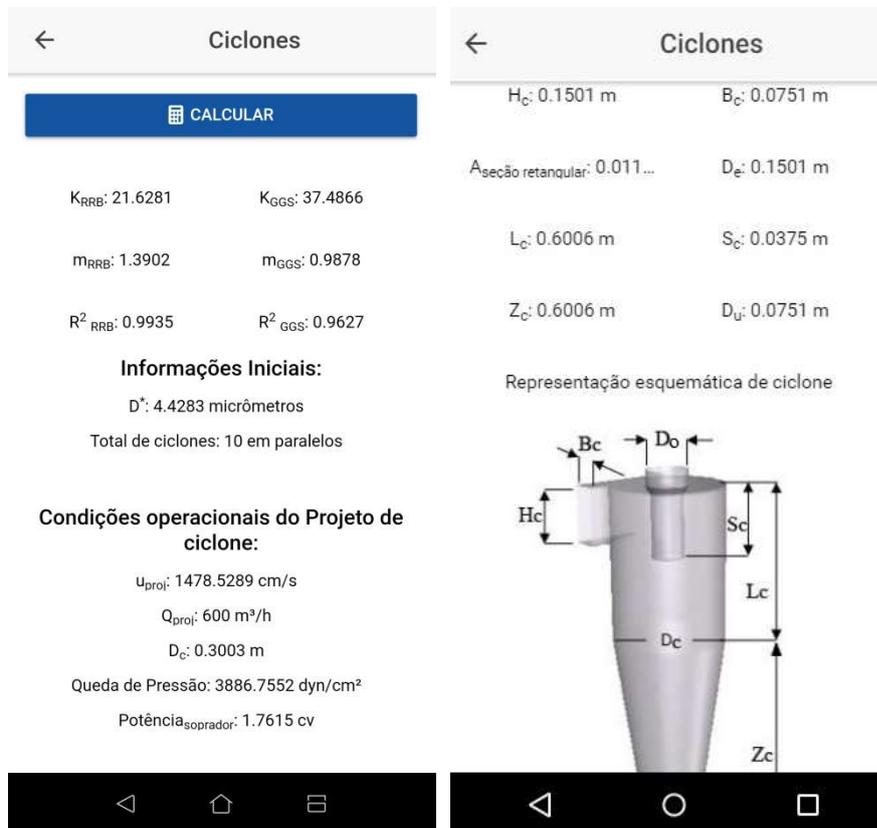
Ainda em relação ao caso, verificou que os dados da **Tabela 8** foram melhores ajustados para o modelo RRB, com os parâmetros diâmetro (D) aproximadamente 21,6281 μm, n 1,39 e variância (R²) de 99,35%. Com esta modelagem obteve o diâmetro de corte em torno de 4,43 μm. Essas informações adicionais não foram contempladas por Massarani (2002), mais mostram o caminho percorrido para auxiliar o usuário a melhor compreender ou reproduzir a atividade.

Figura 36 – Recepção das informações para a configuração de ciclones Lapple (Caso 5).



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 37 – Resultados de acordo com a configuração de ciclones Lapple (Caso 5).



Fonte: Da Autora (2019).

Semelhantemente as atividades anteriores no apêndice C podem ser visto como ficou a aparência do arquivo pdf para este estudo.

5.2.3 Caso 6: Ciclone Lapple a partir dos parâmetros do modelo RRB

Para esta opção, o usuário escolheu a família de ciclones e os “Parâmetros do modelo R.R.B.” e posteriormente, os demais dados pertinentes conforme visto na **Figura 38**.

Figura 38 – Recepção das informações para a configuração de ciclones Lapple (Caso 6).

The figure consists of three screenshots from a mobile application. The first screenshot shows a selection menu for 'Adicionar:' with options: 'Tamanho das partículas', 'Distribuição granulométrica', 'Parâmetros Modelo GGS', and 'Parâmetro do Modelo RRB' (selected). The second screenshot shows the 'Métodos de dimensionamento de Ciclones' screen with the following data: 'Informe o Tipo de Ciclone: Lapple', 'Adicionar: Parâmetro d...', 'Diâmetro_{model...}: 21,5', 'n: 1,35', 'Densidade_{sólido} (g/cm³): 2,3', 'Vazão_{total} (m³/h): 6000', 'Velocidade_{prol} (m/s): 16', and 'Eficiência(%): 80'. The third screenshot shows the 'Propriedades do fluido:' screen with the following data: 'Viscosidade (cP): 0,0347', 'Densidade (g/cm³): *Informe densidade OU dados abaixo:', 'M_{molar}(g/mol): 29', 'P(atm): 1', and 'T (°C): 520'. A 'CALCULAR' button is visible at the bottom of the third screenshot.

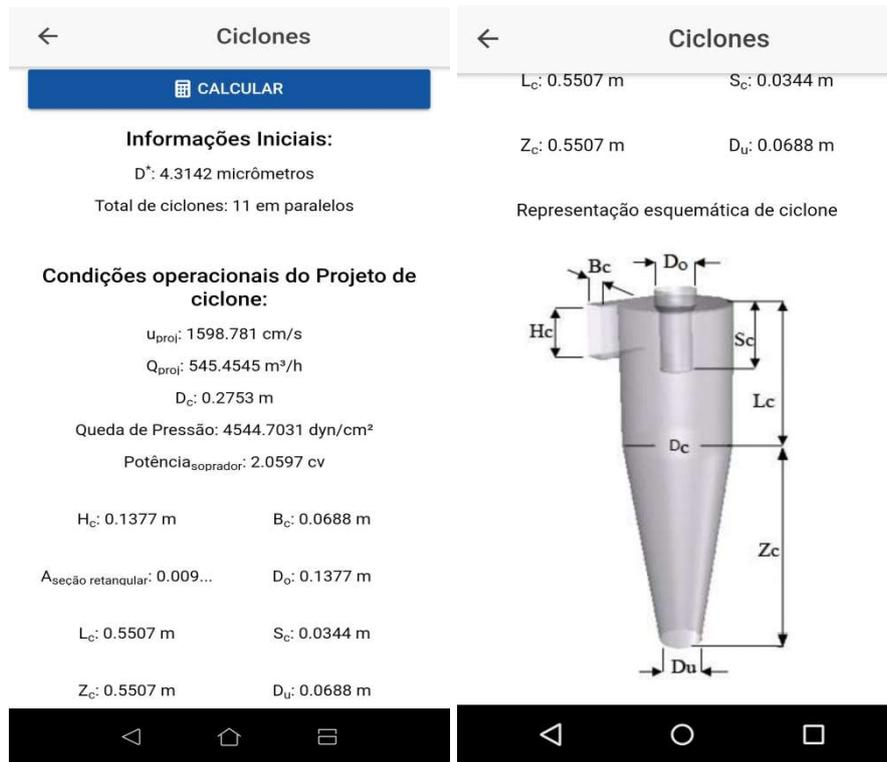
Fonte: Da Autora (2019).

Após receber as informações da atividade e acionado o botão “calcular”, o resultado obtido foi representado pela **Figura 39**.

Segundo o autor espera-se diâmetro de corte de 4,31 μm , operando com 11 ciclones paralelamente e com potência de aproximadamente 2,05 HP. Observando os resultados apresentados e comparando-os com os dados elencados por Moreira (2017) concluiu a similaridade dos resultados apresentados.

O aplicativo apresentou o resultado da potência em unidade cavalo-vapor, convertendo através do módulo de conversão de unidades para a unidade Horse-Power o valor aproximado foi de 2,03 HP. Todas as informações apresentadas no estudo de caso podem ser conferidas também no apêndice C.

Figura 39 – Resultados de acordo com a configuração de ciclones Lapple (Caso 6).



Fonte: Da Autora (2019).

De forma a provar novamente que o aplicativo estava operando com bom resultado nos projetos de ciclones disponibilizou-se na **Tabela 16** os comparativos dos resultados apresentados pelos autores e do aplicativo, além dos desvios calculados em cada estudo de caso.

Tabela 16 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Ciclone”.

	Informações resumidas		Resultados		Desvio (%)
			Esperados	PEIQ	
Caso 4	$Q_A = 140 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ $D^* = 40 \text{ }\mu\text{m}$ $\eta = 95\%$ $\mu = 0,0262 \text{ cP}$	$\rho_s = 1,55 \text{ g cm}^{-3}$ Fluido: Ar $P = 1 \text{ atm}$ $T = 210^\circ\text{C}$	2 ciclones Lapple	2 ciclones Lapple	0,00
			Massarani (2002) $D_c = 1 \text{ m}$	$D_c = 0,9 \text{ m}$	10,00
Caso 5	$Q_A = 100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ $\eta = 80\%$ $\mu = 0,031 \text{ cP}$	$\rho_s = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ Fluido: Ar $P = 1 \text{ atm}$ $T = 520^\circ\text{C}$	10 ciclones Lapple	10 ciclones Lapple	0,00
			Massarani (2002) $D_c = 30 \text{ cm}$ $W = 2,0 \text{ cv}$	$D_c = 30 \text{ cm}$ $W = 1,8 \text{ cv}$	10,00
Caso 6	$V = 16 \text{ m s}^{-1}$ $\rho_s = 2,3 \text{ g cm}^{-3}$ $Q_A = 100 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ $D_{RRB} = 21,5 \text{ }\mu\text{m}$ $n_{RRB} = 1,35$	$\mu = 0,0347 \text{ cP}$ $\eta = 80\%$ Fluido: Ar $P = 1 \text{ atm}$ $T = 520^\circ\text{C}$	11 ciclones Lapple	11 ciclones Lapple	0,00
			Moreira (2017) $D^* = 4,31 \text{ }\mu\text{m}$ $W = 2,05 \text{ HP}$	$D^* = 4,31 \text{ }\mu\text{m}$ $W = 2,03 \text{ HP}$	1,46

Fonte: Da Autora (2019).

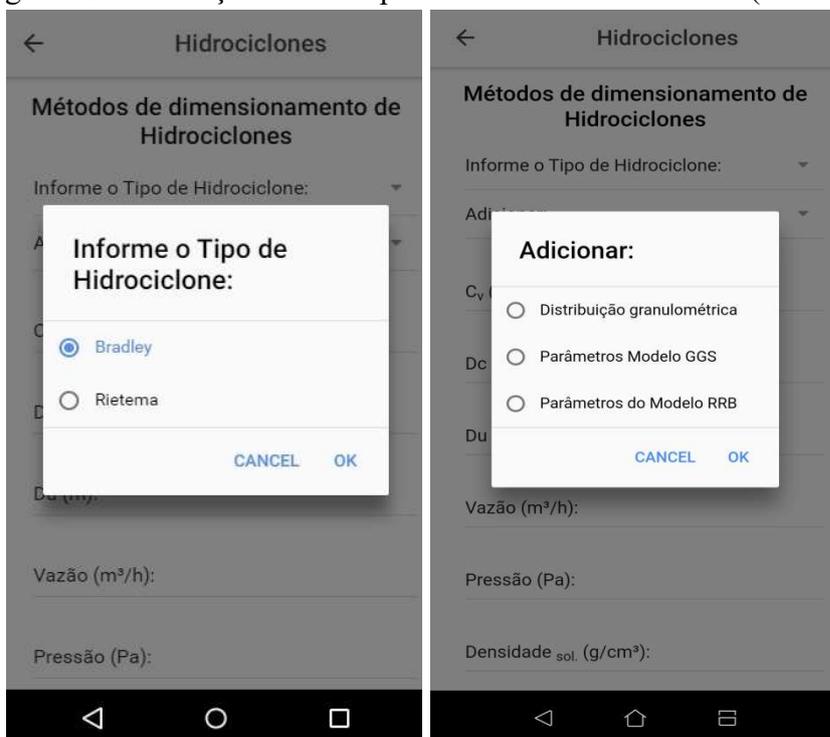
5.3 MÓDULO HIDROCICLONE

Para verificar a funcionalidade do módulo “Hidrociclone” foi adotado os casos 7, 8 e 9, no qual foi contemplado duas configurações de equipamento, Bradley e Rietema.

5.3.1 Caso 7: Hidrociclone Bradley a partir da análise granulométrica

Para analisar este caso, o usuário primeiramente selecionou a configuração do hidrociclone Bradley e em seguida, escolheu-se a opção 1, distribuição granulométrica para inclusão de dados como visto na **Figura 40**.

Figura 40 – Condições iniciais para o módulo Hidrociclone (Caso 7).



Fonte: Da Autora (2019).

Após esse momento, o usuário ainda informou as demais variáveis, como pressão, concentração volumétrica na alimentação, vazão e as propriedades físicas, além é claro da distribuição granulométrica, conforme **Figura 41**.

Para a situação do módulo de hidrociclone o usuário tem opção de calcular conforme método apresentado por Massarani (2002) ou Medronho (1984). Neste cenário, ao escolher o primeiro método mencionado resultou e valores menores que o aguardado pela atividade, totalizando 16 hidrociclones em paralelo, com diâmetro de corte equivalente 4,17 μm para um

sistema operando a 89,5 % de eficiência. Ao optar pelo método de Medronho (1984), foi encontrado um sistema com 18 hidrociclones para remoção de partículas de $4,46 \mu\text{m}$ e eficiência de 91,60 %. A concentração encontrada no duto *underflow* foi de $0,0414 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esses resultados estão disponíveis na **Figura 43** e apresentados também no apêndice C.

Figura 41 – Recepção das informações para configuração de hidrociclone Bradley (Caso 7).

Hidrociclones		Hidrociclones	
Informe o Tipo de Hidrociclone:	Bradley	$C_p \text{ (m}^2/\text{m}^2\text{)}$:	0,01
Adicionar:	Distribuição...	$D_c \text{ (m)}$:	0,06
Quantidade de Ensaios:	6	$D_u \text{ (m)}$:	0,008
$D_0 \text{ (Micrômetro)}$:	5	$X_0 \text{ (%)}$:	12
$D_1 \text{ (Micrômetro)}$:	10	$X_1 \text{ (%)}$:	29
$D_2 \text{ (Micrômetro)}$:	15	$X_2 \text{ (%)}$:	46
$D_3 \text{ (Micrômetro)}$:	20	$X_3 \text{ (%)}$:	60
$D_4 \text{ (Micrômetro)}$:	30	$X_4 \text{ (%)}$:	80
$D_5 \text{ (Micrômetro)}$:	40	$X_5 \text{ (%)}$:	92
		Vazão $\text{(m}^3/\text{h)}$:	50
		Pressão (Pa) :	344738
		Densidade $_{sol.} \text{ (g/cm}^3\text{)}$:	2,8
		Densidade $_{liq.} \text{ (g/cm}^3\text{)}$:	1
		Viscosidade (cP) :	1

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 42 – Resultados de acordo com o método de Massarani (2002) (Caso 7).

MASSARANI
MILHO; MEDRONHO (2000) E ANTUNES; MEDRONHO

K_{RRB} : 21.1728 K_{GGS} : 37.3458
 m_{RRB} : 1.4268 m_{GGS} : 0.9874
 R^2_{RRB} : 0.9998 R^2_{GGS} : 0.975

Informações de projeto:
 D^* : 4.1722 micrômetros
 Total de hidrociclones: 16 em paralelos

Dados de Projeto por Hidrociclone:
 Q_{proj} : $3.0862 \text{ m}^3/\text{h}$
 Eficiência $_{proj}$: 89.4938 %
 Conc. *underflow*: $0.0317 \text{ m}^3/\text{m}^3$

L_1 : 0.03 m L_2 : 0.02 m
 L : 0 m

Representação esquemática de Hidrociclone

Em que,
 D_c = Diâmetro da parte cilíndrica;
 D_d = Diâmetro do duto de alimentação;
 D_u = Diâmetro no overflow;
 D_s = Diâmetro no underflow;
 L = Comprimento total do hidrociclone;
 L_1 = Comprimento da seção cilíndrica;
 L_2 = Comprimento do vortex finder;

Fonte: Adaptado de Barros e Alves (2014).

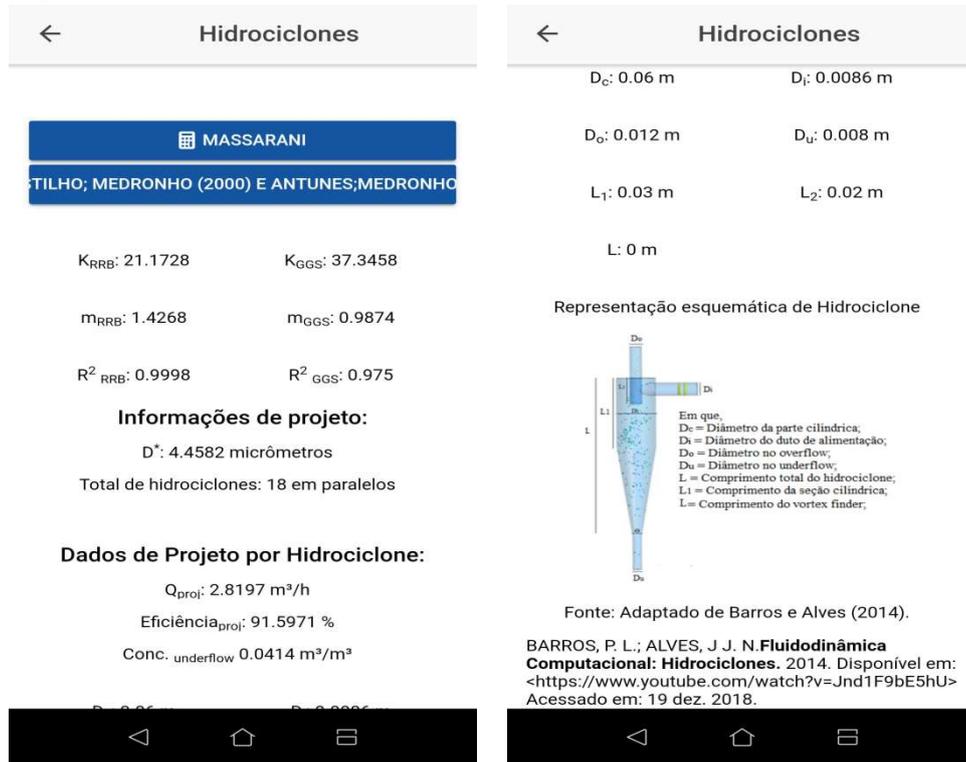
BARRÓS, P. L.; ALVES, J. J. N. **Fluidodinâmica Computacional: Hidrociclones**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Jnd1F9bE5hU>> Acessado em: 19 dez. 2018.

INFORMAÇÕES LIMPAR PDF

Fonte: Da Autora (2019).

Observou-se nas **Figuras 42 e 43**, além dos dados já mencionados, os parâmetros do modelo que melhor se ajustou para o modelo RRB, mostrando uma boa variância (R^2) e as dimensões dos hidrociclones de acordo com a configuração de Bradley, **Tabela 3**.

Figura 43 – Resultados de acordo com o método de Medronho (1984) (Caso 7).



Fonte: Da Autora (2019).

Ao comparar os resultados do aplicativo com os esperados, o método de Medronho (1984) foi o que alcançou valores mais próximos aos resultados do autor, uma vez que se esperava uma configuração de 18 hidrociclones agrupados paralelamente com eficiência global 92% e concentração do *underflow* de 0,042 m³ m⁻³. Isto foi justificado por Peçanha (2014), do qual afirmou que o processo de retiradas das partículas nesses equipamentos envolve dois mecanismos, uma corrente passante e outra fluida, o que dificulta a análise do equipamento com os conceitos apresentados por Massarani (2002), envolvendo tempo de queda e tempo de residência. Por essa razão, as equações que consideram os dados experimentais, portanto, as correlações de dados, melhor caracterizam o desempenho dos hidrociclones, como é demonstrado por Medronho (1984).

5.3.2 Caso 8: Hidrociclone Rietema a partir da análise granulométrica.

Apoiado às condições operacionais deste estudo, o usuário do PEIQ precisou configurar o aplicativo para trabalhar com hidrociclone Rietema, além de definir a quantidade de amostras da distribuição granulométrica e seus valores. Após essas considerações, foram solicitadas as informações apresentadas na **Figura 44**. Considerou neste caso apenas o método de Castilho e Medronho (2000) para hidrociclones Rietema.

Figura 44 – Recepção de informações para análise da distribuição granulométrica (Caso 8).

The figure consists of three screenshots from the PEIQ application. The first screenshot shows a dialog box titled 'Informe o Tipo de Hidrociclone:' with two radio button options: 'Bradley' and 'Rietema'. The 'Rietema' option is selected. Below the options are 'CANCEL' and 'OK' buttons. The second screenshot shows a screen titled 'Hidrociclones' with a table of granulometric distribution data. The table has two columns: 'D_i(Micrômetro):' and 'X_i(%):'. The data points are: (2, 35.5), (4, 59), (6, 72), (8, 80.5), (10, 86), (14, 92), and (20, 96). The third screenshot shows a screen titled 'Hidrociclones' with a list of input parameters for the cyclone design, including: C_v (m²/m³): 0,09; D_c (m): 0,01; D_u (m): 0,0027; Vazão (m³/h): 12,96; Pressão (Pa): 206843; Densidade_{sol.} (g/cm³): 2,5; Densidade_{liq.} (g/cm³): 1; and Viscosidade (cP): 1.

D _i (Micrômetro):	X _i (%):
2	35.5
4	59
6	72
8	80.5
10	86
14	92
20	96

Fonte: Da Autora (2019).

Ao reparar na **Figura 45**, observa-se que o aplicativo sugeriu a necessidade de bateria de hidrociclones Rietema composta por 74 hidrociclones do tipo Rietema atingindo assim, uma eficiência aproximada de 58,94%. Estes resultados foram bem condizentes ao apresentado por Medronho (2012).

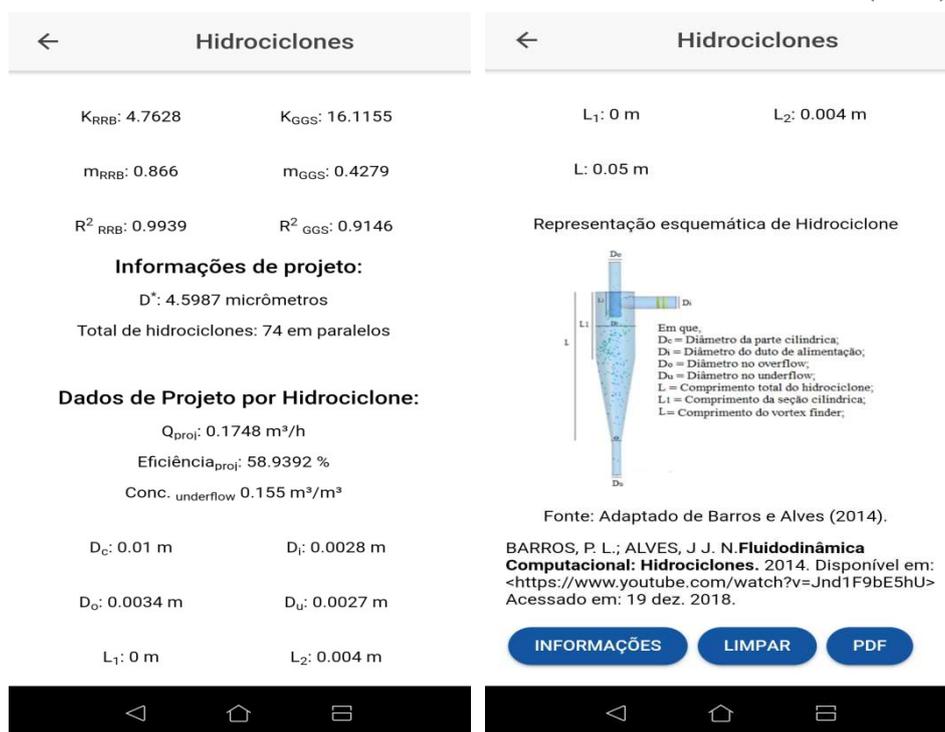
Conforme o autor a melhor solução seria a adição de 74 hidrociclones alinhados em paralelo, para conseguir uma eficiência de 59% no processo (MEDRONHO, 2012). O arquivo gerado também pode ser consultado através do Apêndice C.

Além das informações coerentes com Medronho (2012), o aplicativo ainda trouxe os parâmetros de modelo RRB demonstrando que a tabela de distribuição granulométrica,

Tabela 10, obteve-se bom ajuste de dados para este modelo, com coeficiente de correlação de 0,9939. Além do diâmetro de corte equivalente a 4,60 μm .

Como houve boa coerência nos resultados aguardados tanto para a configuração Rietema (caso 8) quanto Bradley (caso 7), considerou que o método aplicando a análise granulométrica funcionou eficientemente no aplicativo.

Figura 45 – Resultados de acordo com o método de Antunes e Medronho (1992), (Caso8).



Fonte: Da Autora (2019).

5.3.3 Caso 9: Hidrociclone Rietema a partir dos parâmetros do modelo RRB

Neste estudo de caso, as informações foram mantidas como no caso anterior, o usuário necessitou escolher o tipo do hidrociclone a trabalhar, neste caso, a configuração Rietema, a opção para informar os parâmetros do Modelo R.R.B. e não mas as informações das análise granulométrica e, posteriormente, as demais variáveis apontadas pelo aplicativo gerando a interface apresentada na **Figura 46**.

Após as considerações apontadas acima o resultado disponibilizado no PEIQ e as dimensões sugeridas para os hidrociclones foram apresentados na **Figura 47** e Apêndice C. Notou-se resultado idêntico ao caso anterior (eficiência de 59% com organização de 74 hidrociclones Rietema). Assim ficou registrado que o usuário pode fornecer os parâmetros dos modelos diretamente ou os meios para ajustar os parâmetros.

Figura 46 – Recepção de informações para parâmetros de modelo RRB (Caso 9).

The figure consists of three sequential screenshots of a mobile application interface for hydrocyclone design. The first screenshot shows a selection menu titled 'Adicionar:' with three options: 'Distribuição granulométrica', 'Parâmetros Modelo GGS', and 'Parâmetros do Modelo RRB' (which is selected). The second screenshot shows the 'Métodos de dimensionamento de Hidrociclones' screen with various input fields: 'Informe o Tipo de Hidrocic...' (Rietema), 'Adicionar:' (Parâmetros ...), C_v (0,09), D_c (0,01), D_u (0,0027), Vazão (12,96), and Pressão (206843). The third screenshot shows the same screen with a list of methods: 'MASSARANI' and 'MEDRONHO(1984) E ANTUNES;MEDRONHO(1992)'. Below the list is a schematic representation of a hydrocyclone.

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 47 – Resultado de acordo os parâmetros de modelo RRB (Caso 9).

The figure consists of two screenshots of the mobile application. The first screenshot shows the 'Informações de projeto:' section with the following data: D^* : 4.5987 micrômetros, Total de hidrociclones: 74 em paralelos, 'Dados de Projeto por Hidrociclone:' Q_{proj} : 0.1748 m^3/h , Eficiência_{proj}: 58.9392 %, Conc. underflow 0.155 m^3/m^3 . Below this are pairs of diameters: D_c : 0.01 m, D_i : 0.0028 m; D_o : 0.0034 m, D_u : 0.0027 m; L_1 : 0 m, L_2 : 0.004 m; and L : 0.05 m. The second screenshot shows a schematic diagram of a hydrocyclone with labels D_c , D_i , D_o , D_u , L_1 , L_2 , and L . A legend explains the labels: D_c = Diâmetro da parte cilíndrica; D_i = Diâmetro do duto de alimentação; D_o = Diâmetro no overflow; D_u = Diâmetro no underflow; L = Comprimento total do hidrociclone; L_1 = Comprimento da seção cilíndrica; L_2 = Comprimento do vortex finder.

Fonte: Adaptado de Barros e Alves (2014).

BARROS, P. L.; ALVES, J. J. N. **Fluidodinâmica Computacional: Hidrociclones**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Jnd1F9bE5hU>> Acessado em: 19 dez. 2018.

Fonte: Da Autora (2019).

Com a apresentação dos estudos de casos deste módulo foi gerado a **Tabela 17**. Verificou-se baixo percentual de erro comprovando boa coerência do aplicativo quanto às funcionalidades propostas neste módulo.

Tabela 17 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Hidrociclone”.

	Informações resumidas		Resultados		Desvio (%)	
			Esperados	PEIQ		
Caso 7	Dc = 6 cm	1% CaCO ₃	Medronho (2012)	18 hidrociclones	18 hidrociclones	0,00
	Du= 0,8 cm	P = 50 psi		Bradley	Bradley	0,43
	Q _A = 50 m ³ h ⁻¹	μ= 1 cP		η = 92%	η = 91,6%	1,43
Caso 8	ρ _f = 1,00 g cm ⁻³	ρ _s = 2,8 g cm ⁻³	Medronho (2012)	Cu = 0,42 m ³ m ⁻³	Cu = 0,414 m ³ m ⁻³	0,00
	Dc = 1 cm	C = 9%		74 hidrociclones	74 hidrociclones	0,10
	Du= 0,27 cm	P = 30 psi		Rietema	Rietema	
Caso 9	Q _A = 12,96 m ³ h ⁻¹	μ= 1 cP	Medronho (2012)	η = 59%	η = 58,94%	0,00
	ρ _f = 1,00 g cm ⁻³	ρ _s = 2,4 g cm ⁻³		74 hidrociclones	74 hidrociclones	
	Dc = 1 cm	C = 9%		Rietema	Rietema	
	Du= 0,27 cm	P = 30 psi		η = 59%	η = 59%	0,10
	Q _A = 12,96 m ³ h ⁻¹	μ= 1 cP				
	ρ _f = 1,00 g cm ⁻³	ρ _s = 2,4 g cm ⁻³				
Dc = 1 cm	C = 9%					
D _{RRB} = 4,7628 μm	n _{RRB} = 0,866					

Fonte: Da Autora (2019).

5.4 MÓDULO CÂMARA DE POEIRA

A aprovação desse módulo foi condicionada aos estudos de casos de 10 a 12 compostos pelas análises das funcionalidades: determinação da esfericidade, dimensões dos compartimentos de cada seção que compõem a câmara de poeira e a faixa granulométrica retida em cada um desses compartimentos.

5.4.1 Caso 10: Esfericidade das partículas

De modo a avaliar a situação proposta por Medronho (2012), o usuário direcionou a atividade para a solicitação de esfericidade das partículas e em seguida preencheu as lacunas apresentadas no PEIQ, tais como: eficiência, vazão, aceleração da gravidade, massa específica do material sólido, diâmetro médio das partículas coletadas, as propriedades do fluido e também as dimensões da câmara de poeira, como visto na **Figura 48**.

Diante das informações prestadas pelos usuários, ao selecionar no botão “Calcular”, o aplicativo retornou o resultado apresentado na **Figura 49**.

Para chegar a esse resultado aplicou-se o método apresentado na seção 4.4.1 e constatou que o processo funcionou a uma velocidade operacional de 5 m s⁻¹ e com número de Reynolds próximo a 111, 24, portanto, o escoamento não foi validado ao regime de Stokes (Re < 1).

Figura 48 – Recepção das informações para esfericidade das partículas (Caso 10).

The figure displays three sequential screenshots of a mobile application interface for dust chamber calculations. The first screenshot shows the input fields for particle diameter ($D_{particulas}$) set to 400 micrometers, fluid viscosity (μ) set to 0.018 cP, and density (ρ) set to 4.7 g/cm³. The second screenshot shows the fluid properties section with viscosity (0.018 cP) and density (4.7 g/cm³) entered. The third screenshot shows the calculation results, including a calculated efficiency of 0.94 and a collection efficiency grade graph.

Fonte: Da Autora (2019).

Segundo Cremasco (2014), para Re na faixa de 1 a 500, considera-se o regime de escoamento intermediário. Além destas conclusões, o usuário constatou uma esfericidade de 0,94, comprovando a afirmação apresentada por Medronho (2012). Outro apontamento do aplicativo foi apresentado através da grade de eficiência de coleta, **Figura 49**.

Figura 49 – Resultados apresentados com a esfericidade das partículas (Caso 10).



Fonte: Da Autora (2019).

Uma falha visual foi constatada ao utilizar o aplicativo, pois a esta situação a grade de eficiência aparentou ser contínua no visor do *smartphone*, fato este não condizente. Tal situação ocorreu devido ao intervalo do diâmetro ser muito grande uma vez que a construção da grade de eficiência iniciou a partir do ponto zero, o próprio ajuste do gráfico na tela do *smartphone* uniu os pontos deixando a sensação continuidade. O mesmo ocorreu quando foi gerado o arquivo em formato pdf apresentado no apêndice C.

5.4.2 Caso 11: Dimensões das seções de uma câmara de poeira

A análise deste caso iniciou-se com o recebimento das condições operacionais, esfericidade, massa específica das partículas, propriedades do fluido e dimensões da câmara, além da quantidade de divisórias que compõem o equipamento analisado e dos diâmetros coletados. Neste caso, o usuário teve que informar apenas os maiores diâmetros das faixas granulométricas. Esses dados foram apresentados na **Figura 50**.

Creмасco (2014) ressaltou que a ordem desses diâmetros deve obrigatoriamente ocorrer do maior para o menor, visto que o primeiro compartimento sempre recupera as partículas mais pesadas e as demais tendem a ser arrastadas.

Figura 50 – Recepção das informações para comprimentos das seções (Caso 11).

Parâmetro	Valor
Métodos de dimensionamento	Dimensões ...
Determinar:	Dimensões ...
Eficiência (%)	100
Vazão (m³/s)	1,167
Aceleração gravidade (m/s²)	9,81
Densidade sól. (g/cm³)	4,5
Esfericidade	0,75
Número compartimentos	4
Propriedades do fluido:	
Viscosidade (cP)	0,01909
Densidade (g/cm³)	0,001091
*Informe densidade OU dados abaixo:	
M molar (g/mol)	
P (atm)	
T (°C)	
Altura (H) (m)	1
Largura (B) (m)	1,5
*Informar os diâmetros em ordem decrescente	
D _{partículas 0} (Micrômetro)	91
D _{partículas 1} (Micrômetro)	59,6
D _{partículas 2} (Micrômetro)	47,9
D _{partículas 3} (Micrômetro)	41,3

Fonte: Da Autora (2019).

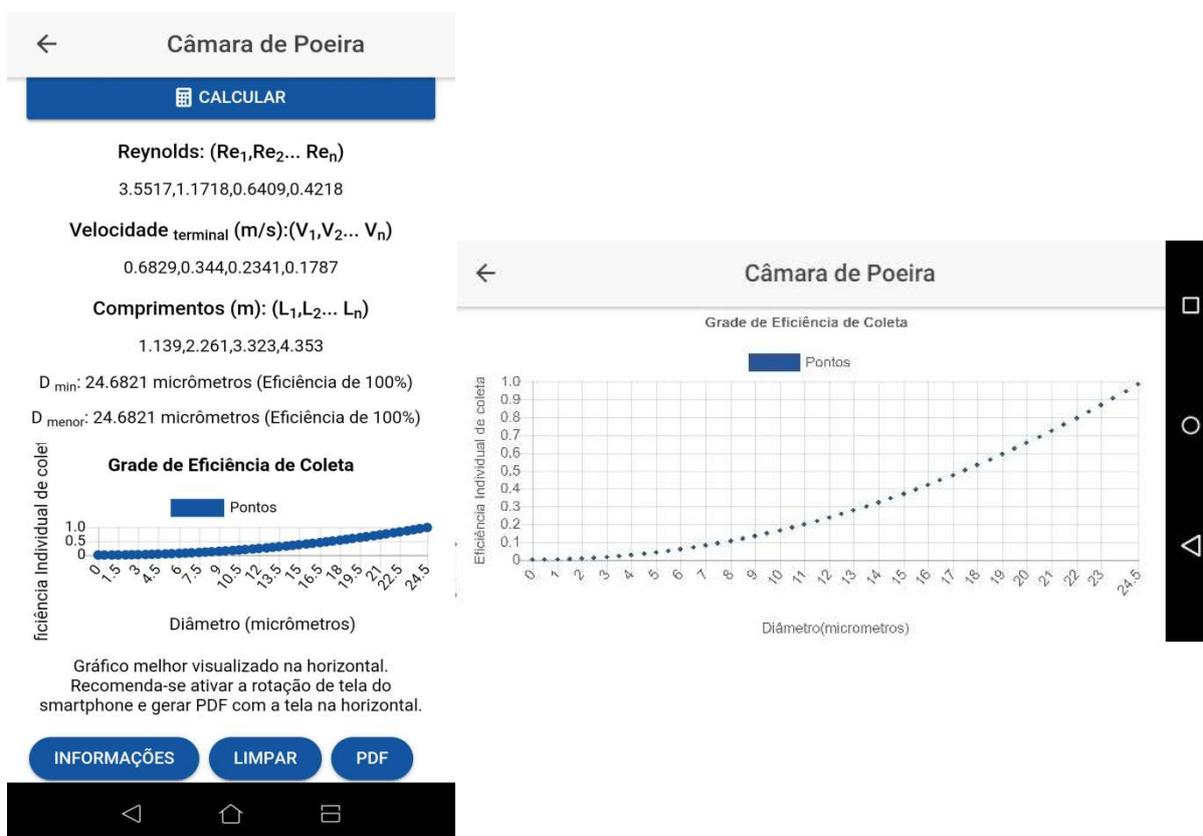
Ao selecionar a opção para aplicar o método, o resultado foi reproduzido na **Figura 51** e também no apêndice C.

Notou-se que o aplicativo informou o número de Reynolds e a velocidade terminal para cada compartimento. Analisando esses valores constatou-se que os dois últimos compartimentos operavam em regime de escoamento de Stokes, $Re < 1$ e que os compartimentos de coleta apresentaram comprimentos L_1, L_2, L_3 e L_4 iguais a 1,14; 2,26; 3,32 e 4,35 metros, respectivamente. Valores concordantes com o estudo.

A grade de eficiência desse estudo não foi apresentada de forma contínua como ocorrido no caso anterior, uma vez que o diâmetro mínimo foi de aproximadamente 25 μm , ficando melhor ajustado a tela do aplicativo.

Em uma análise visual da grade de eficiência, o diâmetro de corte estabelecido foi algo em torno de 17,5 μm . Lembrando que o diâmetro de corte é estabelecido na eficiência de 50% do processo.

Figura 51 – Resultados apresentados de acordo com o Caso 11.



Fonte: Da Autora (2019).

5.4.3 Caso 12: Faixa granulométrica

A partir dessas informações prestadas pelo autor, o usuário habilitou a opção para determinar a faixa granulométrica do equipamento e preencheu as lacunas solicitadas pelo aplicativo.

A **Figura 52** apresentou a coleta de dados para o cenário estipulado por Massarani (2002). Foi considerado nesta averiguação a viscosidade de 0,018 cP e a vazão convertida em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Figura 52 – Recepção das informações para a função faixa granulométrica (Caso 12).

Fonte: Da Autora (2019).

Diante das informações levantadas pelo usuário os resultados obtidos foram demonstrados na **Figura 53** e Apêndice C.

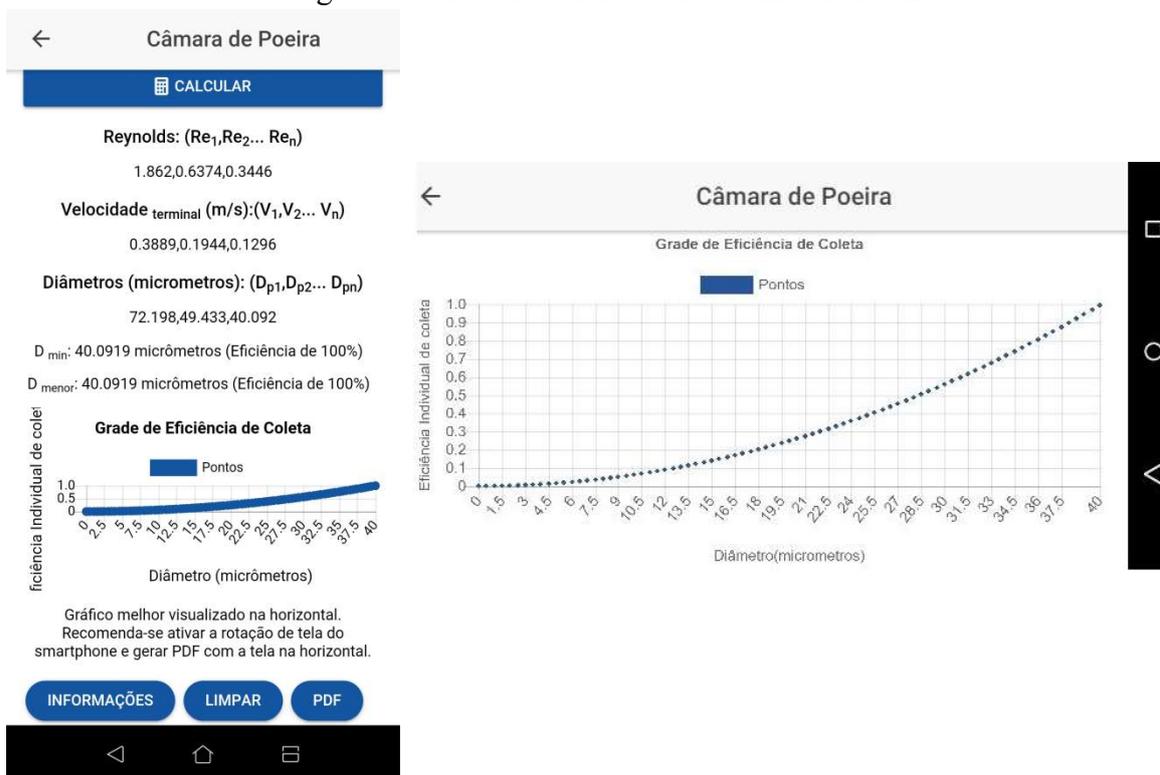
Os diâmetros retidos nas seções da câmara de poeira foram observados por Massarani (2002) e apresentados na **Tabela 18**.

Tabela 18 – Resultados obtidos por Massarani (2002) para o Caso 12.

Compartimentos	L (m)	$v_t (\text{m s}^{-1})$	Re	Diâmetros (μm)
1	1,5	0,390	1,84	72,2
2	3,0	0,195	0,640	49,2
3	4,5	0,130	0,347	40,0

Fonte: Adaptado de Massarani (2002).

Figura 53 – Resultados de acordo com o Caso 12.



Fonte: Da Autora (2019).

Ao analisar o número de Reynolds obtido no aplicativo verificou-se que somente o primeiro compartimento não obedeceu ao regime de Stokes ($Re < 1$). As faixas granulométricas estabelecidas no aplicativo estão apresentadas na **Tabela 19**.

Ao comparar com os resultados do aplicativo com a **Tabela 18**, verificou-se ligeira variação nos compartimentos 1 e 3 quanto ao número de Reynolds e diâmetros. Porém, os resultados comparativos da velocidade terminal demonstraram em conformidade com a **Tabela 18**. Analisando os diâmetros estabelecidos no aplicativo, observou-se ainda, que a maior variação foi justamente no compartimento em que o número de Reynolds condizia com o esperado por Massarani (2002).

Tabela 19 – Apresentação das faixas granulométricas (Caso 12).

Seções da câmara de poeira	1	2	3
Faixas granulométricas	Maior que 72,2 μ m	72,2 – 49,4 μ m	49,4 – 40,1 μ m

Fonte: Da Autora (2019).

Da mesma forma que nos módulos anteriores, a **Tabela 20** apresentou a síntese dos estudos de caso e os desvios comparativos entre o que era esperado e o obtido no aplicativo.

Tabela 20 – Resumo dos estudos de casos apresentados no módulo “Câmara de poeira”.

	Função	Informações resumidas		Resultados		Desvio (%)	
				Esperados	PEIQ		
Caso 10	Esfericidade	B = 1 m L = 1 m H = 1 m u = 5 m s ⁻¹ μ = 0,018 cP > 91 μm	D = 400 μm ρ _s = 4,7 g cm ⁻³ Fluido: Ar P = 1 atm T = 80°C Q _A = 70 m ³ min ⁻¹	Medronho (2012)	0,94	0,94	0,00
					L ₁ = 1,14 m	L ₁ = 1,14 m	0,00
Caso 11	Faixa Granulométrica	91 μm - 59,6 μm 59,6 μm - 47,9 μm 47,9 μm - 41,3 μm Ø = 0,75	ρ _f = 1,091 kg m ⁻³ μ = 0,01909 cP ρ _s = 4,7 g cm ⁻³	Medronho (2012)	L ₂ = 2,26 m	L ₂ = 2,26 m	0,00
					L ₃ = 3,32 m	L ₃ = 3,32 m	0,00
					L ₄ = 4,35 m	L ₄ = 4,35 m	0,00
					D ₁ ≥ 72,2 μm	D ₁ ≥ 72,2 μm	0,00
Caso 12	Diâmetros	B = 1,5 m B = 4 m H = 0,5 m L _i = 1,5 m Ø = 0,75 μ = 0,018 cP	H = 1,0 m Fluido: Ar P = 1 atm T = 20°C Q _A = 140 m ³ min ⁻¹ ρ _s = 3 g cm ⁻³	Massarani (2002)	D ₂ = 72,2 - 49,2 μm	D ₂ = 72,2 - 49,4 μm	0,41
					D ₃ = 49,2 - 40,0 μm	D ₃ = 49,4 - 40,1 μm	0,25

Fonte: Da Autora (2019).

5.5 MÓDULO ELUTRIADOR

Para validar este módulo do aplicativo realizou-se os estudos de casos 13, 14 e 15, no qual os usuários puderam obter a distribuição granulométrica do processo de elutriação, os percentuais de material arrastados e os retidos no fundo e no topo do equipamento. E, por fim, o caso 15 teve a finalidade de comprovar uma possível falha nos ajustes de dados para modelo Sigmóide.

5.5.1 Caso 13: Elutriadores em série

De posse das informações apresentadas na atividade foi realizada a simulação no aplicativo. Neste cenário, o usuário obrigatoriamente teve que marcar a opção elutriadores em série e registrar os cálculos considerando o diâmetro de Stokes. Dessa maneira não foram consideradas informações sobre a esfericidade das partículas, mesmo que o usuário por ventura tenha acrescentado na tela do aplicativo. Estes detalhes podem ser vistos através da **Figura 54**.

Após receber todas as informações aplicou-se o método pertinente e obteve a velocidade em unidades de $m\ s^{-1}$, os diâmetros em micrômetros e a distribuição granulométrica conforme demonstrados na **Figura 55**. O arquivo retirado diretamente do aplicativo para o caso pode ser visualizado também no Apêndice C.

Figura 54 – Recepção de informações para elutriadores em série (Caso 13).

The figure consists of three screenshots from a mobile application. The first screenshot shows a selection menu titled 'Adicionar:' with the following options: 'Elutriadores em série' (selected), 'Faixa Granulométrica', 'Distribuição granulométrica', 'Modelo GGS', 'Modelo RRB', and 'Modelo Sigmóide'. The second screenshot shows the main configuration screen for 'Elutriador' with the following fields: 'Adicionar:' (Elutriadores ...), 'Aceleração_{gravidade} (m/s²): 9,8', 'Densidade_{fluido} (g/cm³): 1', 'Viscosidade (cP): 1,005', 'Quantidade de Elutriadores: 4', 'Diâmetro de Stokes' (checked), and 'Vazão (m³/s): 0,000000616667'. The third screenshot shows the 'Dados do Material' section with 'Massa Material (g): 25', 'Densidade(g/c...): 1,8', 'Esfericidade:', and a table of particle sizes and masses:

D ₀ (Metros):	Massa ₀ (g):
0,03	4,62
D ₁ (Metros):	Massa ₁ (g):
0,04	6,75
D ₂ (Metros):	Massa ₂ (g):
0,06	7,75
D ₃ (Metros):	Massa ₃ (g):
0,12	4,42

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 55 – Resultados de acordo a elutriação em série (Caso 13).

The screenshot shows the results of the elutriation process. It includes a table of particle sizes and masses, a 'CALCULAR' button, and the resulting velocity, diameters, and X values for each elutriator:

D ₀ (Metros):	Massa ₀ (g):
0.03	4.62
D ₁ (Metros):	Massa ₁ (g):
0.04	6.75
D ₂ (Metros):	Massa ₂ (g):
0.06	7.75
D ₃ (Metros):	Massa ₃ (g):
0.12	4.42

CALCULAR

Velocidade (m/s) (Elutriador 1, 2,..., n)
0.000872,0.000491,0.000218,0.000055

Diâmetros (Micrômetros) (Elutriador 1, 2, ..., n)
44.866,33.65,22.433,11.217

X (Elutriador 1, 2,..., n)
0.815,0.545,0.235,0.058

INFORMAÇÕES **LIMPAR** **PDF**

Fonte: Da Autora (2019).

Analisando os resultados apresentados na **Figura 55**, verificou que o aplicativo mostrou coerente aos resultados apresentados por Massarani (2002), **Tabela 21**, não havendo nenhuma consideração a ser feita, apenas ajustes em algarismos significativos.

Tabela 21 – Informações e resultados para a elutriação de um pó industrial (Caso 13).

Elutriador	D_{tubo} (m)	Massa recolhida (g)	Velocidade do fluido (cm/s)	D_p (μm)	Distribuição granulométrica (X)
1	0,03	4,62	0,0872	44,9	0,815
2	0,04	6,75	0,0491	33,7	0,545
3	0,06	7,75	0,0218	22,4	0,235
4	0,12	4,42	0,0545	11,2	0,058

Fonte: Adaptado de Massarani (2002).

5.5.2 Caso 14: Distribuição granulométrica

Considerando os dados informados por Massarani (2002) na seção 4.8.3.2 foi preenchido a tela do aplicativo no módulo elutriador acrescentando a distribuição granulométrica juntamente com as informações dos materiais sólidos, condições operacionais e propriedades do fluido. O procedimento realizado pelo usuário foi observado na **Figura 56**.

Figura 56 – Recepção de informações da distribuição granulométrica (Caso 14).

Fonte: Da Autora (2019).

A partir dessas informações o aplicativo retornou os ajustes para a distribuição granulométrica, considerando o modelo RRB, GGS e Sigmóide para que o usuário pudesse

verificar a melhor configuração dos modelos mencionados através das variâncias (R^2). Os ajustes, assim como, os coeficientes de correlação e os demais resultados podem ser vistos na **Figura 57** e melhor apresentado no Apêndice C.

Figura 57 – Resultados de acordo como estudo de caso 14.

← Elutriador			← Elutriador	
Parâmetros dos modelos			Modelo de distribuição granulométrica RRB	
RRB	GGs	Sigmóide	% Arrastado: 39.715	% Arrastado: 78.665
D': 60.305	K: 96.694	D': 44.793	% Topo: 11.207	% Topo: 88.793
n: 1.588	m: 1.102	p: 2.265	% Fundo: 41.397	% Fundo: 58.603
R ² : 0.997	R ² : 0.964	R ² : 0.994	Modelo de distribuição granulométrica GGS	
K e D' são informados em Micrometros			% Arrastado: 37.035	% Arrastado: 80.372
Informações iniciais			% Topo: 10.33	% Topo: 89.67
Material 1	Material 2		% Fundo: 44.505	% Fundo: 55.495
CD/Re: 680.16	CD/Re: 177.888		Modelo de distribuição granulométrica Sigmóide	
K ₁ : 0.919	K ₁ : 0.87		% Arrastado: 42.604	% Arrastado: 78.482
K ₂ : 1.406	K ₂ : 1.894		% Topo: 11.95	% Topo: 88.05
Re: 0.196	Re: 0.397		% Fundo: 40.006	% Fundo: 59.994
D _{micrometros} : 39.27	D _{micrometros} : 79.307		INFORMAÇÕES LIMPAR	

Fonte: Da Autora (2019).

Comparando os coeficientes de correlação dos modelos ($RRB = 0,997$; $GGs = 0,964$ e $Sigmóide = 0,994$) no PEIQ, notou-se que o melhor ajuste foi para o modelo RRB, informação não condizente com a apresentada por Massarani (2002). Segundo o autor, seus dados ajustaram melhor ao modelo Sigmóide com parâmetros de diâmetro (D') igual a $44,6 \mu\text{m}$ e p de $2,27$.

Para verificar se o modelo Sigmóide ajustado no aplicativo foi adequado ao apresentado por Massarani (2002) fixou-se a atenção apenas os parâmetros de modelo Sigmóide (**Figura 57**) constatando-se que o ajuste fornecido pelo aplicativo teve o diâmetro de $44,79 \mu\text{m}$ e p de $2,265$. Novamente verificou uma boa coerência dos dados se comparado com Massarani (2002) se apresentando apenas com uma ligeira alteração de $0,02 \mu\text{m}$ no diâmetro do modelo.

A **Tabela 22** trouxe um comparativo dos resultados do Massarani (2002) e do aplicativo apontando os valores do número de Reynolds, o diâmetro crítico e percentual de massa arrastada no processo para cada um dos compostos da mistura.

Tabela 22 – Resultados apresentado por Massarani (2002) e pelo aplicativo (Caso 14).

Variáveis	Resultados apresentados por Massarani (2002)		Resultados apresentados pelo aplicativo	
	Galena	Calcário	Galena	Calcário
C_D/Re	680,00	178,00	680,16	177,89
Re	0,196	0,395	0,196	0,397
Diâmetro (μm)	39,20	79,00	39,27	79,30
Percentual de Massa arrastada (%)	43,0	76,00	42,60	78,48

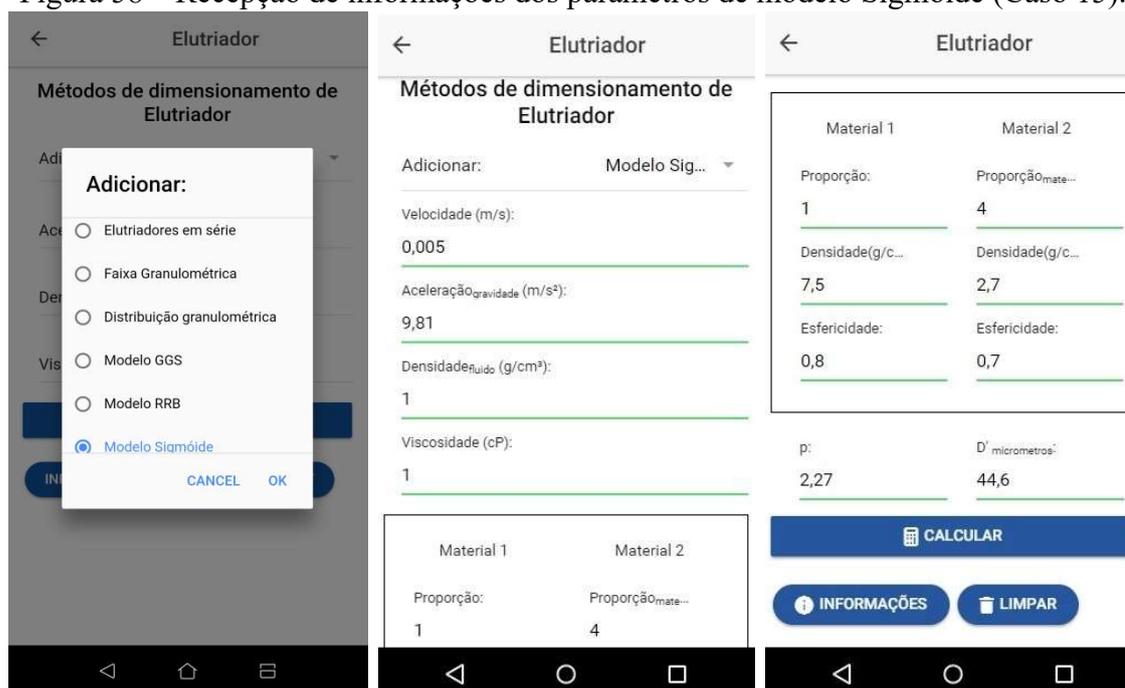
Fonte: Adaptado de Massarani (2002) e da Autora (2019).

A análise na **Tabela 22** apurou que o processo realizado no PEIQ considerando o modelo Sigmóide apresentou coerente aos resultados de Massarani (2002) para a Galena, porém com ligeira alteração para o calcário, o outro composto da mistura sólida.

5.5.3 Caso 15: Parâmetros do modelo Sigmóide

O caso anterior apresentou-se uma variação nos parâmetros ajustados para o modelo Sigmóide resultando em uma variação no percentual de material recolhido. Para verificar se a alteração apresentada foi causada por erro no ajuste do modelo Sigmóide, foi proposto o caso 15 adotando os parâmetros mencionados por Massarani (2002) no estudo de caso 14. A reprodução das informações se encontra na **Figura 58**.

Figura 58 – Recepção de informações dos parâmetros de modelo Sigmóide (Caso 15).



Fonte: Da Autora (2019).

Neste cenário foram consideradas exatamente todas as informações mencionadas por Massarani (2002) inclusive os parâmetros do modelo. O aplicativo retornou o resultado como na **Figura 59**.

Figura 59 – Resultados apresentados de acordo com Caso 15.



Fonte: Da Autora (2019).

Os resultados demonstraram estar coerentes ao apresentado por Massarani (2002) no caso 14. Porém, o percentual de massa arrastada tanto para galena quanto para o calcário continuou apresentando-se maiores aos esperados pelo autor conforme visto na **Tabela 22**. Mesmo assim a galena ainda estava de acordo com Massarani (2002) ao analisar os algarismos significativos.

Os resultados destinados ao calcário continuaram inconsistentes demonstrando haver alguma incoerência no ajuste de dados apresentados por Massarani (2002) que possa ter culminado na discrepância de valores apresentando nos casos 14 e 15, porém, percebe-se resultados semelhantes entre as duas funcionalidades contempladas nos estudos de casos.

De forma a simplificar as conclusões desse módulo, a **Tabela 23**, apresentou um apanhado dos estudos de casos, resultados e desvios comparativos do que era esperado com o apresentado no PEIQ.

Tabela 23 – Resumo dos casos apresentados no módulo Elutriador.

	Função	Informações resumidas		Resultados		Desvio (%)	
				Esperados	PEIQ		
Caso 13	Distribuição granulométrica	m = 25g $\rho_s = 1,8 \text{ g cm}^{-3}$ $\mu = 1,005 \text{ cP}$	$Q_A = 37 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ T = 30°C Tabela 19	Massarani (2002)	$X_1 = 0,815$	$X_1 = 0,815$	0,00
					$X_2 = 0,545$	$X_2 = 0,545$	0,00
					$X_3 = 0,235$	$X_3 = 0,235$	0,00
					$X_4 = 0,058$	$X_4 = 0,058$	0,00
Caso 14	Massa arrastada (%)	Razão 1:4 $v = 0,5 \text{ cm s}^{-1}$ Tabela 20 $\mu = 1,005 \text{ cP}$	$\rho_s = 7,5 \text{ g cm}^{-3}$ $\emptyset = 0,8$ $\rho_s = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ $\emptyset = 0,7$	Massarani (2002)	$D' = 44,6 \mu\text{m}$	$D' = 44,8 \mu\text{m}$	0,45
					$p = 2,27$	$p = 2,27$	0,00
					$m_1 = 43 \%$	$m_1 = 42,6 \%$	0,93
					$m_2 = 76 \%$	$m_2 = 78,5 \%$	3,29
Caso 15	Massa arrastada (%)	$D' = 44,6 \mu\text{m}$ $p = 2,27$ Razão 1:4 $v = 0,5 \text{ cm s}^{-1}$ $\mu = 1,005 \text{ cP}$	$\rho_s = 7,5 \text{ g cm}^{-3}$ $\emptyset = 0,8$ $\rho_s = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ $\emptyset = 0,7$	Massarani (2002)	$m_1 = 43 \%$	$m_1 = 42,8 \%$	0,46
					$m_2 = 76 \%$	$m_2 = 78,7 \%$	3,55

Fonte: Da Autora (2019).

5.6 MÓDULO SEDIMENTADOR

Para finalizar os testes de verificação e validação do aplicativo, o módulo “sedimentador” foi contemplado com os estudos de caso 16 e 17 que utilizaram as mesmas informações recolhidas durante o ensaio de proveta (Tabela 13).

5.6.1 Caso 16: Parâmetros Análise comparativa da aplicação do método de Biscaia Jr. e Kynch

Para a situação descrita neste estudo, o usuário reproduziu as informações fornecidas conforme visto na Figura 60. Posteriormente, o usuário se deparou com dois botões distintos para a escolha dos métodos a serem aplicados, Kynch ou Biscaia Jr.

Os resultados da escolha do método empregado foram representados nas Figuras 61a e 61b, respectivamente. Além disso, a Figura 62 corresponde ao gráfico do ensaio de proveta, válido para os dois métodos mencionados anteriormente. Todas essas informações também estão disponíveis no apêndice C.

Ao escolher o método de Kynch, o diâmetro do sedimentador correspondeu a 5,66 m, e o mesmo foi apresentado no método criado por Biscaia Jr.

De acordo com o divulgado por Cremasco (2014) o processo de obtenção de seus resultados não mencionou o uso do fator de segurança (10%), portanto o autor considerou o

diâmetro mínimo como sendo o próprio diâmetro do sedimentador. Adotando-se essa recomendação para validar o aplicativo.

Figura 60 – Recepção das informações do módulo sedimentador (Caso 16).

Sedimentadores

Métodos de dimensionamento de Sedimentadores Contínuos

Quantidade de amostragem em Proveta:
10

Vazão (m³/h):
30

C_{alim.} (kg/m³):
60

C_{lodo} (kg/m³):
170

Massa Espec. partícula (g/cm³):
2.7

Pontos da curva de sedimentação

t₀(min): 0 Z₀(cm): 40

t₁(min): Z₁(cm):

Sedimentadores

Pontos da curva de sedimentação

t ₀ (min):	Z ₀ (cm):
0	40
t ₁ (min):	Z ₁ (cm):
5	32,8
t ₂ (min):	Z ₂ (cm):
10	25,5
t ₃ (min):	Z ₃ (cm):
15	18,8
t ₄ (min):	Z ₄ (cm):
20	14,2
t ₅ (min):	Z ₅ (cm):
25	11,2
t ₆ (min):	Z ₆ (cm):
30	9,6

Sedimentadores

t ₅ (min):	Z ₅ (cm):
25	11,2
t ₆ (min):	Z ₆ (cm):
30	9,6
t ₇ (min):	Z ₇ (cm):
35	6,6
t ₈ (min):	Z ₈ (cm):
40	5,2
t ₉ (min):	Z ₉ (cm):
45	4,0

KYNCH

BISCAIA JR.

INFORMAÇÕES LIMPAR

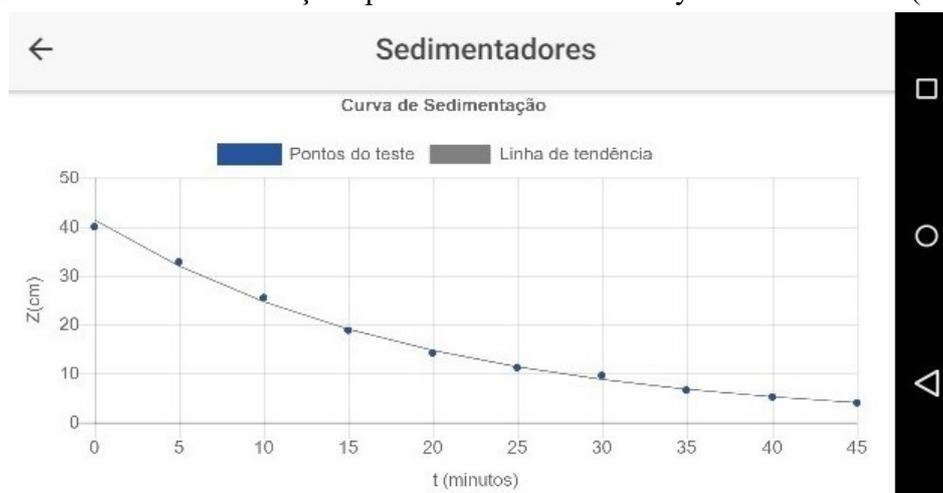
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 61 – Resultados de acordo com os métodos de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 16).



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 62 – Curva de sedimentação aplicada ao Método de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 16).



Fonte: Da Autora (2019).

Ao comparar a altura do sedimentador apresentado por Cremasco (2014) e o aplicativo notou-se uma variação na ordem de 15,6%. Essa variação ocorreu devido a diferenças na obtenção do tempo de residência médio (t^*).

De acordo com Cremasco (2014) a curva de sedimentação deixou de ser linear entre os tempos de 10 a 15 minutos, portanto, o tempo crítico por ele adotado foi o ponto médio desses tempos, logo 12,5 minutos. Da mesma forma, o tempo de referência (t_R) foi obtido pela média dos tempos de 35 a 40 minutos correspondendo a 37,5 minutos.

Em contrapartida, o aplicativo adotou a aplicação da reta tangente à curva, trazendo valores mais realistas. Por essa razão foi gerado a inconsistência no cálculo da altura do sedimentador.

5.6.2 Caso 17: Parâmetros Análise comparativa da aplicação do método de Biscaia Jr e Kynch

Semelhantemente ao caso anterior, para validar o módulo o usuário realizou a entrada de dados conforme a **Figura 63**. Em seguida, tentou-se o método Kynch e de Biscaia Jr. Os resultados encontrados foram demonstrados na **Figura 64a** e **64b** respectivamente e no apêndice C. Assim, como a curva de sedimentação, sua equação e a linha de tendência da curva para ambos os métodos foram apresentados na **Figura 65**.

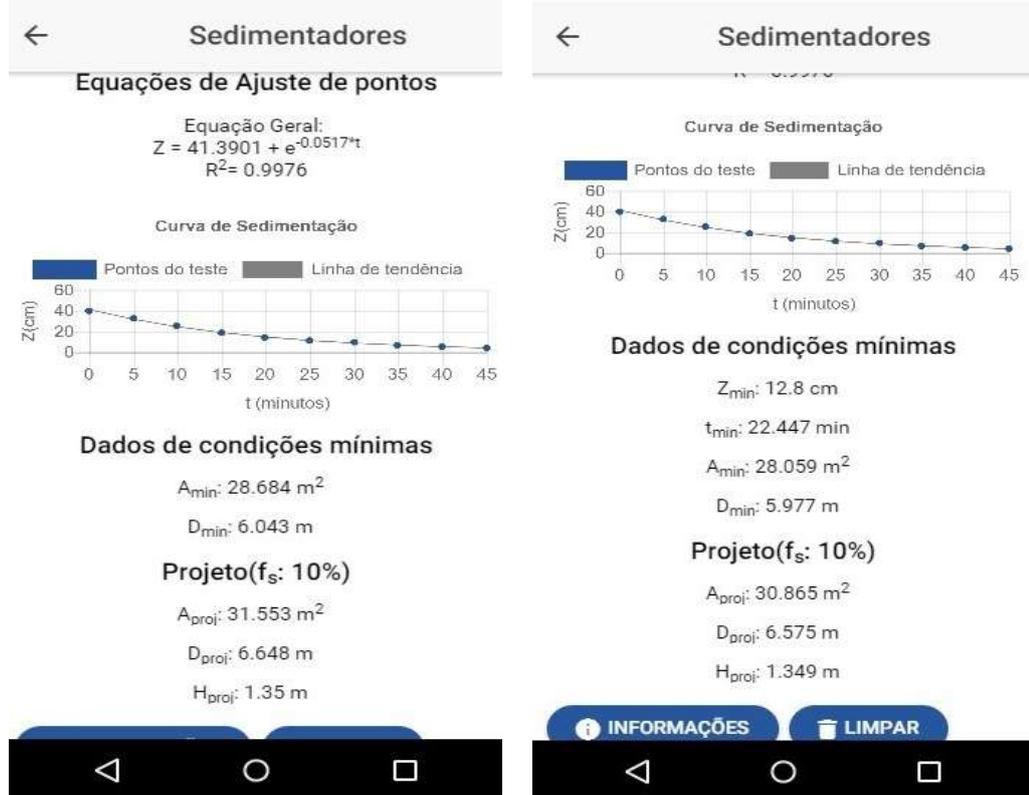
Massarani (2002) sugeriu que o sedimentador deveria ter diâmetro de 6,1 metros e altura de 1,3 m.

Figura 63 – Recepção das informações do módulo sedimentador (Caso 17).



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 64 – Resultados de acordo com os métodos de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 17).

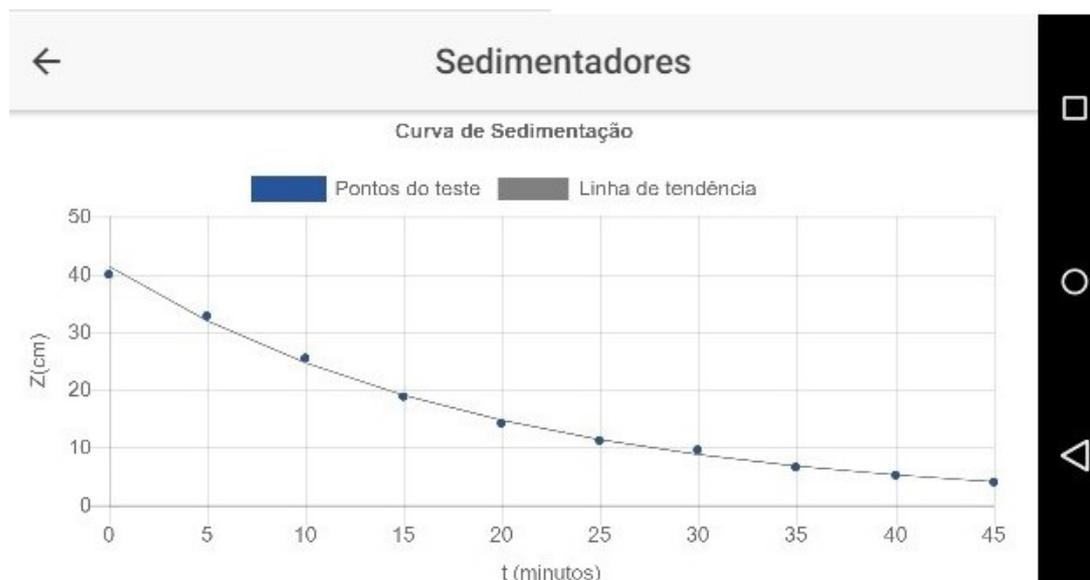


a) Método de Kynch

b) Método de Biscaia Jr.

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 65 – Curva de sedimentação aplicada ao Método de Kynch e Biscaia Jr. (Caso 17).



Fonte: Da Autora (2019).

Os resultados apresentados no PEIQ foram bem próximos a Massarani (2002) com diâmetro mínimo de 6,04 metros e altura de 1,35 metros utilizando a metodologia de Kynch e de 5,98 metros e altura de 1,35 metros para o método Biscaia Jr. Neste caso, ao observar os valores do diâmetro do projeto, corrigido com o acréscimo de 10%, o resultado apresentou valores menos condizentes com o autor. Portanto, considerou que o processo de sedimentação foi baseado apenas no diâmetro mínimo.

Este módulo foi o que apresentou maior divergência nos resultados se comparado aos demais. Justifica-se devido às dificuldades de análise gráfica dentro do aplicativo o que pode ter ocasionado desvios. Porém, as diferenças poderiam ser contornadas aplicando o fator de segurança, não comprometendo assim o dimensionamento do equipamento.

Na **Tabela 24** é melhor visualizada a representação desses números e desvios cometidos.

Tabela 24 – Resumo dos casos apresentados no módulo Sedimentador.

	Informações resumidas		Resultados		Desvios (%)
			Esperados	PEIQ	
Caso 16	$Q_A = 30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ $\rho_s = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$ Tabela 23	$C_A = 60 \text{ g L}^{-1}$ $C_u = 170 \text{ g L}^{-1}$	Creмасco (2014) D = 5,6 m H = 1,41 m	D = 5,66 m H = 1,19 m	1,07 15,6
Caso 17	$Q_A = 30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ $\rho_s = 2,2 \text{ g cm}^{-3}$ Tabela 23	$C_A = 0,08 \text{ g cm}^{-3}$ $C_u = 0,25 \text{ g cm}^{-3}$	Massarani (2002) D = 6,10 m H = 1,30 m	D = 6,04 m H = 1,35 m	0,98 3,85

Fonte: Da Autora (2019).

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, considerou que o aplicativo atendeu aos objetivos de usabilidade uma vez, que ele foi desenvolvido com aparência limpa, simples e intuitiva. O PEIQ foi disponibilizado na versão português do Brasil e em inglês atingindo um bom público com sistema operacional Android pelo mundo.

O aplicativo também disponibilizou diversas opções de entrada de dados, variáveis e funcionalidades, apresentando aos usuários uma gama de possibilidades de trabalhar dentro dos módulos, sem contar a opção de imprimir ou compartilhar seus resultados em formato de arquivo PDF para melhorar a discussão entre os alunos, professores e profissionais da área. Além disso, ele trouxe resumidamente através dos botões “Informações” de cada equipamento os conceitos e os métodos aplicados para melhor compreensão dos módulos.

Em relação à aplicabilidade, a ferramenta demonstrou ser útil aos professores e acadêmicos na melhoria da qualidade no ensino-aprendizagem e aos profissionais da área de separação sólidos fluido por ser uma ferramenta facilmente consultável. Para os alunos, o aplicativo pode auxiliar no processo de aprofundamento do conhecimento estimulando o uso da tecnologia na função educacional.

Outro requisito atendido pelo aplicativo foi em relação à parte técnica. Os resultados apresentados através dos estudos de casos mostraram boa coerência, mas apresentando algumas variações decorrentes de desvios aleatórios. A média de desvios pontuados nos estudos de casos ficou em torno de 1,3% o que pode ser justificado devido aos materiais base apresentarem interpretações diferentes dos métodos. Outra possibilidade de desvio esteve direcionada a não realização do tratamento de algarismos significativos.

Por fim, o aplicativo foi desenvolvido para funcionar em sistema híbrido, ou seja, pode ser depositado em diretórios de aplicativos ou ainda integrado a um sítio de internet, no entanto, apenas foi testado o uso para a plataforma do Android. Essa plataforma em questão foi escolhida por ser o sistema operacional mais abrangente no Brasil e contar com maior facilidade de acesso a recursos tecnológicos para seu desenvolvimento e realização de testes.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante dos bons resultados apresentados no PEIQ, sugere-se para trabalhos futuros o aprimoramento do aplicativo visando à ampliação do número de equipamentos de separação envolvidos, disponibilização para *smarthpones* da marca Apple e desenvolvimento de um

sítio de internet para abrigar o aplicativo para que os usuários possam também utilizá-los em computadores de mesa “*Desktop*”.

No PEIQ considerou que os fluidos trabalhados estavam em região Newtoniana e a pressões próximas a pressão atmosférica, mas sabe-se que muitos fluidos não apresentam esse comportamento, portanto, a equação dos gases ideais não descreveria todos os processos envolvidos nas indústrias, sugerindo assim realizar-se novos estudos e ajustes no aplicativo para contemplar fluidos não-Newtoniano.

Outra oportunidade de melhorias no aplicativo é tratar a viscosidade em função de temperatura e pressão. Na atual versão, a viscosidade foi contemplada apenas considerando que o usuário forneça a viscosidade como um valor constante.

Com o desenvolvimento dessas novas vertentes espera-se contribuir ainda mais significativamente para melhorias do ensino-aprendizagem diversificando as estratégias de promoção a aprendizagem, além reproduzir de forma mais realista o funcionamento desses equipamentos dentro das indústrias proporcionando aos profissionais da área a possibilidade de ter bons resultados para qualquer tipo processo.

REFERÊNCIAS

- AKW. **Hydrocyclones aka-vortex and anular Distributor Systems AKA- SPIDER**. 2018. Disponível em: <<http://www.directindustry-china.cn/prod/akw-apparate-verfahren-gmbh/product-89277-892311.html>> Acessado em: 19 dez. 2018.
- ANGULARJS. Guide to Angular Js Documentation. 2018. Disponível em:<<https://docs.angularjs.org/guide>> Acessado em: 06 jun. 2018.
- ANTUNES, M.; MEDRONHO, R. A. Bradley Hydrocyclones: Design and performance analysis. In: L. Svarovsky. **Hydrocyclones: Analyses and Application**. England: Springer Science + Business Media, 1992. v. 12, cap. 1, p. 3-13.
- APACHE CORDOVA. Apache Cordova Documentation. 2018. Disponível em:<<https://cordova.apache.org/docs/en/latest/guide/overview/index.html>> Acessado em: 06 jun. 2018.
- APPLE INC. GUIDELINES AND RESOURCES. 2018. Disponível em: <<https://developer.apple.com/app-store/resources/>> Acessado em: 10 jun. 2018.
- BARROS, P. L.; ALVES J. J. N. **Fluidodinâmica Computacional: Hidrociclones**. 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Jnd1F9bE5hU>> Acessado em 19 dez. 2018.
- BASSOTO, H. **Desenvolvimento de um protótipo de aplicativo móvel utilizando ferramenta multiplataforma**. 2014. 82 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Ciências da Computação) – Centro de ciências exatas e tecnologia – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.
- BERNARDO, S. **Estudo dos escoamentos gasoso e gás-sólido em ciclones pela aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional**. 2005. 259 f. Tese (Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- BIERMAN, G.; ABADI, M.; TORGERSEN, M. Understanding Typescript. In: ECOOP 2014 – Object-ORIENTED PROGRAMMING. 2014. **Anais...** Springer: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, p. 257-281.
- CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclone. **Rev. Mineral Engineering**. v. 13, n. 2, p. 183-191, 2000.
- CREMASCO, M. A. **Vale a pena estudar engenharia química**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2005. 432 p.
- CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 423 p.
- ECNONOMIDES, A. A. Requirements of mobile learning applications. **International Journal of Innovation and Learning**. v. 5, n. 5, p. 457-479, 2008.

EL-KASSAS, W. S. *et al.* Taxonomy of Cross-Platform mobile application development approaches. **Ain Shams Engineering Journal**. v. 8, n. 2, p. 163-190, jun. 2017.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1982. 670 p.

GAMOHER. **Ciclones**. 2016. Disponível em: <<http://www.gamoher.com/index.php/ciclones/>> Acessado em: 22 jan. 2019.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Separation Process Principles: includes unit operation**. 4. ed. Massachusetts: Prentice Hall, 2010. 1056 p.

GOIS, A. **Ionic framework: construa aplicativos para todas as plataformas mobile**. São Paulo: Casa do código, 2017.

GOOGLE INC. CONTRATO DE DISTRIBUIÇÃO DO DESENVOLVEDOR DA GOOGLE PLAY. 2018. Disponível em: <<https://play.google.com/about/developer-distribution-agreement.html>> Acessado em 10 jun. 2018.

GREPINO, P. H. F.; RODRIGUES, F. A. Utilização de softwares livres no ensino da engenharia química. **Rev. Engenharia química e química – REQ**. v. 1, n. 1, p. 16-29, 2015.

GUIMARÃES, F. A. V. Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos métodos industriais. 2010. 235 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

HAAKE, J. *et al.* Análise de ciclone com flexibilidade operacional por técnicas de CFD. **Rev. Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**. Curitiba, v.1, n. 2, p. 19-30, jul.-dez., 2016.

HEITKOTTER, H.; HANSCHKE, S. MAJCHARZAK, T. A. Comparing Cross-platform Development Approaches for Mobile Applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEB INFORMATION AND TECHNOLOGIES. 8. 2012. **Anais...**Springer, 2012. p. 299-311.

IONIC. Ionic Docs. 2018. Disponível em: <<https://ionicframework.com/docs>> Acessado em: 07 jun. 2018.

JUCÁ, S. C. S. A relevância dos softwares educativos na educação profissional. **Revista Ciências e Cognição**, Rio de Janeiro, v. 8, p. 22-28, ago. 2006.

JUNTUNEN, A.; JALONEN, E.; LUUKKAINEN, S. HTML5 in mobile devices: Drivers and Restraints. In: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 46., 2013, Wailea. **Anais...**Wailea: System Sciences, 2013. p. 1053-1062.

LOBO, A. P. Brasil possui 280 milhões de dispositivos móveis conectáveis à internet. Associação Brasileira de Internet (ABRANET). 2017. Disponível em: <http://www.abranet.org.br/Noticias/Brasil-possui-280-milhoes-de-dispositivos-moveis-conectaveis-a-Internet-1419.html?UserActiveTemplate=site#.Wx_yu0gvy70> Acessado em 12 jun. 2018.

- MARIMOTO, C. E. **SMARTPHONES GUIA PRÁTICO**.2009. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/livros/smartphones/>> Acessado em: 10 jun. 2018.
- MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.
- MATOS, B. R. D.; SILVA, J. G. B. **Estudo comparativo entre desenvolvimento de aplicativos móveis utilizando plataformas nativas e multiplataformas**. 2016. 63 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de Software) – Faculdade UNB Gama. Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. India: MacGraw-Hill, 2014.1140 p.
- MEDRONHO, R. A. **Lista de exercícios de operações unitárias I**. Rio de Janeiro, 2012. Notas de aulas da disciplina de operações unitárias, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <<<https://sites.google.com/a/polli.ufrj.br/quimica/operacoesunitarias1>> Acessado em 30 jun. 2018.
- MELO, R. S.; CARVALHO, M. J. S. C. Aplicativos educacionais livres para mobile learning. In: ENCONTRO VIRTUAL DE DOCUMENTAÇÃO DE SOFTWARE LIVRE E CONGRESSO INTERNACIONAL DE LINGUAGEM E TECNOLOGIA ON-LINE, 14., 2014, **Anais...**, 2014.
- MENDES, M. R.; GARBAZZA, I. E.; TERRA, D. C. Desenvolvimento híbrido versus desenvolvimento nativo de aplicativos móveis. In: Jornada Científica, 7., 2014, Bambuí. **Anais...** Bambuí, 2013.
- MOREIRA, M. F. P. **Operações unitárias da engenharia química utilizando o excel/VBA**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2017.
- PASSOTO, M. B.; ARNOSTI, S.; PASSOTO, L. H. P. **Tópicos em separações mecânicas**. São Carlos: Ed. UFSCAR, 2011.
- PEÇANHA, R. P. **Sistemas particulados**: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 424 p.
- PREZOTTO, E. D.; BONIATI, B. B. Estudo de frameworks multiplataforma para desenvolvimento de aplicações mobile híbridas. IN: ENCONTRO ANUAL DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO (EATI), 2014, Frederico Westphalen. **Anais...** Frederico Westphalen, 2014. p. 72-79.
- SILVA, F. C.; SOBREIRA, H. A. Inovação no ensino de operações unitárias em cursos técnicos de agroindústria e química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. 21., 2016, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2016.
- SILVA, L. D.; SANTOS, K. G. ‘Projeto Centrífuga’: Desenvolvimento de um aplicativo para resolução de problemas de centrífugas tubulares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 38., 2017. Maringá. **Anais...** Maringá, 2017.

SILVA, M. M.; SANTOS, M. T. P. Os paradigmas de desenvolvimento de aplicativos para aparelhos celulares. **Tecnologia, Infra-estrutura e Software (T.I.S.)**, São Carlos, v. 3, n. 2, p. 162-170, maio-ago. 2014.

SILVA, M. S. **HTML 5: A linguagem de marcação que revolucionou a web**. São Paulo: Novatec editora LTDA., 2014. (a).

SILVA, N. K. G. Estudo de otimização da configuração do hidrociclone filtrante. 2014. 102 f. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. (b).

SILVA, S. *et al.* Análise de métodos para solução de problemas de engenharia de processos por estudantes de operações unitárias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 45., 2017. Joinville. **Anais...** Joinville, 2017.

SILVA, V.P.; LIMA, D. H. D. Desenvolvimento de aplicativos híbridos: benefícios e problemas encontrados na utilização dessas tecnologias. In: ENCONTRO DE PESQUISA & EXTENSÃO, 3., 2016, Patrocínio. **Anais...** Patrocínio: IFTM, 2016, p. 398-404.

SOAD, G. W. Avaliação de qualidade em aplicativos educacionais móveis. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Computação e Matemática computacional – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SIPIRANDELI, A. B. L. *et al.* Projeto e construção de um sedimentador em escala de laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS. 37. 2015, São Carlos. **Anais...** São Carlos, 2015.

STARK, J. **Building iPhone Apps with Html, CSS, JavaScript: Making App Store Apps without Objective-C or Cocoa**. 1. ed. O'Reilly Media, 2010.

SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. Trad. 4 ed. Oxford: Butter Worth Heinemann, 2000. 554 p.

TAVARES, H. L. Introdução à desenvolvimento de aplicações híbridas. **Rev. Eletrônica e Fatec**. Garça, v.6, n. 1, 2016. Disponível em:
<http://www.fatecgarca.edu.br/revista/Volume6/artigos_v6/artigo17.pdf> Acessado em: 06 jun. 2018.

UTIKAR, R. *et al.* Hydrodynamic simulation of cyclone separators. In: Hyoung Woo Ho. **Computational Fluid Dynamics**. Australia: INTECH, 2010. Cap. 3, p. 241-266.

ZHAO, B.; SU, Y.; ZHANG, J. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and double inlet configuration. **Rev. Chemical Engineering Research and Design**. n. 84, p. 1158-1165, dec. 2006.

ZANROSSO, C. D. *et al.* Operação café passado: Uma perspectiva didático-pedagógica para o ensino em engenharia química. **Rev. Química Nova**, v. 40, n. 8 p. 957-962, 2017.

APÊNDICE A

Figura 66 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Câmara de Poeira.

Câmaras de Poeira



Fonte: Protoblast, 2018.

A câmara de poeira é a forma mais simples de separação de partículas sólidas suspensas em gases sob a ação do campo gravitacional. Seu processo é fundamentado na diferença entre o tempo de permanência de um particulado e o tempo que essa partícula leva para sedimentar nas colunas do equipamento. São encontradas preferencialmente em indústrias metalúrgicas e siderúrgicas.

PROTOBLAST **Dry Dust Collector**: Effective dust control improves the performance of blast chambers. 2018. Disponível em: <<http://www.protoblast.com.au/dust-collector/>> Acessado em: 15 out. 2018.

Fechar



Funcionamento



Fonte: Suendel, 2012.

A câmara de poeira é composta de um grande tanque subdividido seções com uma única entrada, no qual o material suspenso no fluido adentra o equipamento, e uma saída, onde são retirados o fluido com partículas muito pequenas que não conseguiram ser retidas durante o processo. Logo que o material entra no equipamento, a velocidade é reduzida gradativamente devido ao aumento da área do escoamento e com a presença do campo gravitacional as partículas sedimentam no fundo do equipamento.

SUENDEL, M. **Processo de separação de misturas** 2012. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/marcossuendel/capitulo-02-processo-de-separao-de-misturas-11785022>> Acessado em: 15 out. 2018.

Fechar



Procedimentos para os cálculos:

Passo 1: Definir a variável de interesse do cálculo
Opção 1: Para opções de cálculo de esfericidade das partículas, diâmetro da menor partícula ou a faixa granulométrica

Passo 2: Determinar a velocidade terminal (v_t) - equação 1;

Passo 3: Calcular a razão coeficiente de arraste e número de Reynolds (C_D/Re) - equação 2;

Passo 4: Conhecido a esfericidade das partículas, calcular número de Reynolds através da correlação de Coelho e Massarani (1996) (Re) - equação 3;

Passo 5: Não encaixando no passo 4, obter primeiramente o número de Reynolds (Re) - equação 4; Obs: Quando envolvido mais de um compartimento, terá mais de uma velocidade, logo, mais de um diâmetro a ser obtido

Opção 2: Para determinação das dimensões da câmara de poeira e seus compartimentos

Passo 2: Averiguar a relação do número de Reynolds e coeficiente de arraste ($CDRe^2$) - equação 5;

Passo 3: Aplicar a correlação de Coelho e Massarani (1996) para obter o número de Reynolds (Re) - equação 6;

Passo 4: Calcular a velocidade terminal (v_t) - equação 7;

Passo 5: Apenas para o caso de dimensões do equipamento, obter o tamanho do equipamento (L) e a altura (H) - equação 8 e 9;

Passo 6: Para o caso de dimensões do compartimento calcular os diversos compartimentos (L_i) - equação 10.

Fechar



Equações de projeto

Equação 1:

$$v_t = \frac{\eta Q_A}{BL}$$

v_t = Velocidade terminal;
 η = Eficiência global
 Q_A = Vazão de alimentação;
 B = Largura da câmara de poeira;
 L = Comprimento da câmara de poeira.

Equação 2:

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4}{3} \frac{(\rho_s - \rho_f) \mu g}{\rho_f^2 v_t^3}$$

ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 μ = Viscosidade;
 g = Aceleração da gravidade;
 v_t = Velocidade terminal.

Equação 3:

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log \frac{2}{0,043 C_D/Re}} \right)^{1,3/2} + \left(\frac{5,31 - 4,89 \phi}{C_D/Re} \right)^{1,3} \right]^{1/1,3}$$

ϕ = Esfericidade das partículas;
 Re = Número de Reynolds.

Equação 4:

$$Re = \frac{d v_t \rho_f}{\mu}$$

Re = Número de Reynolds;
 d = Diâmetro das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 v_t = Velocidade terminal;
 μ = Viscosidade.

Equação 5:

$$C_D Re^2 = \frac{4}{3} \frac{(\rho_s - \rho_f) \rho_f g D^3}{\mu^2}$$

D = Diâmetro das partículas;
 v_t = Velocidade terminal;
 ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 g = Aceleração da gravidade;
 μ = Viscosidade.

Fechar



Continuação da Figura 66 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Câmara de Poeira.

Equações de projeto

Equação 6:

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0.843 \cdot 10^9 \cdot \frac{\phi}{C_D Re^3}} \right)^{1.2} + \left(\frac{C_D Re^3}{5.31 - 4.88 \phi} \right)^{1.2/2} \right]^{-1/1.2}$$

ϕ = Esfericidade das partículas;
 Re = Número de Reynolds.

Equação 7:

$$Re = \frac{d v_t \rho f}{\mu}$$

Re = Número de Reynolds;
 d = Diâmetro das partículas;
 v_t = Velocidade terminal;
 ρf = Densidade do fluido;
 μ = Viscosidade.

Equação 8:

$$L = \sqrt{\frac{Q_A \eta}{v_t}}$$

L = Comprimento do equipamento;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 v_t = Velocidade terminal;
 η = Eficiência global.

Equação 9:

$$H = \frac{L v_t}{\eta u_{proj}}$$

L = Comprimento do equipamento;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 u_{proj} = Velocidade de projeto;
 η = Eficiência global.

Equação 10:

$$L_i = \frac{Q_A \eta}{v_t B} \quad (i = 1, 2, 3 \dots n \text{ compartimentos})$$

L = Comprimento do equipamento;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 v_t = Velocidade terminal;
 η = Eficiência global;
 B = Largura do equipamento.

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 67 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Centrífuga.

Centrífugas



Fonte: TR Representações, 2018.

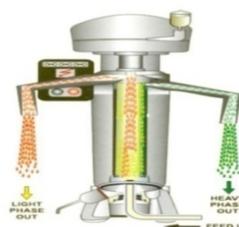
A centrifugação é um processo de separação sólido-fluido semelhante ao processo de decantação, no entanto, devido a ação do campo gravitacional este processo é mais rápido. É utilizado nas refinarias para a remoção de traços de sólidos em óleos lubrificantes, nas indústrias de tintas e no setor sucroalcooleiro. Os equipamentos de centrifugação mais populares para a separação de sólidos em suspensão são as centrífugas tubulares e de cesto.

TR REPRESENTAÇÕES. **Centrífuga de rotor tubular CB 26Y**. 2018. Disponível em: <<http://trepres.com.br/produto/super-centrifuga-de-rotor-tubular/>> Acessado em: 14 ago. 2018.

Fechar



Funcionamento



Fonte: ExportersIndia.com, 2007.

Basicamente a centrífuga sedimentadora é composta por um cesto cilíndrico, que rotaciona a alta velocidade em torno de eixo central devido a ação da força centrífuga movimentando as partículas presentes no líquido em direção as paredes do equipamento, onde posteriormente é coletada. Para que ocorra esse movimento giratório é necessário o acionamento através de um motor elétrico, o que permite controlar a velocidade de rotação.

EXPORTERSÍNDIA.COM. **JVC Separations Engineers: Tubular Centrifuge**. 2007. Disponível em: <https://www.exportersindia.com/jvc_separationengineers/tabular-centrifuge-secunderabad-india-1585450.htm> Acessado em: 14 ago. 2018.

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 67 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Centrífuga.

Classificação das centrífugas

As centrífugas são classificadas de acordo com seu funcionamento em batelada, semi-contínuo e contínuo conforme apresentadas na figura abaixo.



SVAROVSKY, L. **Solid-Liquid Separation**. Trad. 4 ed. Oxford: Butter Worth Heinemann, 2000. 554 p.

Fechar



Equações de projeto

- Equação 1:**

$$K = \frac{(\rho_s - \rho_f) \omega^2}{18 \mu}$$
 ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 ω = Velocidade de rotação;
 μ = Viscosidade.
- Equação 2:**

$$D^* = \sqrt{\left(\frac{Q}{2 \pi L K}\right) \ln \left[\frac{2R^2}{R^2 + R_0^2} \right] \left(\frac{1}{R^2 - R_0^2} \right)}$$
 Q = Vazão de operação;
 L = Altura da centrífuga;
 K = Parâmetro obtido na equação 1;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interna da alimentação do líquido da centrífuga.
- Equação 3:**

$$Q = \frac{2 \pi L K D^{*2}}{\ln \left[\frac{2R^2}{R^2 + R_0^2} \right] \left(\frac{1}{R^2 - R_0^2} \right)}$$
 Q = Vazão de operação;
 L = Altura da centrífuga;
 K = Parâmetro obtido na equação 1;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interno da alimentação do líquido da centrífuga;
 D* = Diâmetro de corte.
- Equação 4:**

$$Q \ln \left[\frac{2R^2}{R^2 + R_0^2} \right] \left(\frac{1}{R^2 - R_0^2} \right) = 2 \pi L K D^{*2}$$
 Q = Vazão de operação;
 L = Altura da centrífuga;
 K = Parâmetro obtido na equação 1;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interno da alimentação do líquido da centrífuga;
 D* = Diâmetro de corte.

Fechar



Procedimentos para os cálculos:

- Passo 1:** Determinar K - equação 1;
- Passo 2:** Obter informações a partir das opções abaixo:
Opção 1: Determinar o diâmetro de corte (D*) - equação 2;
Opção 2: Calcular a vazão de processo (Q) - equação 3;
Opção 3: Informar valores aleatórios a partir do Raio interno da alimentação líquida (R₀) para obter o raio da centrífuga (R) - equação 4;
Opção 4: Definir a altura da centrífuga (L) - equação 5;
Opção 5: Realizar o Scale Up de uma Centrífuga Tubular para obter a vazão da Centrífuga Industrial - equação 6;
- Passo 3:** Determinar o Diâmetro mínimo de recuperação com eficiência de 100% (D_{min}) - equação 7;
- Passo 4:** Calcular o diâmetro máximo das partículas que pode ser coletada no processo (D_{máx}) - equação 8;
- Passo 5:** Calcular o Fator Sigma (F_{Sigma}) - equação 9;
- Passo 6:** Para o casos de opções acima construir a grade de eficiência de coleta, que relaciona os diâmetros de coleta (0 <= D <= D_{Máx}) e a eficiência individual de coleta - equações 1, 10 e 11.

Fechar



Equações de projeto

- Equação 5:**

$$L = \left(\frac{Q}{2 \pi K D^{*2}} \right) \ln \left[\frac{2R^2}{R^2 + R_0^2} \right] \left(\frac{1}{R^2 - R_0^2} \right)$$
 Q = Vazão de operação;
 L = Altura da centrífuga;
 K = Parâmetro obtido na equação 1;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interno da alimentação do líquido da centrífuga;
 D* = Diâmetro de corte.
- Equação 6:**

$$\left(\frac{Q}{F_{Sigma}} \right)_{Lab.} = \left(\frac{Q}{F_{Sigma}} \right)_{Ind.}$$

$$F_{Sigma} = \frac{\pi L \omega^2 (R^2 - R_0^2)}{g \ln (R/R_0)}$$
 ω = Velocidade de rotação;
 L = Altura da centrífuga;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interna da alimentação do líquido;
 g = Aceleração da gravidade;
 Q = Vazão de projeto.
- Equação 7:**

$$D_{min} = \sqrt{\frac{9 \mu Q}{\pi (R^2 - R_0^2) L (\rho_s - \rho_f) \omega^2}}$$
 ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 ω = Velocidade de rotação;
 μ = Viscosidade;
 L = Altura da centrífuga;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interno da alimentação líquida.
- Equação 8:**

$$D_{máx} = \sqrt{\frac{Q \ln (R/R_0)}{\pi L K (R^2 - R_0^2)}}$$
 Q = Vazão de operação;
 L = Altura da centrífuga;
 K = Parâmetro obtido na equação 1;
 R = Raio da centrífuga;
 R₀ = Raio interna da alimentação do líquido da centrífuga.

Fechar



Continuação da Figura 67 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Centrífuga.

Equações de projeto

Equação 9:

$$F_{Sigma} = \frac{\pi L \omega^2 (3 R^2 + R_0^2)}{2 g}$$

ω = Velocidade de rotação;
 L = Altura da centrífuga;
 R = Raio da centrífuga;
 R_0 = Raio interna da alimentação do líquido;
 g = Aceleração da gravidade.

Equação 10:

$$K_2 = \frac{\pi L (R^2 - R_0^2)}{Q}$$

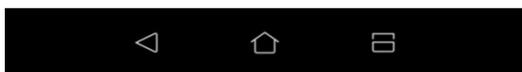
Q = Vazão de projeto;
 L = Altura da centrífuga;
 R = Raio da centrífuga;
 R_0 = Raio interna da alimentação do líquido.

Equação 11:

$$G(D) = \frac{1 - e^{(-2KK_2 D^2)}}{1 - e^{(-2KK_2 D_{máx}^2)}} \quad (0 \leq x \leq D_{máx})$$

K = Parâmetro equação 1;
 K_2 = Parâmetro equação 10;
 D = Diâmetro entre 0 e $D_{máx}$;
 $D_{máx}$ = Diâmetro máximo equação 8.

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 68 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Ciclone.

Ciclones



Fonte: Flue8, 2016.

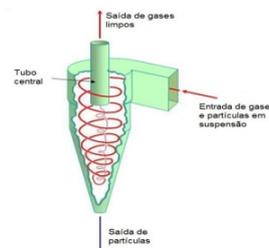
Os ciclones são equipamentos de separação de partículas sólidas suspensas em correntes gasosas. Atuam principalmente na recuperação de partículas arrastadas durante o processo e na limpeza dos gases para o controle de poluição.

FLUE8. **Ciclones**. 2016. Disponível em: <<http://www.flue8.com.br/ciclones/>> Acessado em: 19 jul. 2018.

Fechar



Funcionamento



Fonte: Coelho, 2012.

O ciclone é constituído por um vaso cilíndrico sem partes móveis e contém uma entrada e duas saídas. A alimentação é feita tangencialmente, dando início ao movimento de vórtice, no qual ocorre a separação. As partículas mais densas são recuperadas na saída inferior do equipamento. E na saída superior obtêm os gases e partículas menos densas que não puderam ser recuperadas.

COELHO, P. **Ciclones Industriais - Separadores ciclônicos**. 2012. Disponível em: <<https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/ciclones-industriais.html>> Acessado em: 19 jul. 2018.

Fechar

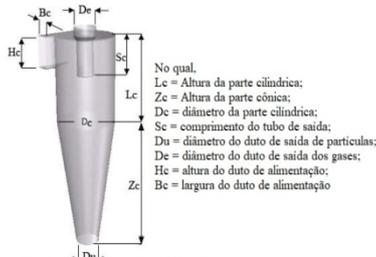


Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 68 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Ciclone.

Configurações

O conjunto de dimensões de um ciclone dão origem as famílias. As mais conhecidas são Stairmand e Lapple. As configurações dessas famílias de ciclones estão representadas na figura abaixo.



Fonte: Adaptado de Utikar et al., 2010.

Ciclone	B _c /D _c	D _e /D _c	S _c /D _c	L _c /D _c	Z _c /D _c	D _u /D _c
Lapple	0,25	0,50	0,50	2,00	0,62	2,00
Starimand	0,20	0,50	1,50	0,50	2,50	0,37

Fonte: Massarani (2002).

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

UTIKAR, R. et al. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. In: WOO OH, H. **Computacional Fluid Dynamics**. 1. ed. Índia: Infotech, 2010. cap. 11. 241 -266.

Fechar



Procedimentos para os cálculos:

Passo 1: Determinar o diâmetro de corte (D*) - equações 1, 2 ou 3;

Passo 2: Calcular diâmetro cilíndrico (D_c) utilizando tabela abaixo - equação 4;

Passo 3: Obter vazão de projeto (Q) utilizando os dados da tabela abaixo - equação 5;

Passo 4: Definir o número de ciclones que devem ser ligados paralelamente (N_{ciclones}) - equação 6; Adotar valor inteiro mais próximo.

Passo 5: Determinar a vazão por ciclone - equação 7;

Passo 6: Recalcular o D_c com a vazão do passo anterior - equação 4;

Passo 7: Determinar a queda de pressão (- delta P) - equação 8;

Passo 8: Calcular a potência do soprador de gás (W) - equação 9.

Fechar



Equações Iniciais

Densidade do fluido:

$$\rho_f = \frac{M_{molar} P}{RT}$$

P = Pressão do gás;
T = Temperatura;
M_{molar} = Massa molar;
R = Constante dos gases ideais.

Modelo de distribuição granulométrica RRB:

$$X_i = 1 - e^{-\left(\frac{D_{particulas}}{k}\right)^n}$$

X_i = Fração em massa das partículas;
D_{particulas} = Diâmetros das partículas;
k, n parâmetros do modelo.

Equação linearizada do modelo: $\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1-X_i} \right) \right] = n \ln[D_i] - n \ln[k]$

Modelo de distribuição granulométrica GGS:

$$X_i = \left(\frac{D_{particulas}}{k}\right)^n$$

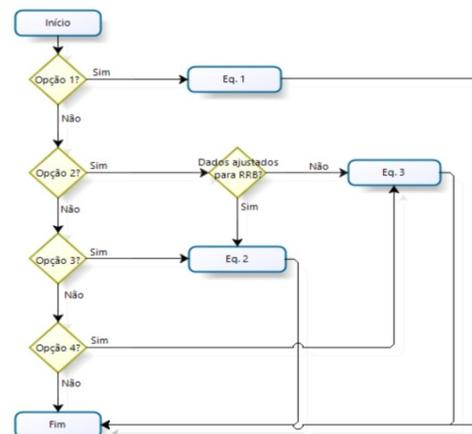
X_i = Fração em massa das partículas;
D_{particulas} = Diâmetros das partículas;
k, n parâmetros do modelo.

Equação linearizada do modelo: $\log[X_i] = n \log[D_i] - n \log[k]$

Fechar



Fluxograma para cálculo do Diâmetro de corte D*



Fonte: Da autora, 2018.

Fechar



Continuação da Figura 68 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Ciclone.

Equações de projeto

Equação 1:

$$\eta = \frac{(D_{particulas}/D^*)^2}{1 + (D_{particulas}/D^*)^2}$$

η = Eficiência global;
 $D_{particulas}$ = Diâmetro médio das partículas;
 D^* = Diâmetro de corte.

Equação 2:

$$\eta = \frac{1.11n}{1.81 - 0.322n + (k/D^*)} \left(\frac{k}{D^*}\right)$$

η = Eficiência individual de coleta;
 D^* = Diâmetro de corte;
 k e n parâmetros do modelo RRB.

Equação 3:

$$\eta = \int_0^1 \frac{\left(\frac{k X^{1/n}}{D^*}\right)^2}{1 + \left(\frac{k X^{1/n}}{D^*}\right)^2} dX$$

I = Eficiência global de coleta no campo centrífugo;
 η = Eficiência individual de coleta;
 $D_{particulas}$ = Diâmetro das partículas (modelo de distribuição granulométrica);
 D^* = Diâmetro de corte.

Fechar

Equações de projeto

Equação 4:

$$\frac{D^*}{D_c} = \frac{K(\mu D_c)}{Q(\rho_s - \rho_f)}$$

D^* = Diâmetro de corte; μ = Viscosidade;
 D_c = Diâmetro cilíndrico; ρ_f = Densidade do fluido;
 K = Parâmetro tabelado; ρ_s = Densidade das partículas.
 Q = Vazão total;

Equação 5:

$$Q = u_{projeto} B_c H_c$$

B_c = Largura de alimentação;
 H_c = Altura de alimentação;
 $u_{projeto}$ = Velocidade (Tabelado).

Equação 6:

$$N_{ciclones} = \frac{Q_{total}}{Q}$$

Q_{total} = Vazão total;
 Q = Vazão obtida no passo 3.

Ciclone	B_c/D_c	H_c/D_c	$u_{projeto}$	K	β
Lapple	0,25	0,50	15 m/s	0,095	315
Stairmand	0,20	0,50	15 m/s	0,041	400

Fonte: Adaptado de Massarani (2002).

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

Fechar

Equações de projeto

Equação 7:

$$Q = \frac{Q_{total}}{N_{ciclones}}$$

Q_{total} = Vazão total;
 Q = Vazão calculada no passo 3.
 $N_{ciclones}$ = Inteiro mais próximo.

Equação 8:

$$\Delta P = \frac{\beta \rho_f \left(\frac{uQ}{\pi D_c^2}\right)^2}{2}$$

Q = Vazão do passo 5; β = Parâmetro tabelado;
 D_c = Diâmetro cilíndrico; ρ_f = Densidade do fluido.

Equação 9:

$$W = \frac{Q(-\Delta P)}{0.5}$$

ΔP = Queda de pressão;
 Q = Vazão.

Fechar

Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 69 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Elutriador.

Equações de projeto

Equação 1:

$$u = \frac{4 Q_A}{\pi D^2}$$

Q_A = Vazão de alimentação;
 D = Diâmetro das partículas;
 u = Velocidade de arraste.

Equação 2:

$$d_{Stokes} = \frac{18 \mu u}{g (\rho_s - \rho_f)}$$

d_{Stokes} = Diâmetro de Stokes;
 μ = Viscosidade;
 ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 g = Aceleração da gravidade.

Equação 3:

$$\frac{C_D}{Re} = \frac{4 (\rho_s - \rho_f) \mu g}{\rho_f^2 v_t^2}$$

ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 μ = Viscosidade;
 g = Aceleração da gravidade;
 v_t = velocidade terminal.

Equação 4:

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log_{0,065} C_D / Re} \right)^{1,3/2} + \left(\frac{5,31 - 4,88 \phi}{C_D / Re} \right)^{1,3} \right]^{1/1,3} \quad \phi = \text{Esfericidade das partículas};$$

Re = Número de Reynolds;

Equação 5:

$$Re = \frac{d v_t \rho_f}{\mu}$$

Re = Número de Reynolds;
 d = Diâmetro das partículas;
 v_t = Velocidade terminal;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 μ = Viscosidade;

Fechar

Equações de projeto

Equação 6:

$$X = 1 - \sum_0^i \frac{\text{massa recolhida}}{\text{massa total}} \quad (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n) \text{ elutriadores anteriores}$$

Equação 7:

$$C_D Re^2 = \frac{4 (\rho_s - \rho_f) \rho_f g D^3}{\mu^2}$$

D = Diâmetro das partículas;
 v_t = Velocidade terminal;
 ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 μ = Viscosidade;
 g = Aceleração da gravidade.

Equação 8:

$$Re = \left[\left(\frac{24}{0,843 \log_{0,065} C_D / Re} \right)^{1,2} + \left(\frac{C_D Re^2}{5,31 - 4,88 \phi} \right)^{1,2/2} \right]^{-1/1,2} \quad \phi = \text{Esfericidade das partículas};$$

Re = Número de Reynolds;

Equação 9:

$$\text{Modelo G.G. S.: } \log[X] = m \log[D] - m \log[K]$$

Equação 10:

$$\text{Modelo R. R. B.: } \ln \left[\ln \frac{1}{1-X} \right] = n \ln[D] - n \ln[D']$$

Equação 11:

$$\text{Modelo Sigmóide: } \log \left(\frac{1-X}{X} \right) = p \log[D'] - p \log[D]$$

Fechar



Equações de projeto

Equação 12:

$$\text{Modelo G.G. S.: } X = \left(\frac{D}{K} \right)^m$$

Equação 13:

$$\text{Modelo R. R. B.: } X = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D'} \right)^n}$$

Equação 14:

$$\text{Modelo Sigmóide: } X = \frac{1}{1 + \left(\frac{D'}{D} \right)^p}$$

Equação 15 (Topo):

$$\%mat_{-1} = \left(\frac{\text{proporção}_{mat,1} X_{mat,1}}{(\text{proporção}_{mat,1} X_{mat,1}) + (\text{proporção}_{mat,2} X_{mat,2})} \right) * 100\%$$

Equação 16 (Topo):

$$\%mat_{-2} = \left(\frac{\text{proporção}_{mat,2} X_{mat,2}}{(\text{proporção}_{mat,1} X_{mat,1}) + (\text{proporção}_{mat,2} X_{mat,2})} \right) * 100\%$$

Equação 17 (Fundo):

$$\%mat_{-1} = \left(\frac{\text{prop}_{mat,1} - (\text{prop}_{mat,1} X_{mat,1})}{(\text{prop}_{mat,1} - (\text{prop}_{mat,1} X_{mat,1})) + (\text{prop}_{mat,2} - (\text{prop}_{mat,2} X_{mat,2}))} \right) 100\%$$

Equação 18 (Fundo):

$$\%mat_{-2} = \left(\frac{\text{prop}_{mat,2} - (\text{prop}_{mat,2} X_{mat,2})}{(\text{prop}_{mat,1} - (\text{prop}_{mat,1} X_{mat,1})) + (\text{prop}_{mat,2} - (\text{prop}_{mat,2} X_{mat,2}))} \right) 100\%$$

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 70 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Hidrociclone.

Hidrociclones



Fonte: Tesisat Dunyasi, 2018.

Os hidrociclones são equipamentos de separação de partículas sólidas presentes em líquido. Também já é possível utiliza-lo em separações sólido-sólido e líquido-líquido. São empregados nas indústrias químicas, metalúrgica, têxtil, alimentícia e de bioengenharia.

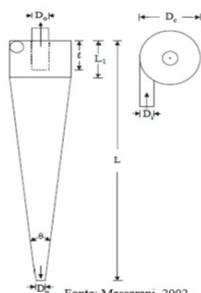
Tesisat Dunyasi. **Hidrociclones**. 2018. Disponível em: <http://tesisatdunyasi.com.tr/index.php?route=product/product&product_id=240/> Acessado em: 31 jul. 2018.

Fechar



Configurações

O conjunto de dimensões de um hidrociclone dão origem as famílias. As famílias contempladas neste aplicativo são Bradley e Rietema. As configurações dessas famílias estão representadas na figura abaixo.



Em que:
 D_c = Diâmetro da parte cilíndrica;
 D = Diâmetro do duto de alimentação;
 D_o = Diâmetro no overflow;
 D_u = Diâmetro no underflow;
 L = Comprimento total do hidrociclone;
 L_1 = Comprimento da seção cilíndrica;
 θ = Ângulo de tronco do cone.

Hidrociclone	D_o/D_c	D_u/D_c	L/D_c	L_1/D_c	L_2/D_c
Bradley	$1/2$	$1/5$	-	$1/2$	$1/3$
Rietema	0,28	0,34	5	-	0,40

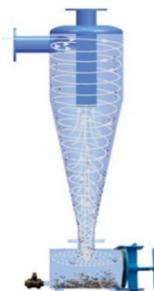
Fonte: Massarani (2002).

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

Fechar



Funcionamento



Fonte: Tesisat Dunyasi, 2018.

A suspensão com particulados é alimentado tangencialmente na lateral da parte cilíndrica. E ocorre a separação das partículas devido a diferença de densidade com o líquido na presença de um campo centrífugo. O líquido contendo finas partículas é retirada no topo do equipamento e ao final da parte cônica recupera-se as partículas.

Tesisat Dunyasi. **Hidrociclones**. 2018. Disponível em: <http://tesisatdunyasi.com.tr/index.php?route=product/product&product_id=240/> Acessado em: 31 jul. 2018.

Fechar



Aplicação do método proposto em Massarani, 2002.

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 70 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Hidrociclone.

Procedimentos para os cálculos:

- Passo 1:** Determinar a velocidade de operação (u) - equações 1;
- Passo 2:** Calcular a vazão de projeto (Q_{proj}) - equação 2;
- Passo 3:** Determinar o quociente das vazões do fluido no "underflow" e na alimentação (R_L) e os fatores de correções (f(R_L) e g(C_v)) - equações 3, 4 e 5;
- Passo 4:** Obter o diâmetro de corte (D*) - equação 6;
- Passo 5:** Definir o número de hidrociclones que devem ser ligados paralelamente (N_{hidrociclones}) - equação 7; Adotar valor inteiro mais próximo.
- Passo 6:** Obter o valor da eficiência de coleta no campo centrífugo (I) - equação 8;
- Passo 7:** A eficiência individual de coleta, n do passo anterior pode ser determinado pela equação 9, ou no caso do modelo de distribuição granulométrica RRB através da equação 10;
- Passo 8:** Finalmente determinar a eficiência global de coleta (E_{global}) - equação 11;
- Passo 9:** E, calcular a concentração volumétrica no "underflow" (C_{vu}) - equação 12.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 1:

$$\beta = \frac{(-\Delta P)}{\rho \frac{u^2}{2}}$$

-delta P = Queda de pressão;
u = Velocidade;
ρ = Densidade do líquido;
β = Parâmetro tabelado (tab. 1).

Equação 2:

$$Q_{proj} = \frac{\pi u D_c^2}{4}$$

Q_{proj} = Vazão de projeto;
u = Velocidade;
D_c = Diâmetro da parte cilíndrica.

Equação 3 e 4:

$$f(R_L) = 1 + A R_L$$

$$R_L = B \left(\frac{D_u}{D_c}\right)^C$$

A, B, C = Parâmetros apresentados na tabela anterior;
D_u = Diâmetro do duto de saída "underflow";
D_c = Diâmetro da parte cilíndrica;

Equação 5:

$$g(C_v) = \frac{1}{\sqrt{4.8(1-C_v)^2 - 3.8(1-C_v)}} \quad C_v = \text{Concentração volumétrica das partículas}$$

Hidrociclone	β	K	A	B	C
Bradley	7500	0.016	1,73	55,3	4,75
Rietema	1200	0,039	1,73	145	2,63

Fonte: Adaptado de Massarani (2002).

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 6:

$$\frac{D^*}{D_c} = K \left[\frac{\mu D_c}{Q_A (\rho_s - \rho_f)} \right]^{0.5} f(R_L) g(C_v)$$

D* = Diâmetro de corte;
D_c = Diâmetro cilíndrico;
K = Parâmetro tabela em pagina anterior;
Q_A = Vazão de projeto;
ρ_s e ρ_f = Densidade da partícula e do fluido;
f(R_L) = Fator de correção em razão de partículas coletadas não terem atuação da centrífuga;
g (C_v) = Fator que relaciona a concentração volumétrica da alimentação

Equação 7:

$$N_{hidrociclones} = \frac{Q_{proj}}{Q}$$

N_{hidrociclones} = Número de hidrociclones ligados paralelamente.
Q_{proj} = Vazão informada pelo usuário;
Q = Vazão calculada

Equação 8:

$$I = \int_0^1 \eta dX$$

I = Eficiência global de coleta no campo centrífugo;
η = Eficiência individual de coleta.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 9:

$$\eta = \frac{\exp\left(\frac{5 D_{particulas}}{D^*}\right)^2 - 1}{1 + \left(\frac{5 D_{particulas}}{D^*}\right)^2 + 146}$$

η = Eficiência individual de coleta;
D_{particulas} = Diâmetro das partículas (modelo de distribuição granulométrica);
D* = Diâmetro de corte.

Equação 10:

$$I = \frac{1.13 n}{1.44 - 0.279n + (k/D^*)} \left(\frac{k}{D^*}\right)$$

n = Eficiência individual de coleta;
D* = Diâmetro de corte;
k e n parâmetros do modelo RRB

Equação 11:

$$E_{global} = (1 - R_L) I + R_L$$

E_{global} = Eficiência global;
R_L = Quociente entre a vazão do fluido no "underflow" e da alimentação;
I = Eficiência global de coleta no campo centrífugo;

Equação 12:

$$C_{vu} = \frac{E_{global} C_p}{R_L - R_L C_v + E_{global} C_p}$$

C_{vu} = Concentração volumétrica no "underflow";
E_{global} = Eficiência global;
R_L = Quociente entre as vazões do fluido no "underflow" e na alimentação;
C_v = Vazão volumétrica das partículas na alimentação;

Fechar

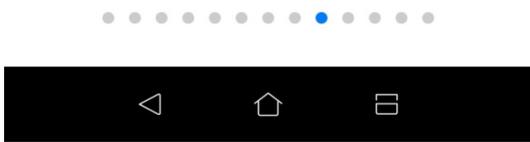


Continuação da Figura 70 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Hidrociclone.

Aplicação do método proposto Medronho (1984) para configuração Bradley e Antunes; Medronho (1992) para configuração Rietema

CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclone. *Rev. Mineral Engineering*, v. 13, n. 2, p. 183-191, 2000.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 1:

$$D_c = \frac{3.5 \rho_f^{0.31} Q_A^{0.54}}{\mu^{0.085} \Delta P^{0.23}} \quad (\text{Bradley})$$

$$D_c = \frac{4 \rho_f^{0.27} Q_A^{0.51}}{\mu^{0.028} \Delta P^{0.24}} \quad (\text{Rietema})$$

D_c = Diâmetro da parte cilíndrica;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 μ = Viscosidade.
 ΔP = Queda de pressão.

Equação 2:

$$N_{\text{hidrociclones}} = \frac{Q_{\text{proj}}}{Q}$$

N_{hidrociclones} = Número de hidrociclones ligados paralelamente.
 Q_{proj} = Vazão informada pelo usuário;
 Q = Vazão calculada

Equação 3:

$$Stk \cdot Eu = \frac{\pi D^* \Delta P D_c (\rho_s - \rho_f)}{\mu \rho_f Q_A}$$

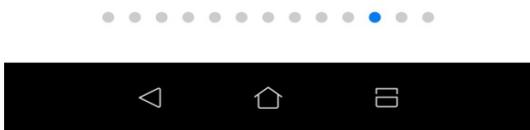
D* = Diâmetro de corte;
 ΔP = Queda de pressão;
 D_c = Diâmetro da parte cilíndrica;
 ρ_s, ρ_f = Densidade das partículas e do fluido;
 μ = Viscosidade.
 Q_A = Vazão de alimentação;

Equação 4:

$$Stk \cdot Eu = k_1 \left[\ln \frac{1}{R_L} \right]^{n_1} e^{(n_2 C_v)}$$

R_L = Quociente em as vazões no "underflow" e na alimentação;
 C_v = Concentração volumétrica na alimentação;
 k₁, n₁, n₂ = Parâmetros tabelados

Fechar



Procedimentos para os cálculos:

Passo 1: Determinar a vazão de projeto (Q_A) - equação 1;

Passo 2: Caso o usuário tenha informado a vazão de operação, definir o número de hidrociclones que devem ser ligados paralelamente (N_{hidrociclones}) - equação 2; Adotar valor inteiro mais próximo.

Passo 3: Determinar o diâmetro de corte (D^{*}) igualando as equações 3 e 4;

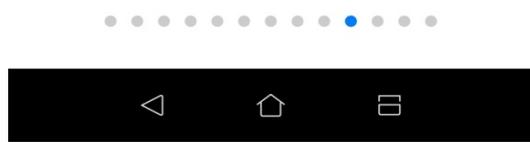
Passo 4: Obter o quociente de vazão do fluido no "underflow" e na alimentação (R_L) - equações 5, 6 e 7;

Passo 7: Determinar a eficiência individual de coleta (E_i) empregando o conceito de integral - equação 8;

Passo 8: Finalmente determinar a eficiência global de coleta (E_{global}) - equação 9;

Passo 9: E, calcular a concentração volumétrica no "underflow" (C_{vu}) - equação 10.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 5:

$$Re = \frac{4 \rho_f Q}{\pi \mu D_c}$$

Re = Número de Reynolds;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 Q = Vazão de alimentação;
 μ = Viscosidade;
 D_c = Diâmetro da parte cilíndrica.

Equação 6:

$$Eu = k_2 Re^{n_3} e^{(n_4 C_v)}$$

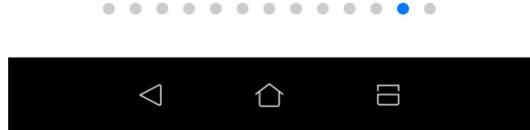
Re = Número de Reynolds;
 C_v = Concentração volumétrica na alimentação;
 k₂, n₃, n₄ = Parâmetros tabelados.

Equação 7:

$$R_L = k_3 \left[\frac{D_u}{D_c} \right]^{n_5} Eu^{n_6}$$

R_L = Quociente das vazões no "underflow" e na alimentação;
 D_u = Diâmetro no duto "underflow";
 D_c = Diâmetro da parte cilíndrica
 k₃, n₅ e n₆ = Parâmetros tabelado

Fechar



Continuação da Figura 70 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Hidrociclone.

Equações de projeto:

Equação 8:

$$E_i = \int_0^1 G'(y) dy$$
 Ei = Eficiência Individual de coleta;
 G(y) = Grade eficiência

Equação 9:

$$E_{global} = \frac{E_i - R_L}{1 - R_L}$$
 Eglobal = Eficiência global;
 Ei = Eficiência individual;
 RL = Quociente das vazões no "underflow" e na alimentação.

Equação 10:

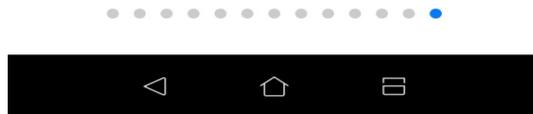
$$C_{vu} = \frac{E_{global} C_p}{R_L - R_L C_p + E_{global} C_p}$$
 C_{vu} = Concentração volumétrica no "underflow";
 Eglobal = Eficiência global;
 RL = Quociente entre as vazões do fluido no "underflow" e na alimentação;
 C_v = Vazão volumétrica das partículas na alimentação;

Parâmetros	Bradley	Rietema
k ₁	0,0550	0,0474
k ₂	258,0	371,5
k ₃	1,21 x 10 ⁶	1218
n ₁	0,66	0,74
n ₂	12,0	9,0
n ₃	0,37	0,12
n ₄	0	-2,12
n ₅	2,63	-1,12
n ₆	4,75	-0,30

Fonte: Adaptado de Castilho e Medronho (2000).

CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclone. **Rev. Mineral Engineering**, v. 13, n. 2, p. 183-191, 2000.

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 71 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Sedimentador.

Sedimentadores



Fonte: HidroBrasil, 2018.

A sedimentação ou decantação é um processo de separação sólido-líquido por ação de força gravitacional. Esta operação unitária ocorre em processos com grande volume de suspensões e baixo valor agregado. É empregado em tratamento de efluentes, recuperação de água para reciclo ou de partículas.

HIDROBRASIL. **HidroBrasil: soluções ambientais**. 2018. Disponível em: <http://www.hidrobrasil.com.br/producao> Acessado em: 06 ago. 2018.

Fechar

Funcionamento



Fonte: Guimarães, 2010.

Na sedimentação em massa, a alimentação ocorre continuamente e são compostos por três correntes: alimentação, "overflow" e "underflow". Na corrente "overflow" é retirado a solução líquida com finas partículas que não conseguem ser retiradas na corrente de retidos. Devido a ação da gravidade, o material particulado contendo o líquido remanescente fica depositado e são retirados na corrente "underflow".

GUIMARÃES, F. A. V. Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos métodos industriais. 2010. 235 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 71 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Sedimentador.

Configurações

A elaboração de um projeto de sedimentador em massa requer o dimensionamento da área da seção transversal e da altura do tanque de sedimentação. Neste aplicativo serão trabalhados os métodos de Kynch e Biscaia Júnior. Nestes métodos é usual a realização do teste de proveta.

Este teste consiste em colocar em uma proveta o material em suspensão e anotar de tempos em tempos, a altura do material particulado na região de sedimentação. Com essas informações é construído o gráfico de altura de sedimentação versus tempos conforme figura abaixo. A partir dessas informações aplica-se os métodos de Kynch e Biscaia Jr.



PEÇANHA, R. P. **Sistemas particulados**: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 424 p.

Fechar



Procedimentos para os cálculos:

- Passo 1:** Traçar reta tangente em cada ponto da curva e obter z_i , conforme gráfico abaixo;
- Passo 2:** Calcular a concentração em cada ponto (C_i) - equação 1;
- Passo 3:** Determinar a velocidade de descida das partículas (v_i) - equações 2;
- Passo 4:** Com as informações dos itens anteriores e os dados fornecidos pelo usuário, calcular a área da seção transversal em cada ponto (S_i) - equação 3;
- Passo 5:** Adotar o maior valor dentre as áreas calculadas no passo 4 para ser a área mínima do sedimentador (A_{min})
- Passo 6:** Adicionar 10% como fator de segurança na área mínima do sedimentador.



PEÇANHA, R. P. **Sistemas particulados**: operações unitárias envolvendo partículas e fluidos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 424 p.

Fechar



Aplicação do método Kynch

Método para obtenção da área de seção transversal

Fechar



Equações de projeto:

Equação 1:

$$C_i = \frac{C_A z_0}{z_i}$$

C_A = Concentração de alimentação;
 z_0 = Altura do início do ensaio de proveta;
 z_i = Altura na interface clarificado-sedimento;
 C_i = Concentração em cada ponto estabelecido;

Equação 2:

$$v_i = \frac{-dz}{dt} = \frac{z_i - z}{t}$$

v_i = Velocidade de descida das partículas;
 z_i = Altura de interface clarificado-sedimento no instante t ;
 z = Altura de sedimentação no instante t ;
 t = Tempo no instante;

Equação 3:

$$S_i = \frac{Q_A C_0 (1/C_i - 1/C_L)}{v_i}$$

S_i - Área da seção transversal;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 C_0 = Concentração de alimentação;
 C_i = Concentração no instante t ;
 C_L = Concentração do lodo no "underflow";
 v_i = Velocidade de descida das partículas.

Fechar



Continuação da Figura 71 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Sedimentador.

Procedimentos para os cálculos:

Passo 1: Verificar os dados que tem características linear e realizar o ajuste da curva - equação 1

Passo 2: Ajustar os demais dados para uma função exponencial - equação 2; Característica do gráfico como da figura abaixo.

Passo 3: Obter a altura mínima (z_{min}) - equação 3;

Passo 4: Determinar o tempo mínimo analisando se o z_{min} encontra-se na região linear ou exponencial - equações 4 ou 5;

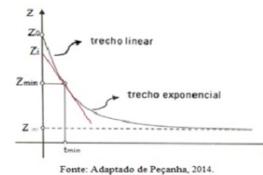
Passo 5: Calcular a área mínima (A_{min}) - equação 6;

Passo 6: Adicionar 10% como fator de segurança na área mínima do sedimentador.

Aplicação do método Biscaia Jr.

Método para obtenção da área de seção transversal

Fechar



Fonte: Adaptado de Peçanha, 2014.

PEÇANHA, R. P. **Sistemas particulados:** operações unitárias envolvendo partículas e fluidos. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 424 p.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 1:

$$z_{min} = A t_{min} + B$$

z_{min} = Altura mínima;
 t_{min} = Tempo mínimo;
 A = Coeficiente angular;
 B = Coeficiente linear.

Equação 2:

$$z_{min} = B e^{A t_{min}}$$

z_{min} = Altura mínima;
 t_{min} = Tempo mínimo;
 A, B = Coeficiente de ajuste de curva exponencial.

Equação 3:

$$z_{min} = \frac{C_A z_0}{C_L}$$

z_{min} = Altura mínima;
 z_0 = Altura inicial do ensaio de proveta;
 C_A = Concentração de alimentação;
 C_L = Concentração do lodo "underflow".

Equação 4 e 5:

$$t_{min} = \frac{z_{min} - B_{eq.1 \text{ Grau}}}{A_{eq.1 \text{ Grau}}} \quad (\text{Função linear})$$

$$t_{min} = e^{\left(\frac{\ln(z_{min} / B_{exponencial})}{A_{exponencial}} \right)} \quad (\text{Função exponencial})$$

A e B = Coeficientes de ajuste da curva

Equação 6:

$$(Area)_{proj} = \frac{Q_A t_{min}}{z_0}$$

(Area)_{proj} = Área de seção transversal;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 t_{min} = Tempo mínimo do processo;
 z_0 = Altura inicial do ensaio de proveta;

Fechar



Altura do Sedimentador

Fechar



Continuação da Figura 71 – Apresentação do botão "Informações" do Módulo de Sedimentador.

Procedimentos para os cálculos:

Passo 1: Obter instante que o ensaio deixa de ter comportamento linear, o tempo crítico (t_c);

Passo 2: Obter o tempo necessário para atingir a concentração uniforme durante o ensaio de proveta (t_R);

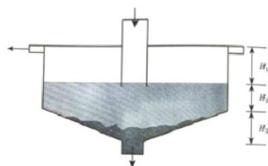
Passo 3: Determinar o tempo de residência (t^*) - equação 1;

Passo 4: Adotar como altura da região de líquido clarificado (H_1) = 60 centímetros;

Passo 5: Calcular a altura do espessador (H_2) - equações 2;

Passo 6: Calcular a altura da região espessada (H_3) - equação 3;

Passo 7: Calcular a altura mínima do sedimentador - equação 4;



CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 423 p.

Fechar



Equações de projeto:

Equação 1:

$$t^* = t_R - t_c$$

t^* = Tempo de residência;
 t_R = Tempo para atingir a concentração uniforme do líquido clarificado;
 t_c = Tempo crítico, instante que ele deixa de ser linear.

Equação 2:

$$H_2 = \frac{4}{3} \frac{Q_A C_A t^* (\rho_s - \rho_f)}{A_{\min} \rho_s (\rho_{esp} - \rho_f)}$$

H_2 = Altura do espessador;
 Q_A = Vazão de alimentação;
 C_A = Concentração de alimentação;
 t^* = Tempo de residência;
 ρ_s = Densidade das partículas;
 ρ_f = Densidade do fluido;
 ρ_{esp} = Densidade do espessado;
 A_{\min} = Área mínima.

Equação 3:

$$H_3 = 0,073 D$$

H_3 = Altura da região espessada;
 D = Diâmetro a seção transversal, caso de sedimentador cilíndrico

Equação 4:

$$H_{\text{sedimentador}} = H_1 + H_2 + H_3$$

H_1 = Altura da região de líquido clarificado; $H_1 = 0,6$ metros.
 H_2 = Altura do espessador;
 H_3 = Altura da região espessada.

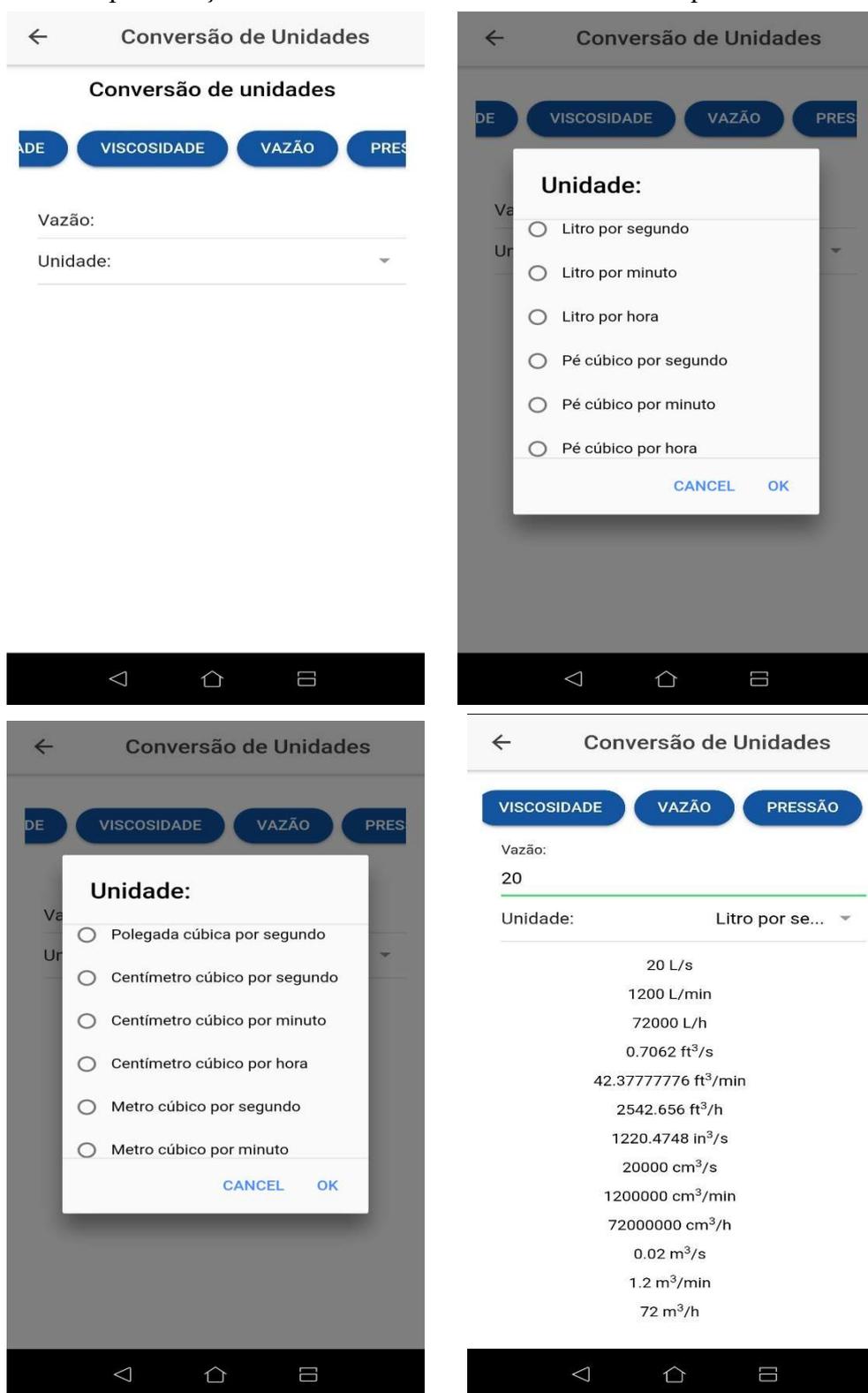
Fechar



Fonte: Da Autora (2019).

APÊNDICE B

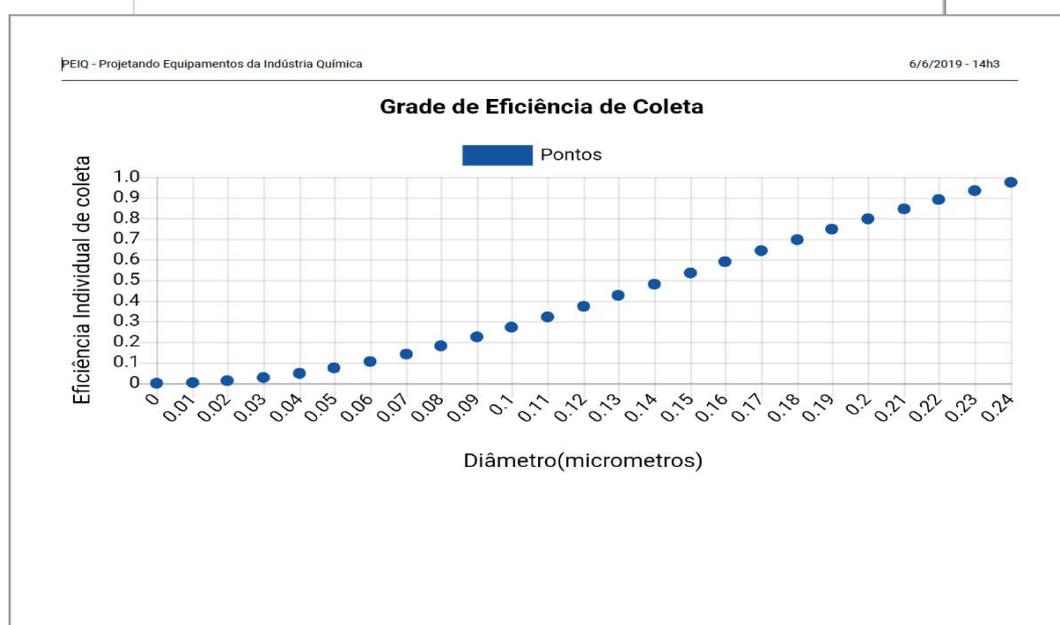
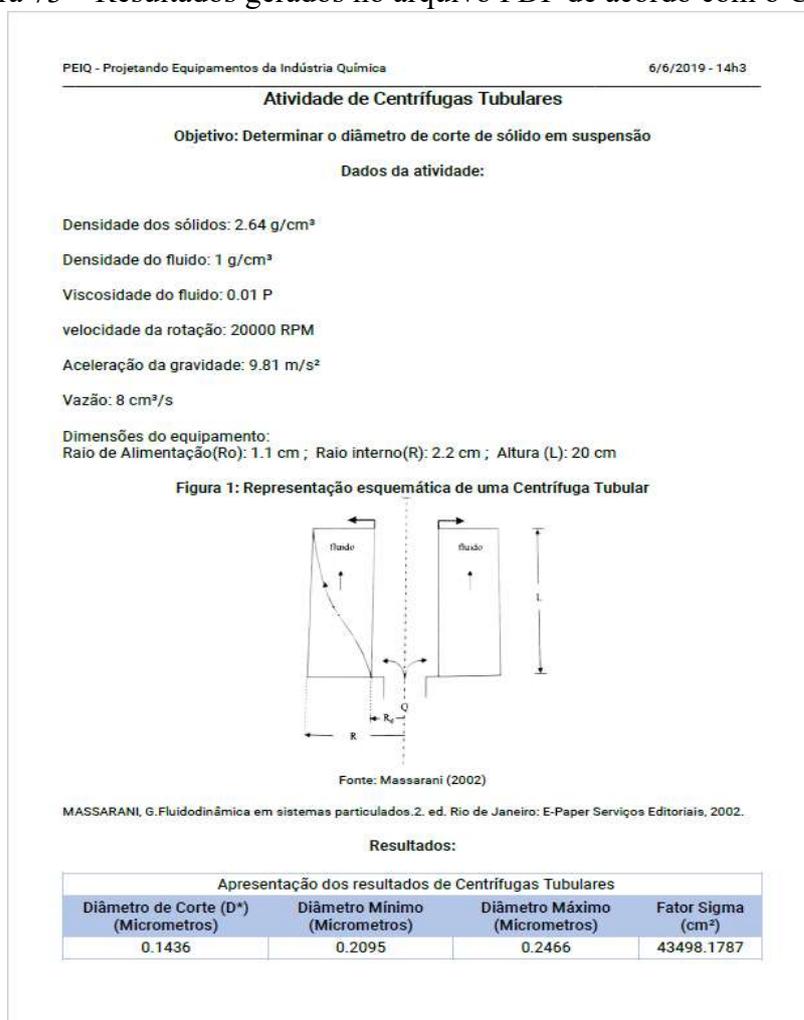
Figura 72 – Representação do módulo de Conversão de Unidades para vazão.



Fonte: Da Autora (2019).

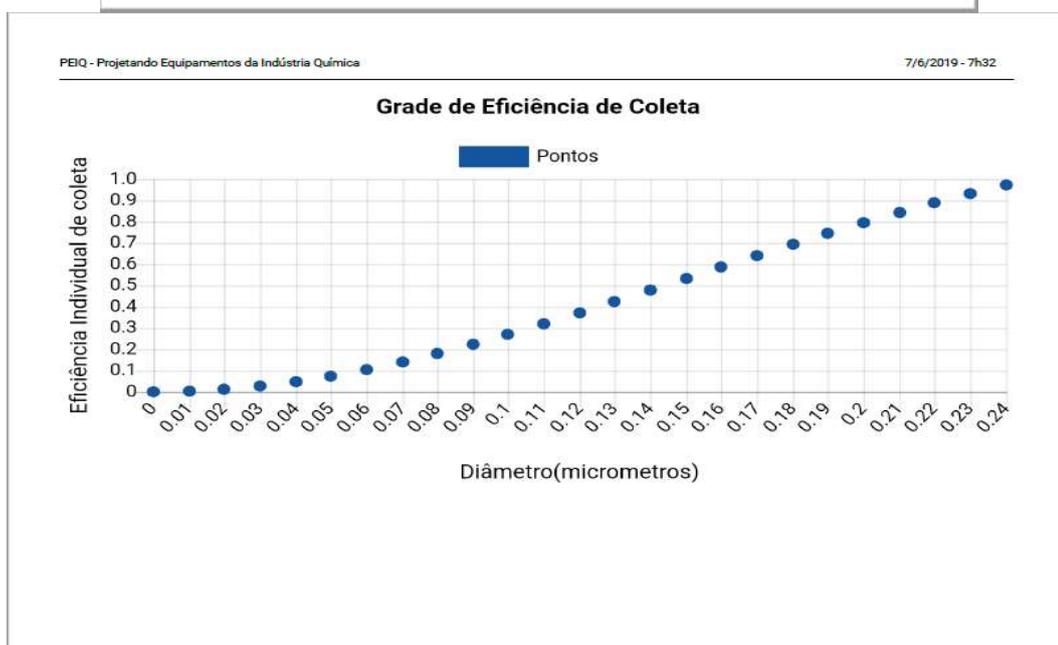
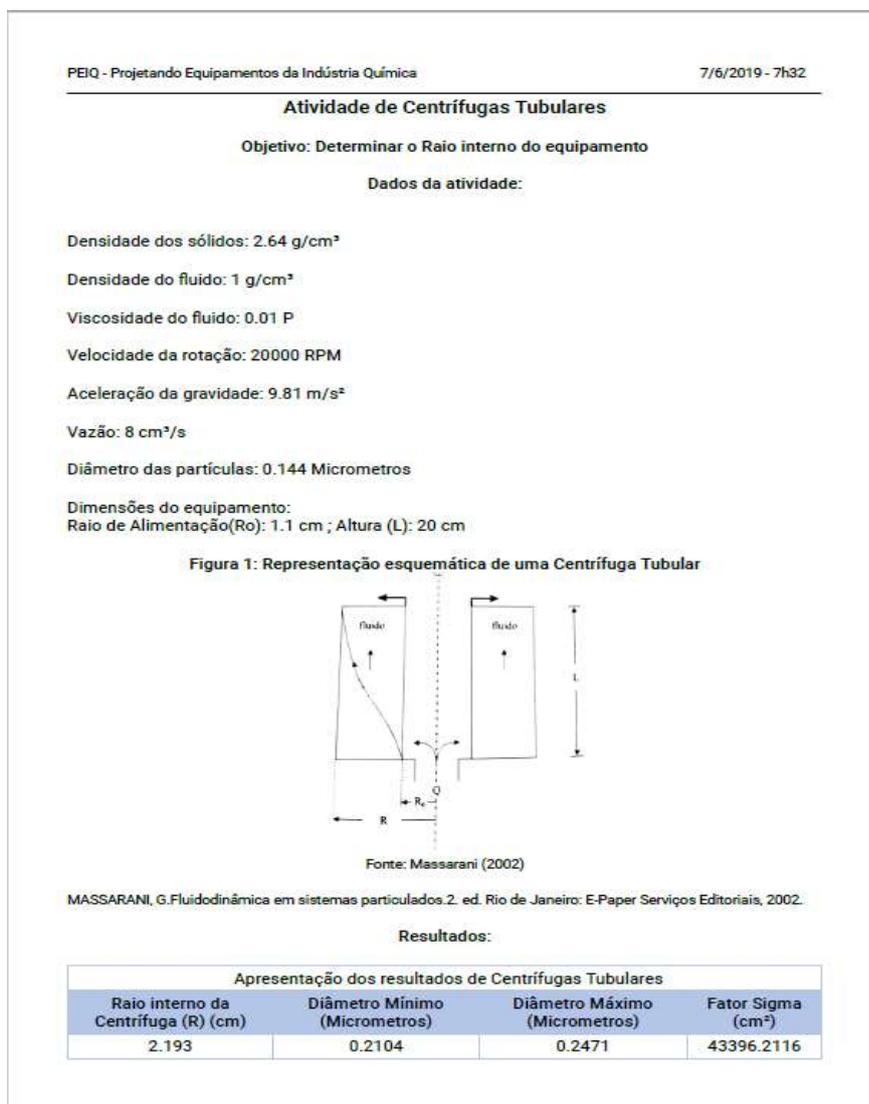
APÊNDICE C

Figura 73 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 1.



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 74 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 2.



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 75 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 3.

Atividade de Centrífugas Tubulares

Objetivo: Scale Up de Centrífugas

Dados da atividade:

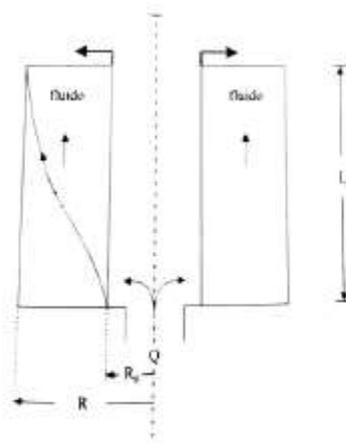
Vazão de alimentação na Centrífuga Laboratorial: 8.333 cm³/s

Velocidade da rotação na Centrífuga Laboratorial: 18000 RPM

Aceleração da gravidade: 9.81 m/s²

Velocidade de rotação na Centrífuga Industrial : 12000 RPM

Figura 1: Representação esquemática de uma Centrífuga Tubular



Fonte: Massarani (2002)

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

Resultados:

Apresentação dos resultados de Centrífugas Tubulares						
Centrífugas	Altura (L) (cm)	Raio de Alimentação (R0) (cm)	Raio do equipamento (cm)	Velocidade (RPM)	Fator Sigma (cm ²)	Vazão (Q) (cm ³ /s)
Laboratorial	20	1	2.5	18000	10513.0688	8.333
Industrial	50	5	7.5	12000	157129.4255	124.5459

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 76 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 4.

PEIQ - Projetando Equipamentos da Indústria química

7/6/2019 - 9h29

Atividade de Ciclones

Objetivo: Dimensionar um Ciclone do tipo Lapple

Dados da atividade:

Tamanho médio das partículas: 40 Micrometros

Densidade do sólido: 1.55 g/cm³

Densidade do fluido: 0.000732 g/cm³

Viscosidade do fluido: 0.0262 cP

Vazão: 8400 m³/h

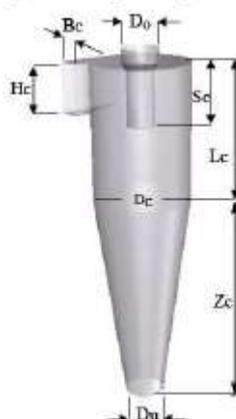
Velocidade de projeto: 15 m/s

Eficiência: 95 %

Resultados:

Apresentação das condições operacionais do Projeto						
Diâmetro de corte (Micrometros)	Total de Ciclones	Velocidade (cm/s)	Vazão (m ³ /h)	Diâmetro cilíndrico (m)	Perda de carga (dina/cm ²)	Potência do Soprador (cv)
9.1766	2	1245.2012	4200	0.8658	4526.1892	2.8718

Figura 1: Representação esquemática de Ciclone



Fonte: Adaptado de Utikar et al. (2010).

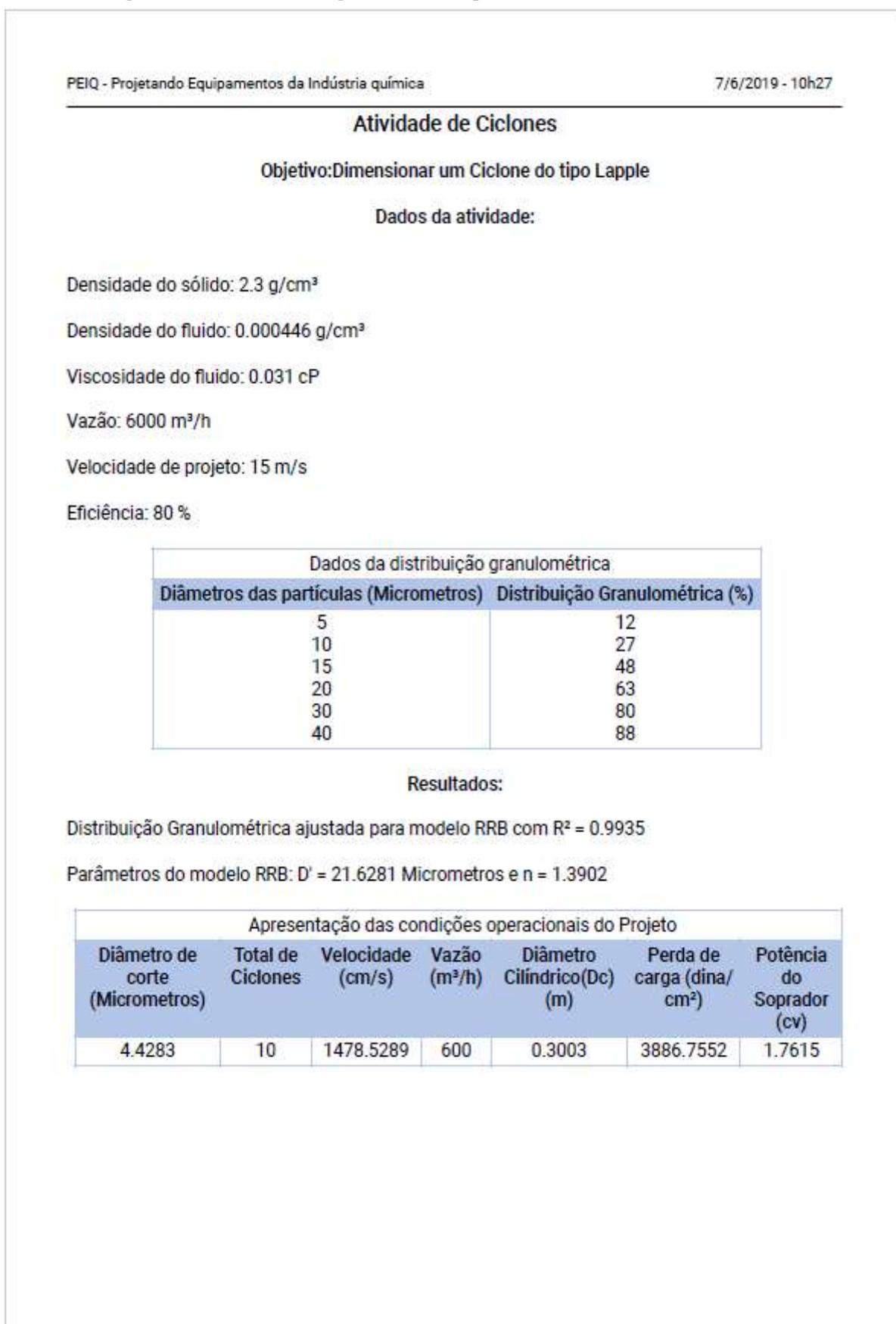
UTIKAR, R. et al. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. In: WOO OH, H. Computacional Fluid Dynamics. 1. ed. India: Infotech, 2010. cap. 11. 241 -266.

Continuação figura 76 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 4.

Dimensões do equipamento							
Hc (m)	Bc (m)	Área da seção retangular (m ²)	Do (m)	Lc (m)	Sc (m)	Zc (m)	Du (m)
0.4329	0.2164	0.0937	0.4329	1.7315	0.1082	1.7315	0.2164

Fonte: Da Autora (2019).

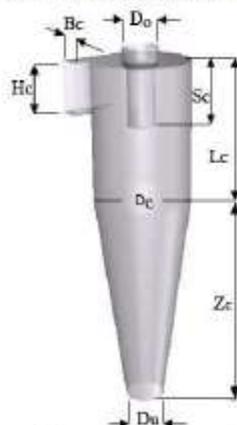
Figura 77 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 5.



Fonte: Da Autora (2019).

Continuação figura 77 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 5.

Figura 1: Representação esquemática de um Ciclone

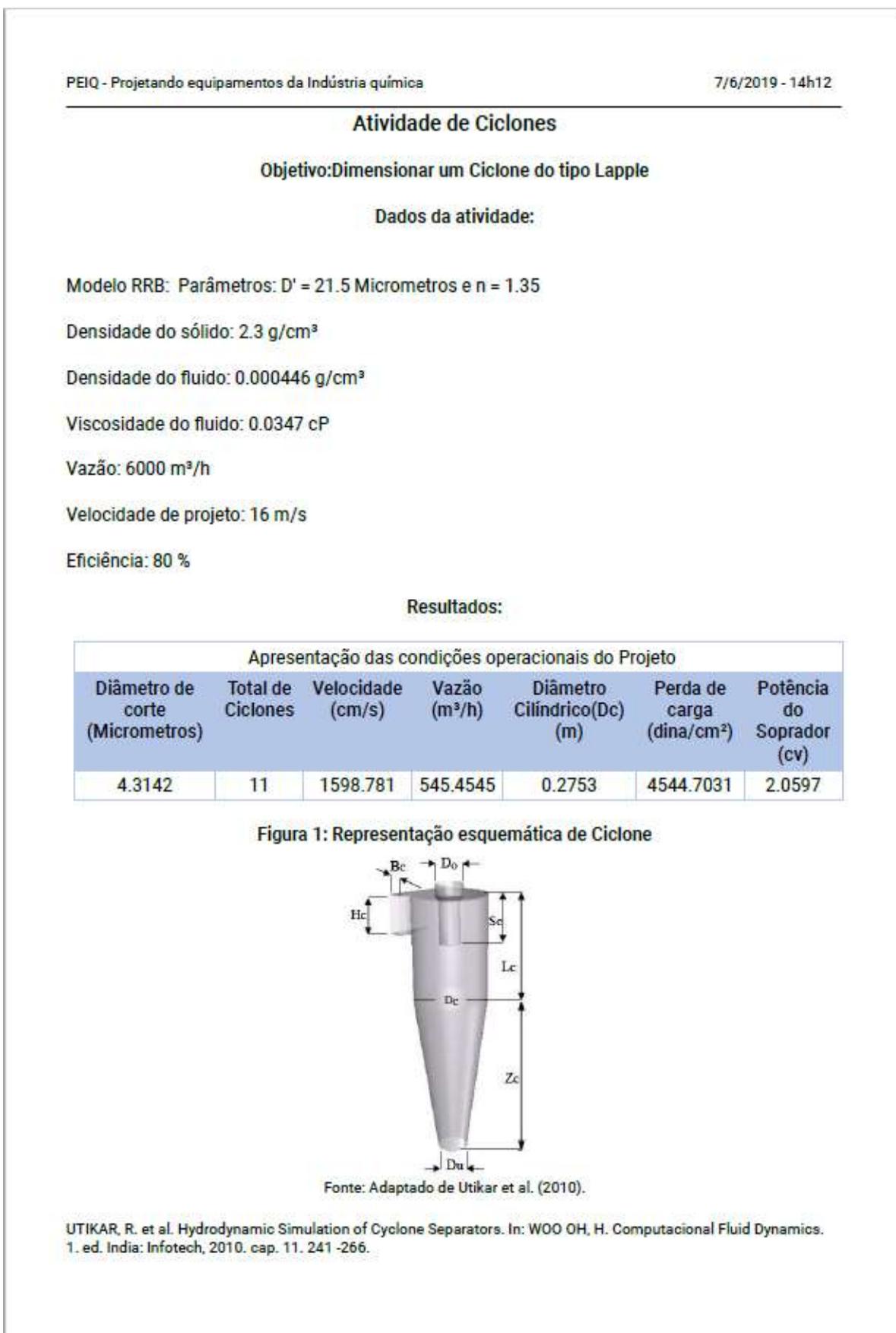


Fonte: Adaptado de Utikar et al. (2010).

UTIKAR, R. et al. Hydrodynamic Simulation of Cyclone Separators. In: WOO OH, H. Computacional Fluid Dynamics. 1. ed. Índia: Infotech, 2010. cap. 11. 241 -266.

Dimensões do equipamento							
Hc (m)	Bc (m)	Área da seção retangular (m ²)	Do (m)	Lc (m)	Sc (m)	Zc (m)	Du (m)
0.1501	0.0751	0.0113	0.1501	0.6006	0.0375	0.6006	0.0751

Figura 78 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 6.

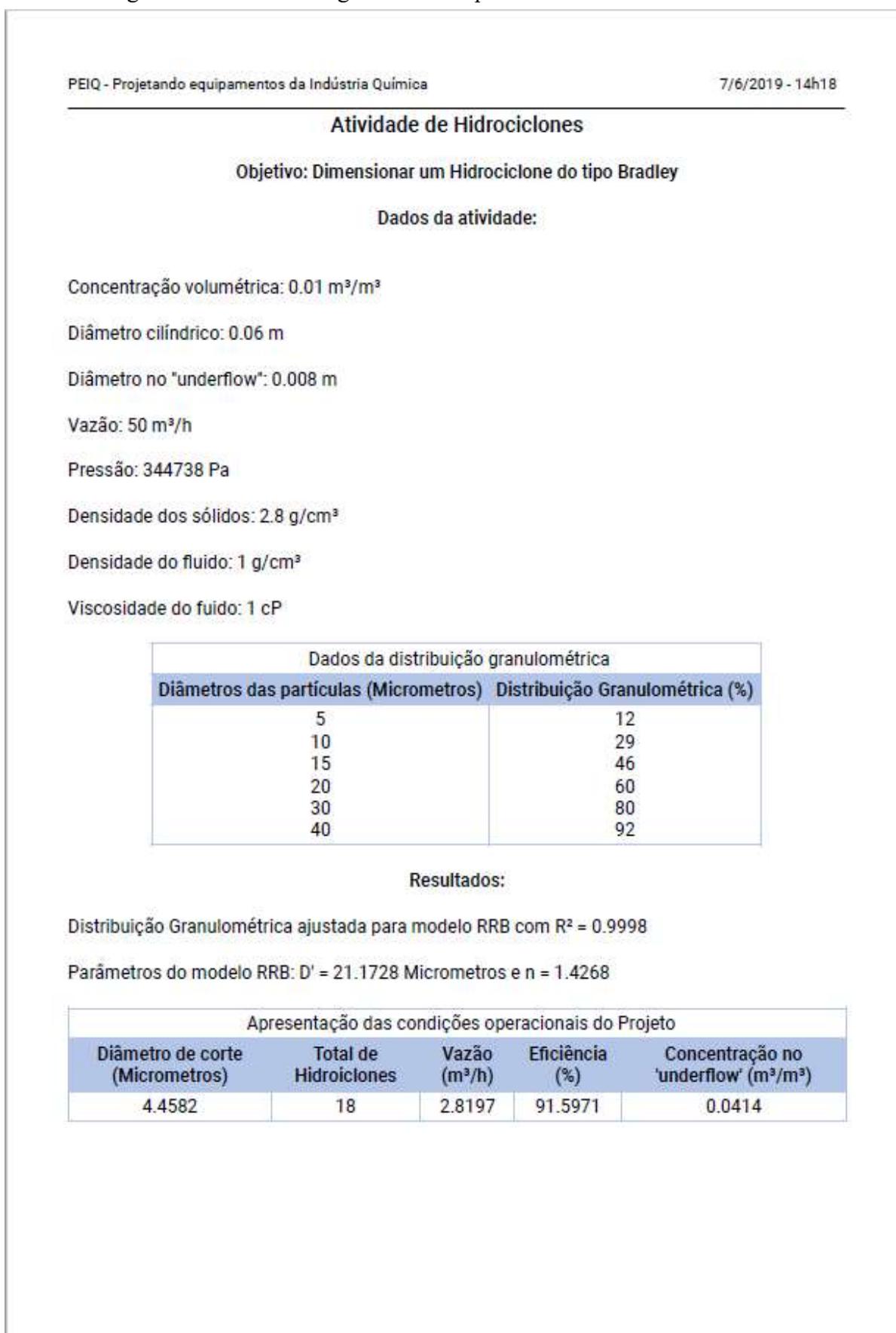


Continuação Figura 78 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 6.

Dimensões do equipamento							
Hc (m)	Bc (m)	Área da seção retangular (m ²)	Do (m)	Lc (m)	Sc (m)	Zc (m)	Du (m)
0.1377	0.0688	0.0095	0.1377	0.5507	0.0344	0.5507	0.0688

Fonte: Da Autora (2019).

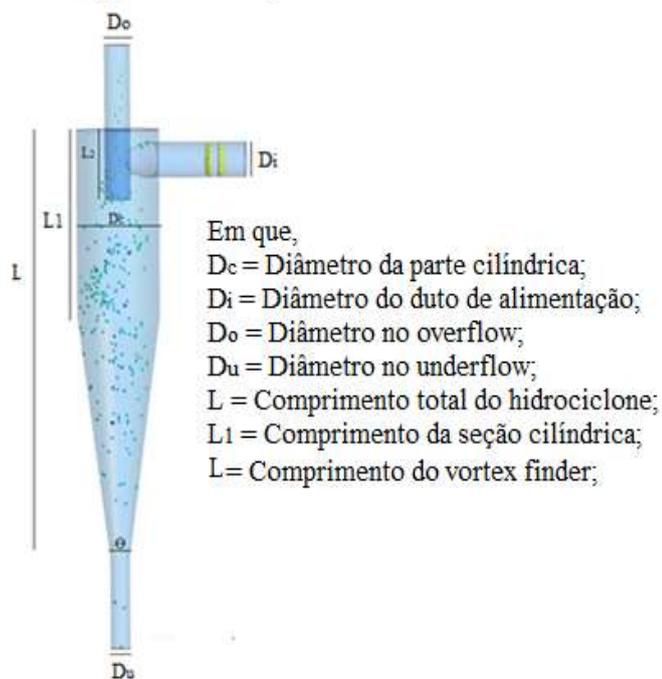
Figura 79 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 7.



Fonte: Da Autora (2019).

Continuação Figura 79 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 7.

Figura 1: Representação esquemática de Hidrociclone



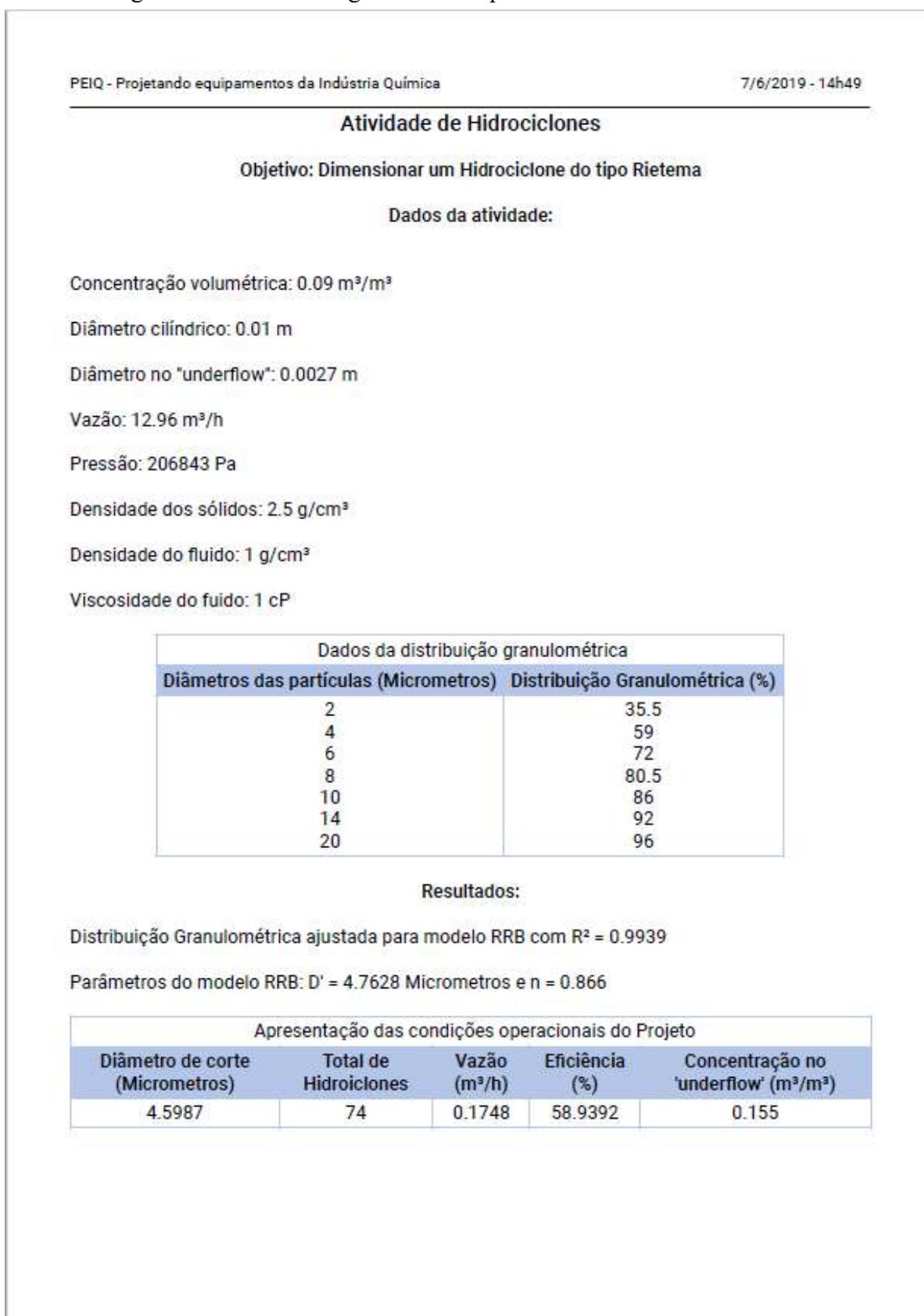
Fonte: Adaptado de Barros e Alves (2014).

BARROS, P.L.; ALVES, J.J.N. Fluidodinâmica Computacional: Hidrociclones. 2014D. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Jnd1F9bE5hU>> Acessado em: 19 dez. 2018.

Dimensões do equipamento						
D_c (m)	D_i (m)	D_o (m)	D_u (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L (m)
0.06	0.0086	0.012	0.008	0.03	0.02	0

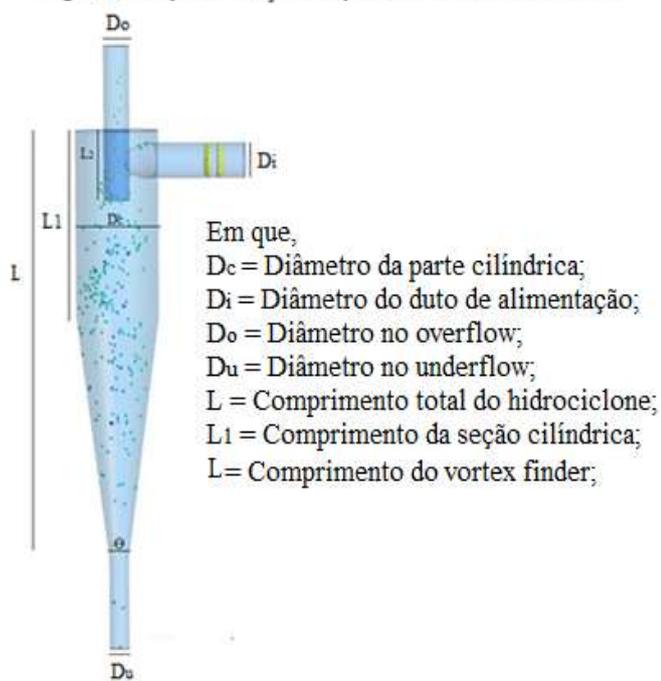
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 80 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 8.



Continuação Figura 80 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 8.

Figura 1: Representação esquemática de Hidrociclone



Fonte: Adaptado de Barros e Alves (2014).

BARROS, P.L.; ALVES, J.J.N. Fluidodinâmica Computacional: Hidrociclones. 2014D. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Jnd1F9bE5hU>> Acessado em: 19 dez. 2018.

Dimensões do equipamento						
D_c (m)	D_i (m)	D_o (m)	D_u (m)	L_1 (m)	L_2 (m)	L (m)
0.01	0.0028	0.0034	0.0027	0	0.004	0.05

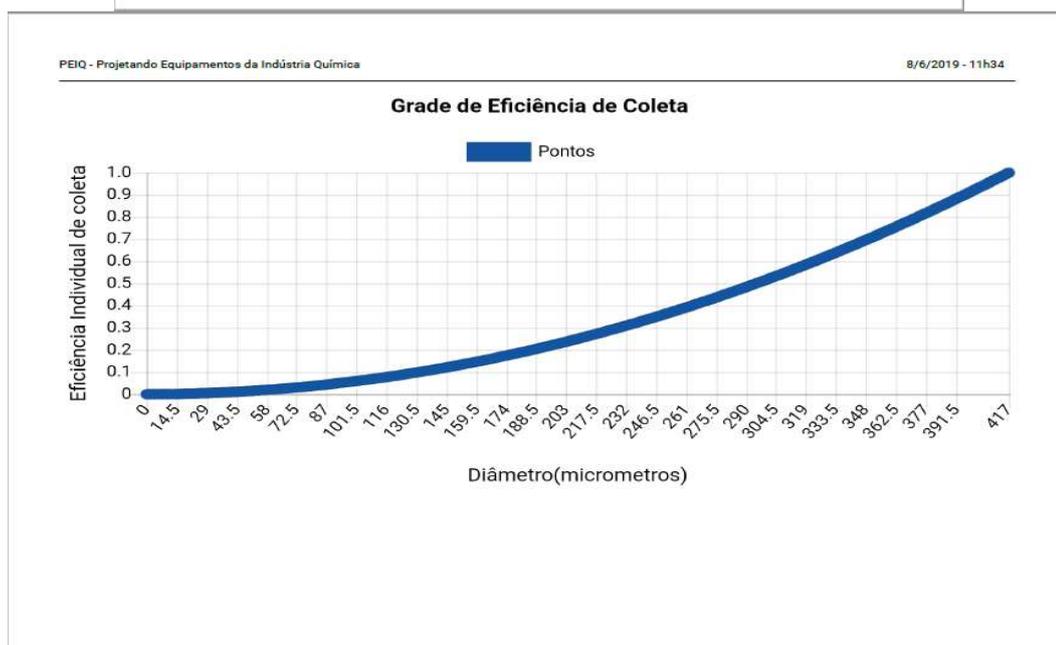
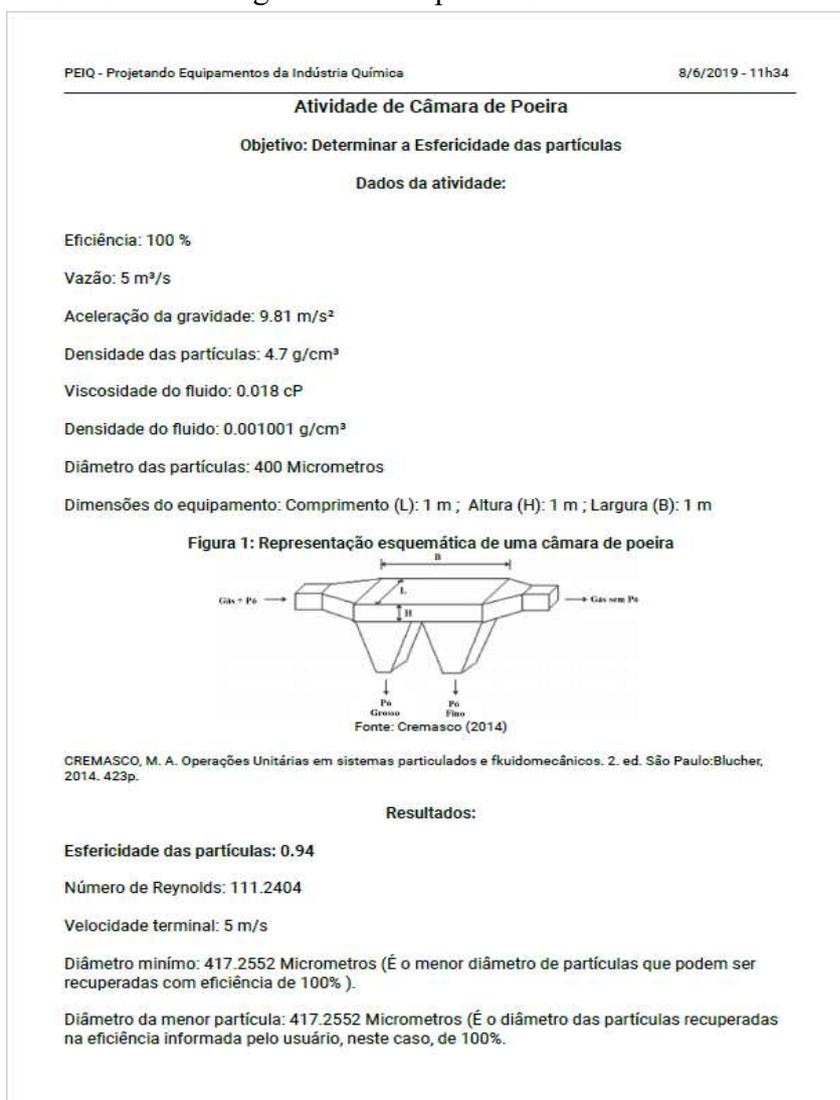
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 81 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 9.

PEIQ - Projetando equipamentos da Indústria Química		7/6/2019 - 15h10		
Atividade de Hidrociclones				
Objetivo: Dimensionar um Hidrociclone do tipo Rietema				
Dados da atividade:				
Concentração volumétrica: 0.09 m ³ /m ³				
Diâmetro cilíndrico: 0.01 m				
Diâmetro no "underflow": 0.0027 m				
Vazão: 12.96 m ³ /h				
Pressão: 206843 Pa				
Densidade dos sólidos: 2.5 g/cm ³				
Densidade do fluido: 1 g/cm ³				
Viscosidade do fluido: 1 cP				
Modelo RRB: Parâmetros: K' = 4.7628 Micrometros e n = 0.866				
Apresentação das condições operacionais do Projeto				
Diâmetro de corte (Micrometros)	Total de Hidrociclones	Vazão (m ³ /h)	Eficiência (%)	Concentração no 'underflow' (m ³ /m ³)
4.5987	74	0.1748	58.9392	0.155

Fonte: Da Autora (2019).

Figura 82 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 10.



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 83 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 11.

PEIQ - Projetando Equipamentos da Indústria Química

8/6/2019 - 12h26

Atividade de Câmara de Poeira

Objetivo: Determinar as Dimensões dos compartimentos da câmara de poeira

Dados da atividade:

Eficiência: 100 %

Vazão: 1.167 m³/s

Aceleração da gravidade: 9.81 m/s²

Densidade das partículas: 4.5 g/cm³

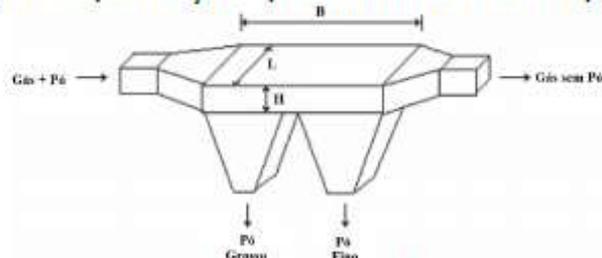
Viscosidade do fluido: 0.01909 cP

Densidade do fluido: 0.001091 g/cm³

Esfericidade das partículas: 0.75

Dimensões do equipamento: Altura (H): 1 m ; Largura (B): 1.5 m

Figura 1: Representação esquemática de uma câmara de poeira



Fonte: Cremasco (2014)

CREMASCO, M. A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. 2. ed. São Paulo:Blucher, 2014. 423p.

Resultados:

Diâmetro mínimo: 24.6821 Micrometros (É o menor diâmetro de partículas que podem ser recuperadas com eficiência de 100%).

Diâmetro da menor partícula: 24.6821 Micrometros (É o diâmetro das partículas recuperadas na eficiência informada pelo usuário, neste caso, de 100%).

Fonte: Da Autora (2019).

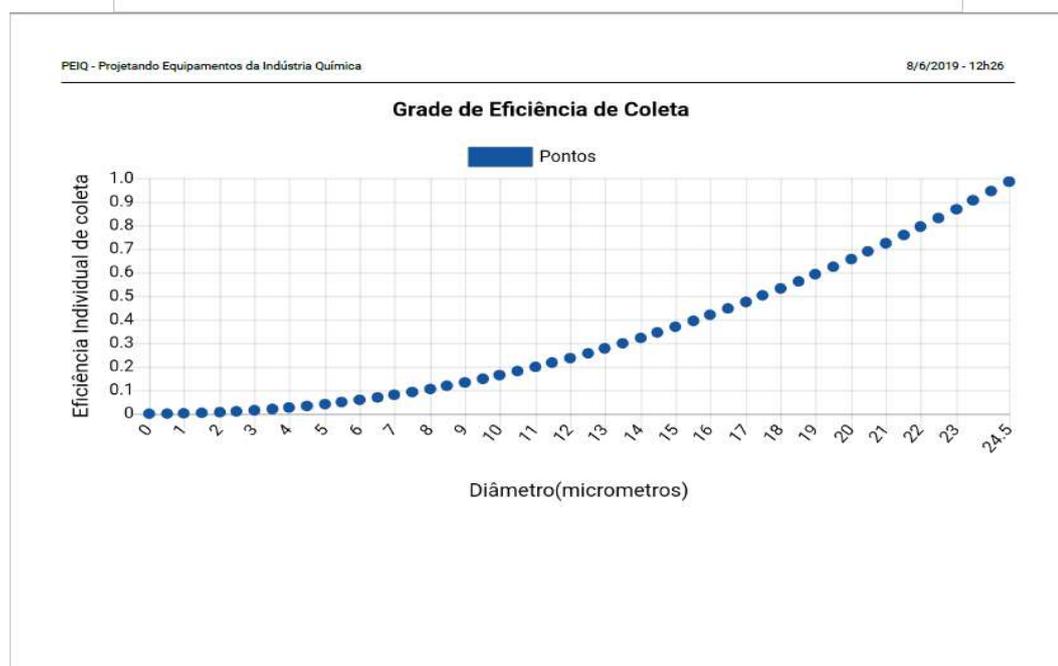
Continuação da Figura 83 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 11.

PEIQ - Projetando Equipamentos da Indústria Química 8/6/2019 - 12h26

Apresentação dos resultados da câmara de poeira por seção

Diâmetros (Micrometros)	Velocidade Terminal (m/s)	Número de Reynolds	Comprimentos(L) (m)
91	0.6829	3.5517	1.139
59.6	0.344	1.1718	2.261
47.9	0.2341	0.6409	3.323
41.3	0.1787	0.4218	4.353

*A faixa granulométrica é sempre composta pelo valor do diâmetro anterior até o valor do diâmetro atual.



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 84 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 12.

Atividade de Câmara de Poeira

Objetivo: Determinar a faixa granulométrica de recuperação das partículas na câmara de poeira

Dados da atividade:

Eficiência: 100 %

Vazão: 2.33333 m³/s

Aceleração da gravidade: 9.81 m/s²

Densidade das partículas: 3 g/cm³

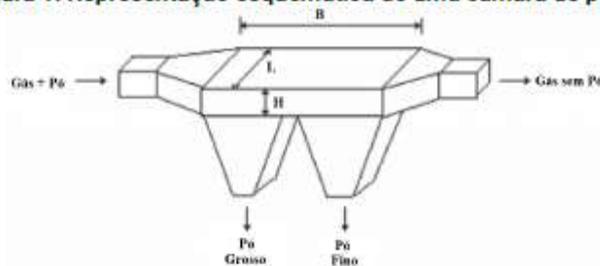
Viscosidade do fluido: 0.018 cP

Densidade do fluido: 0.001194 g/cm³

Esfericidade das partículas: 0.75

Dimensões do equipamento: Altura (H): 0.5 m ; Largura (B): 4 m

Figura 1: Representação esquemática de uma câmara de poeira



Fonte: Massarani (2002)

MASSARANI, G. Fluidodinâmica em sistemas particulados. 2. ed. Rio de Janeiro: E-Paper Serviços Editoriais, 2002.

Resultados:

Diâmetro mínimo: 40.0921 Micrometros (É o menor diâmetro de partículas que podem ser recuperadas com eficiência de 100%).

Diâmetro da menor partícula: 40.0921 Micrometros (É o diâmetro das partículas recuperadas na eficiência informada pelo usuário, neste caso, de 100%.

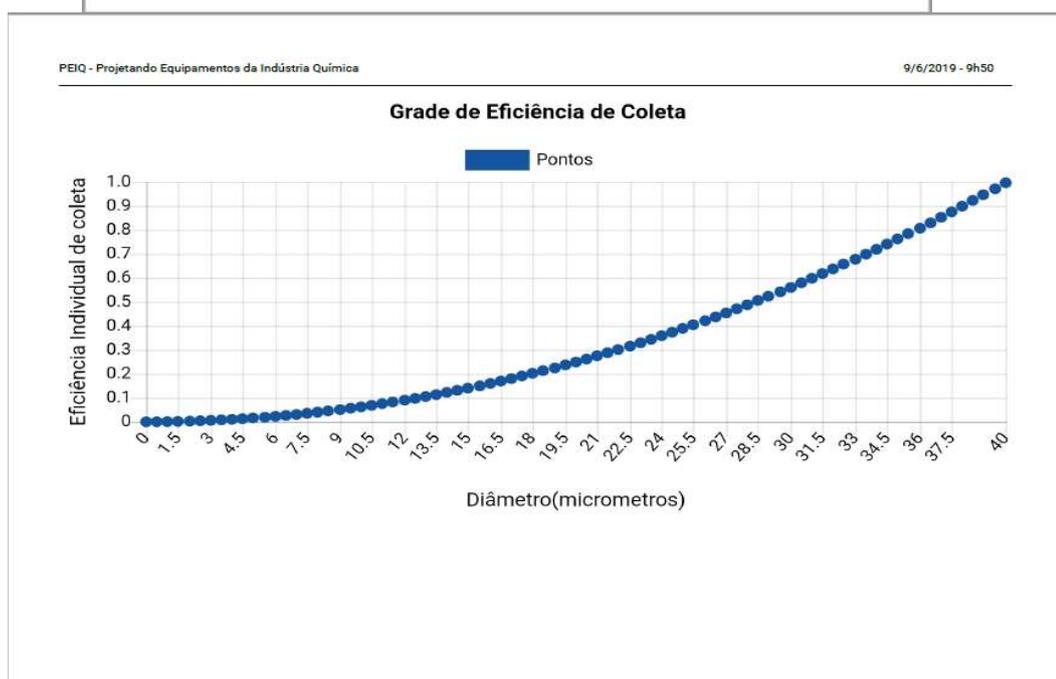
Continuação da Figura 84 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 12.

PEIQ - Projetando Equipamentos da Indústria Química 9/6/2019 - 9h50

Apresentação dos resultados da câmara de poeira por seção

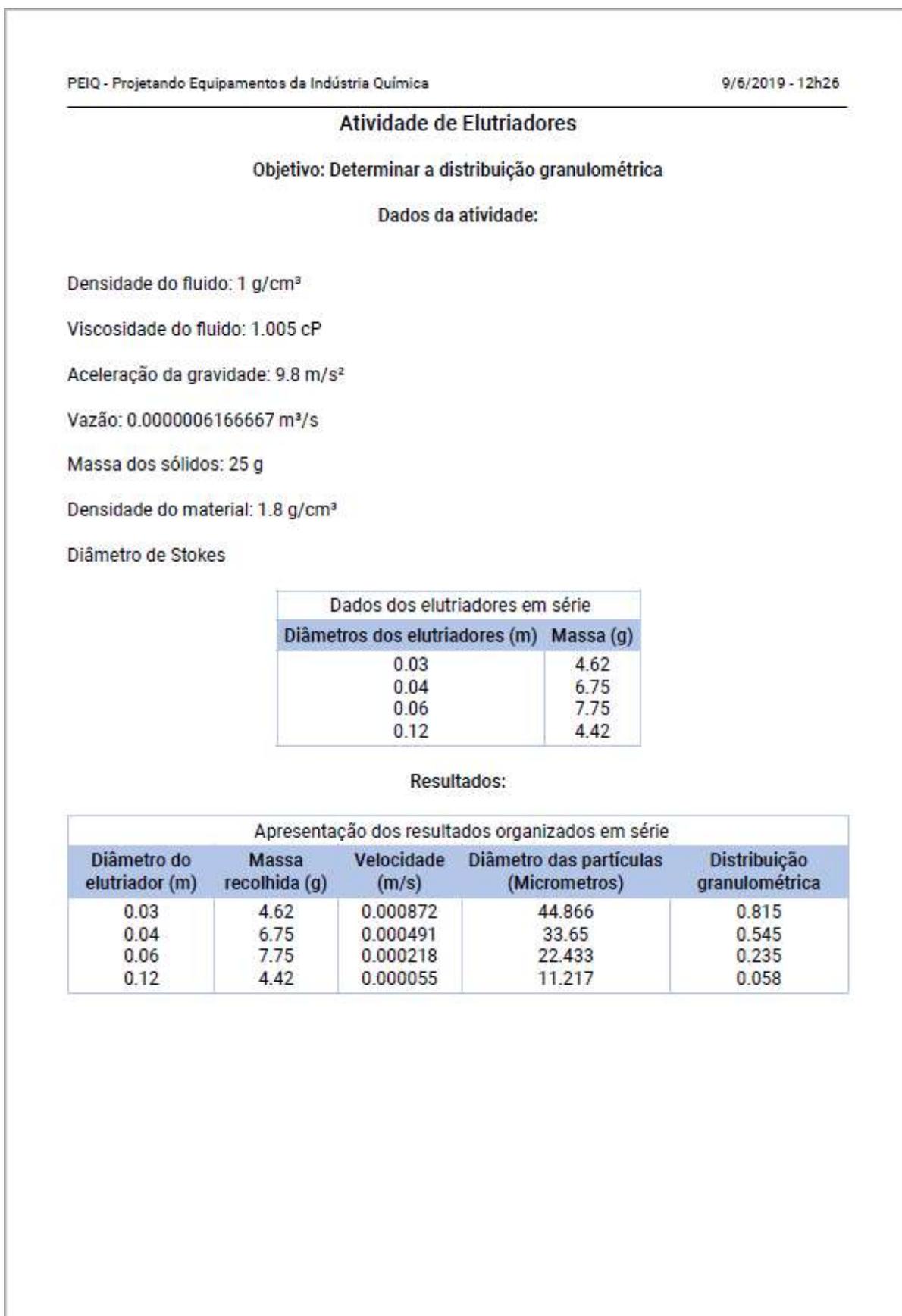
Comprimentos das seções (m)	Velocidade Terminal (m/s)	Número de Reynolds	Diâmetros (Micrometros)
1.5	0.3889	1.862	72.199
1.5	0.1944	0.6374	49.433
1.5	0.1296	0.3447	40.092

*A faixa granulométrica é sempre composta pelo valor do diâmetro anterior até o valor do diâmetro atual.



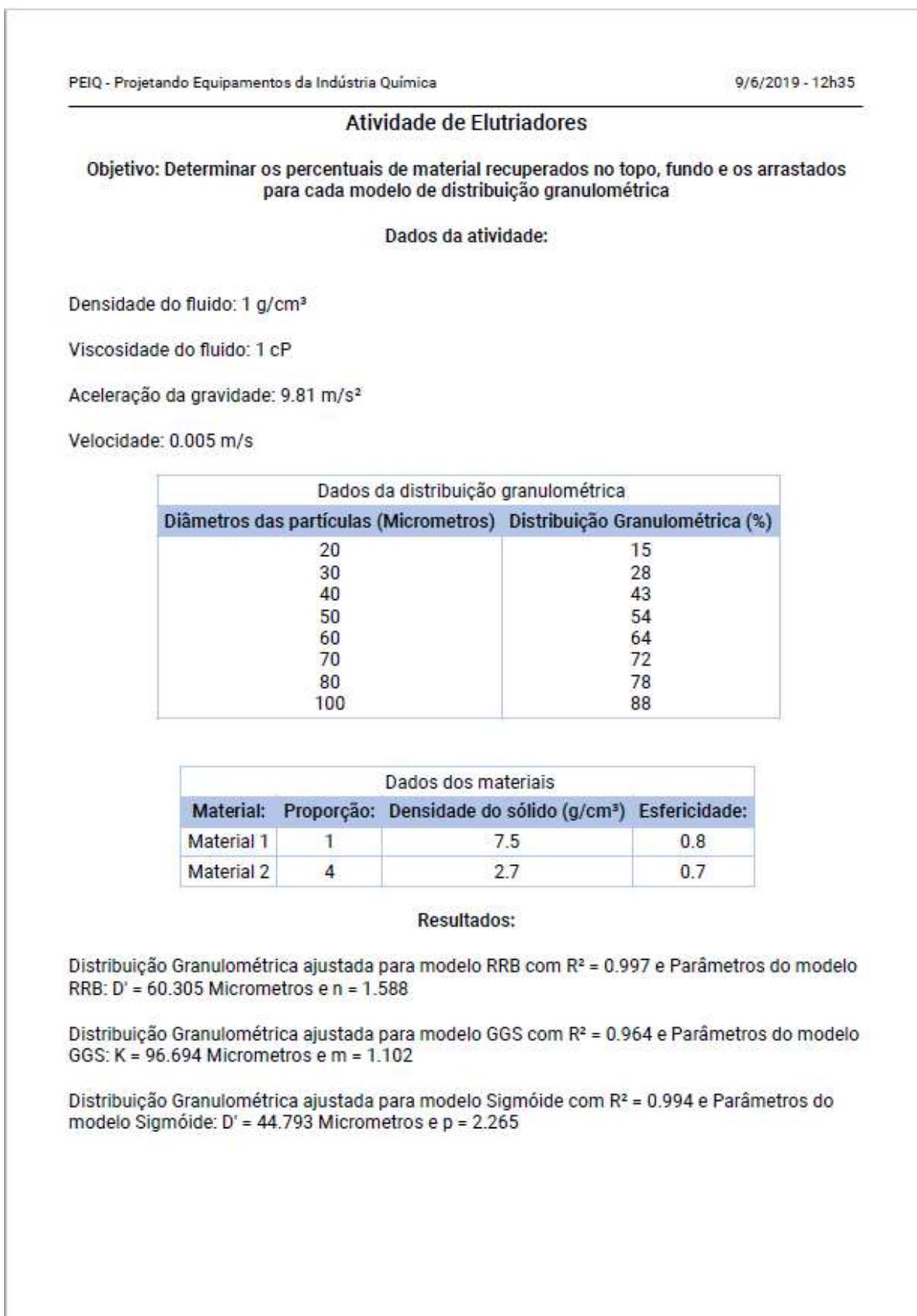
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 85 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 13.



Fonte: Da Autora (2019).

Figura 86 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 14.

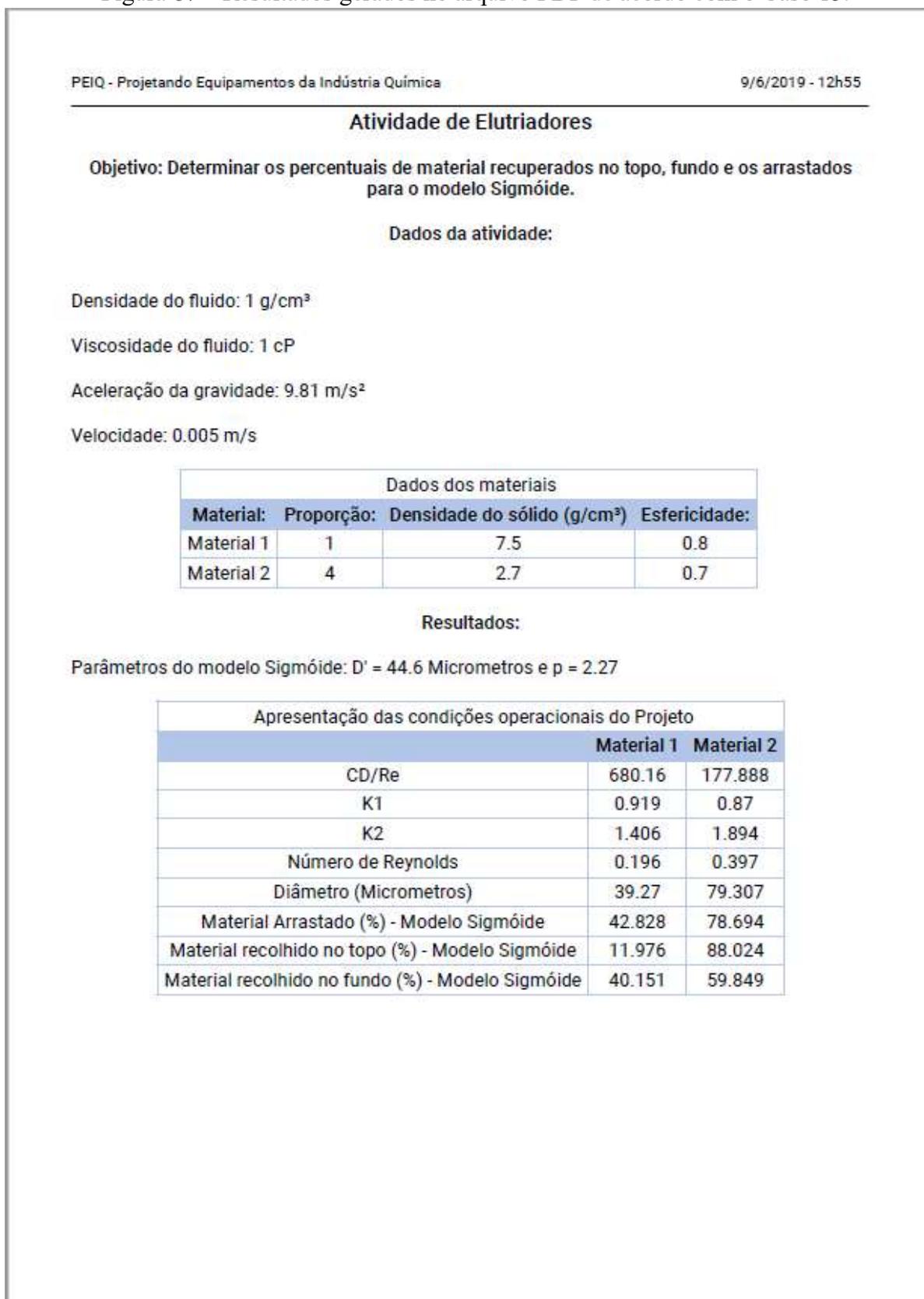


Continuação da Figura 86 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 14.

Apresentação das condições operacionais do Projeto		
	Material 1	Material 2
CD/Re	680.16	177.888
K1	0.919	0.87
K2	1.406	1.894
Número de Reynolds	0.196	0.397
Diâmetro (Micrometros)	39.27	79.307
Material Arrastado (%) - Modelo RRB	39.715	78.665
Material recolhido no topo (%) - Modelo RRB	11.207	88.793
Material recolhido no fundo (%) - Modelo RRB	41.397	58.603
Material Arrastado (%) - Modelo GGS	37.035	80.372
Material recolhido no topo (%) - Modelo GGS	10.33	89.67
Material recolhido no fundo (%) - Modelo GGS	44.505	55.495
Material Arrastado (%) - Modelo Sigmóide	42.604	78.482
Material recolhido no topo (%) - Modelo Sigmóide	11.95	88.05
Material recolhido no fundo (%) - Modelo Sigmóide	40.006	59.994

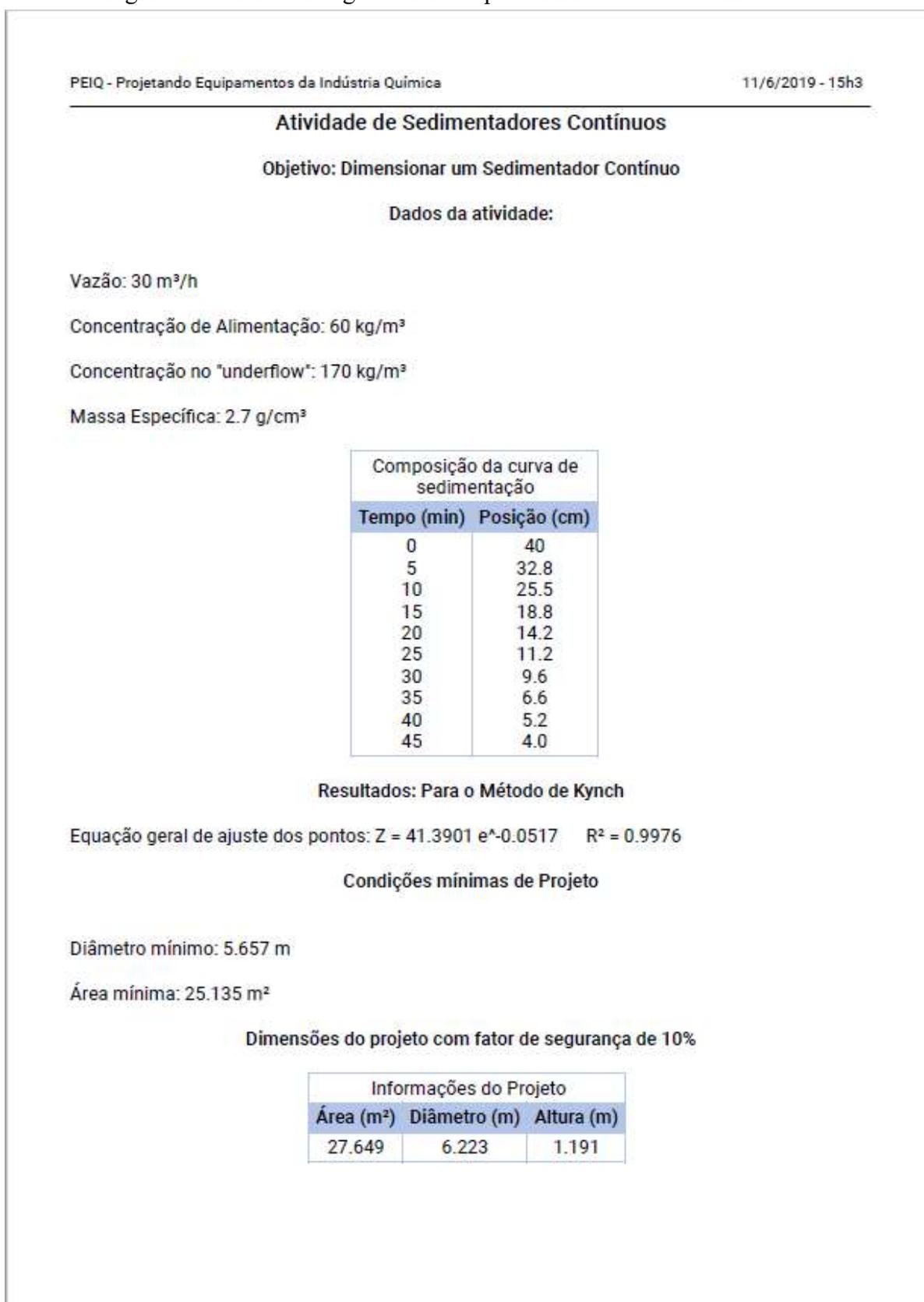
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 87 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 15.



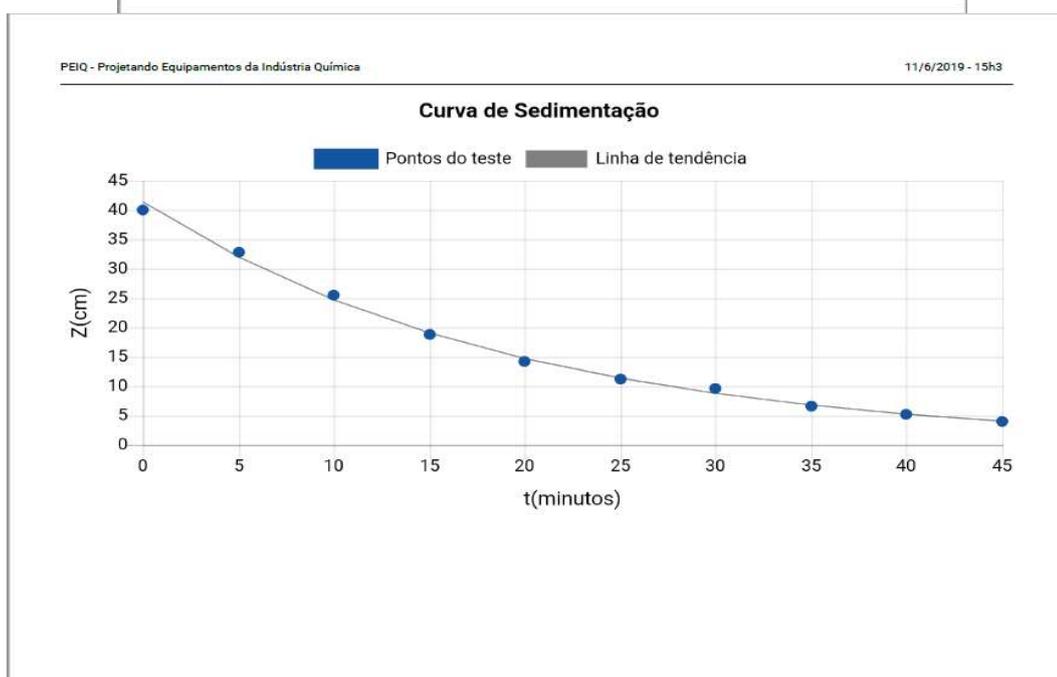
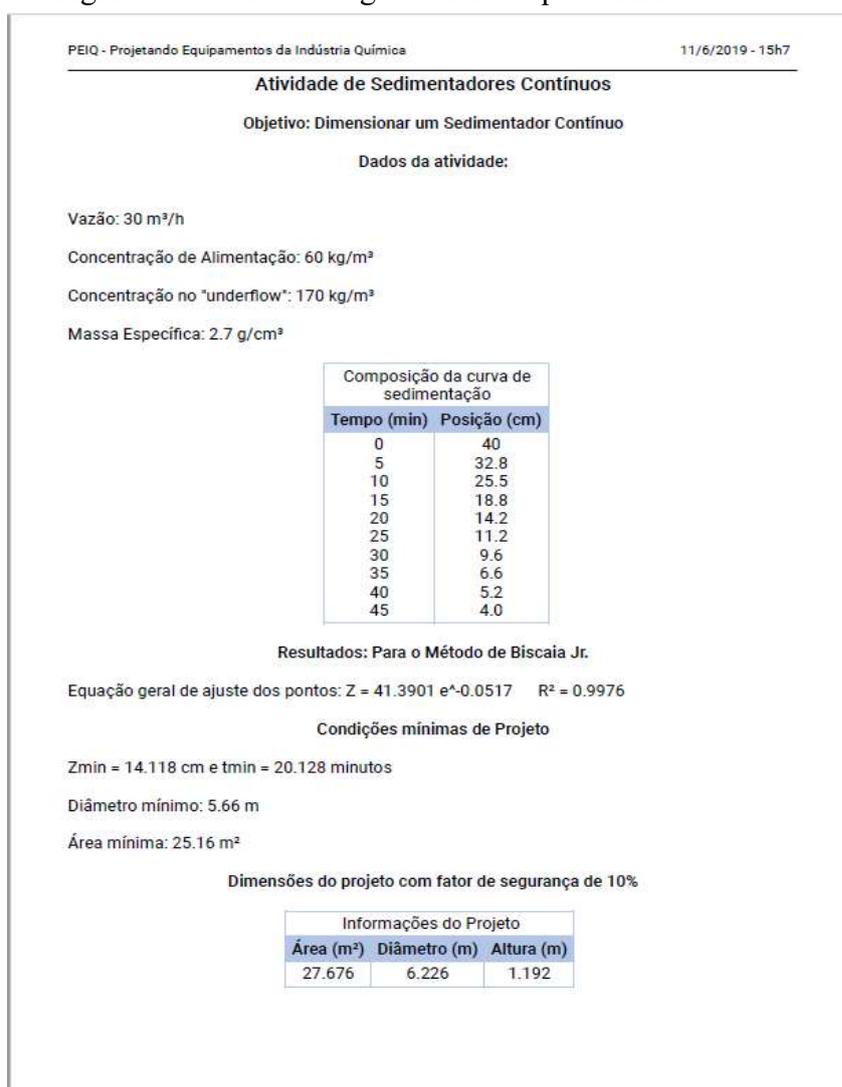
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 88 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 16.



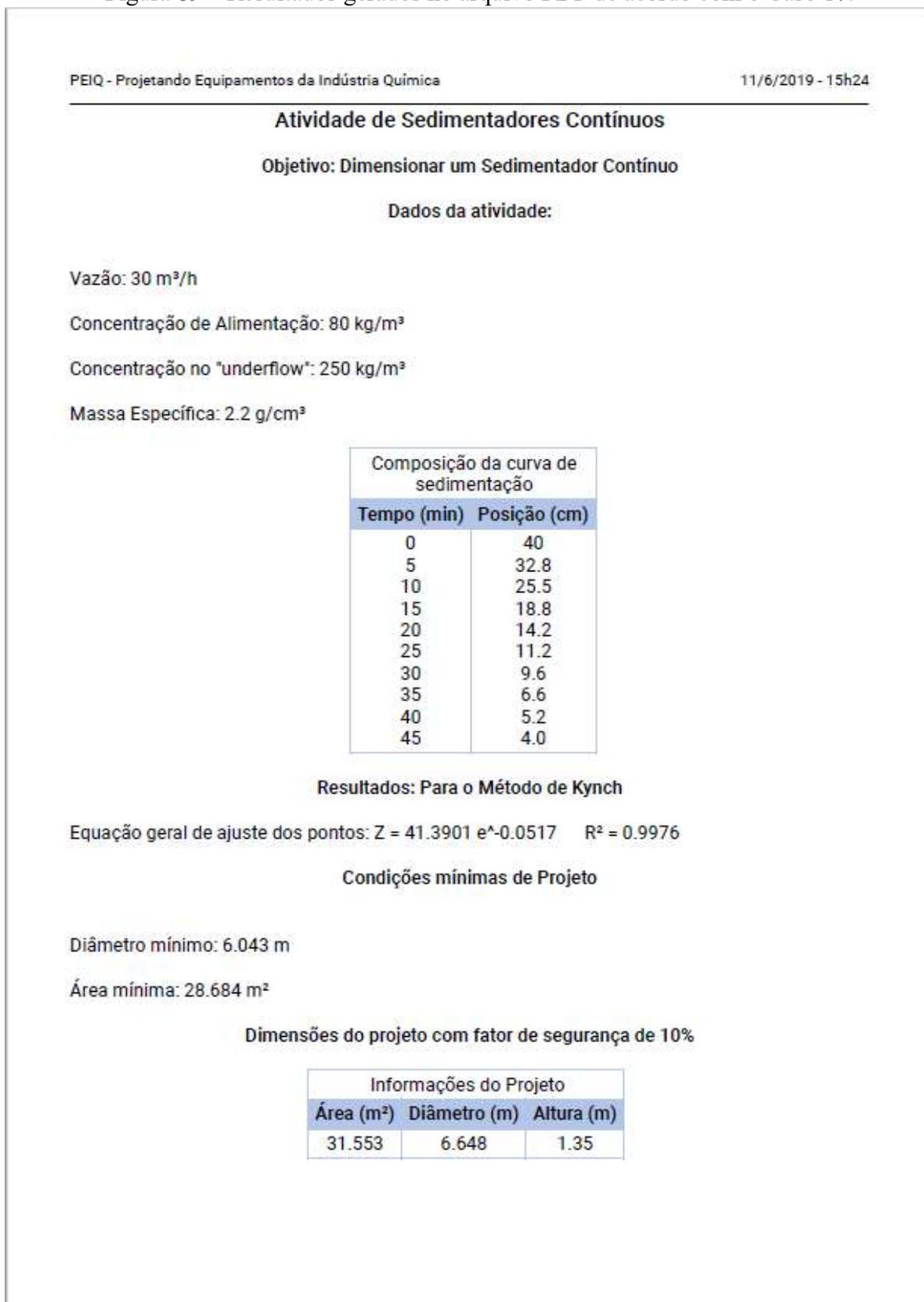
Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 88 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 16.



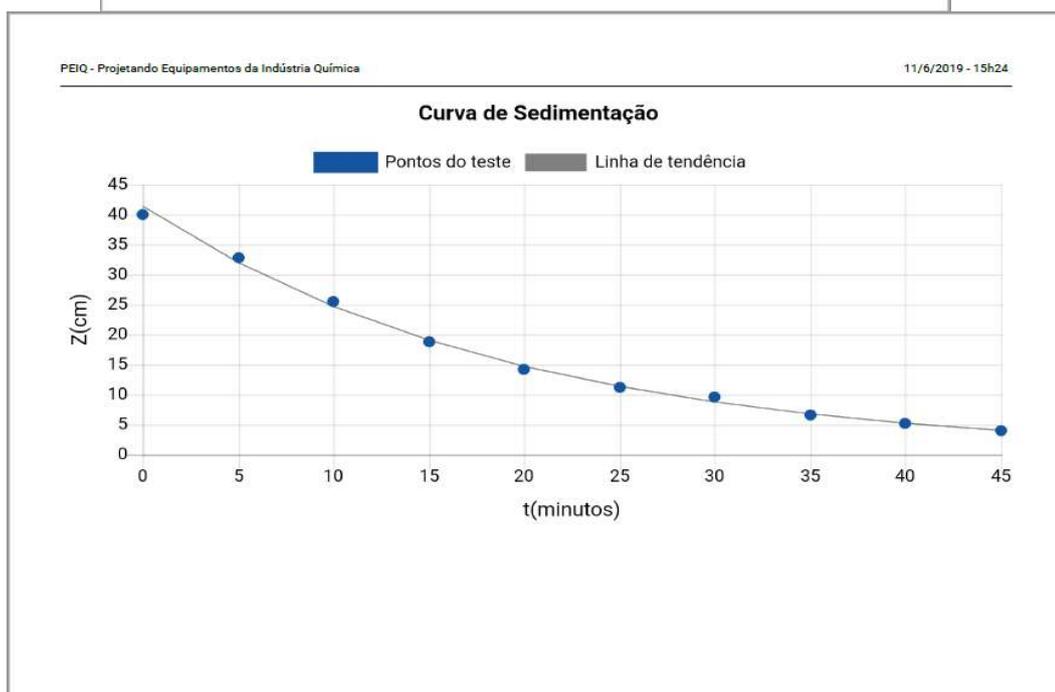
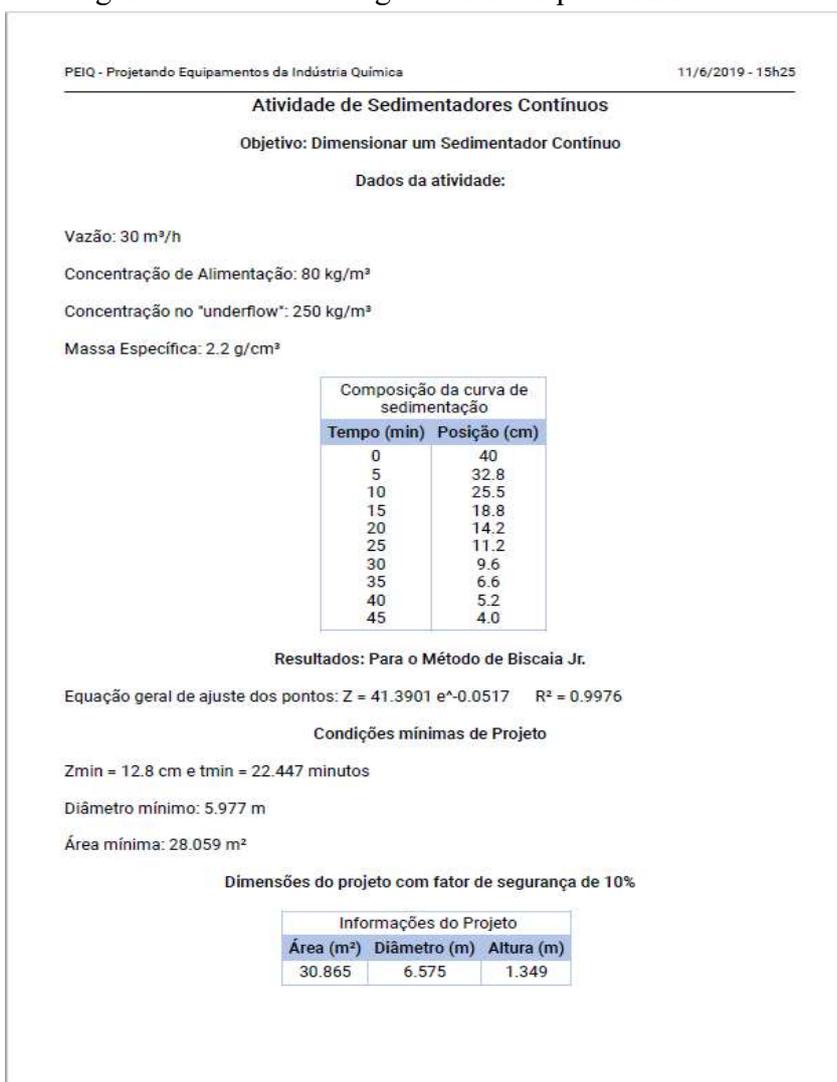
Fonte: Da Autora (2019).

Figura 89 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 17.



Fonte: Da Autora (2019).

Continuação da Figura 89 – Resultados gerados no arquivo PDF de acordo com o Caso 17.



Fonte: Da Autora (2019).

ANEXO I

Dado um conjunto de informações da granulometria de partículas para obter a equação de 2º grau pelo método dos Mínimos Quadrados e aplicando a Eliminação de Gauss.

Modelo: $Ax + Bx^2 + C = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} nC + B \sum x + A \sum x^2 = \sum y \\ C \sum x + B \sum x^2 + A \sum x^3 = \sum xy \\ C \sum x^2 + B \sum x^3 + A \sum x^4 = \sum x^2 y \end{array} \right.$$

Onde n é o número de pontos, x = diâmetros e y = quantidade de material retido

Resolvendo o sistema, tem-se:

$$\begin{pmatrix} N & \sum x & \sum x^2 \\ \sum x & \sum x^2 & \sum x^3 \\ \sum x^2 & \sum x^3 & \sum x^4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y \\ \sum xy \\ \sum x^2 y \end{pmatrix}$$

Aplicando método de Eliminação de Gauss, obtêm-se o segundo resultado

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{\sum x}{n} & \frac{\sum x^2}{n} \\ 0 & 1 & \frac{\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum y}{n} \\ \frac{\sum xy - \frac{\sum y \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \\ \frac{\sum x^2 y - \left(\frac{\sum xy - \frac{\sum y \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \right) * \left(\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n} \right)}{\left(\sum x^4 - \frac{\sum x^2 \sum x^2}{n} \right) - \left(\frac{\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \right) * \left(\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n} \right)} \end{pmatrix}$$

Logo,

$$A = \frac{\sum x^2 y - \left(\frac{\sum xy - \frac{\sum y \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \right) * \left(\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n} \right)}{\left(\sum x^4 - \frac{\sum x^2 \sum x^2}{n} \right) - \left(\frac{\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \right) * \left(\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n} \right)}$$

$$B = \frac{\sum xy - \frac{\sum y \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} - A \frac{\sum x^3 - \frac{\sum x^2 \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}}$$

$$C = \frac{\sum y}{n} - B \frac{\sum x}{n} - A \frac{\sum x^2}{n}$$

ANEXO II

Para a obtenção de uma equação exponencial, considere o modelo de equação exponencial, tal como e sua forma linearizada:

$$y = B e^{Ax}$$

$$\ln y = \ln B + Ax$$

A partir da forma linearizada, adotou-se $y' = \ln y$ e n como sendo o número de pontos amostrados, o sistema fica:

$$\left\{ \begin{array}{l} nB + A \sum x = \sum y' \\ \sum x + \sum x^2 = \sum x y' \end{array} \right.$$

$$\begin{pmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y' \\ \sum x y' \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{\sum x}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum y'}{n} \\ \frac{\sum x y' - \frac{\sum y' \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \end{pmatrix}$$

Portanto,

$$A = \frac{\sum x y' - \frac{\sum y' \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}}$$

$$B = e^{\left(\frac{\sum y'}{n} - A \frac{\sum x}{n}\right)}$$

ANEXO III

Para trabalhar com dados que segue característica linear, ou seja, o modelo

$$Ax + B = 0$$

Seguindo o mesmo raciocínio de Eliminação de Gauss, o método dos mínimos quadrados, o sistema segue abaixo

$$\begin{cases} nB + A \sum x = \sum y \\ B \sum x + A \sum x^2 = \sum xy \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} n & \sum x \\ \sum x & \sum x^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y \\ \sum xy \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 1 & \frac{\sum x}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sum y}{n} \\ \frac{\sum xy - \frac{\sum y \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}} \end{pmatrix}$$

Assim sendo,

$$A = \frac{\sum xy - \frac{\sum y \sum x}{n}}{\sum x^2 - \frac{\sum x \sum x}{n}}$$

$$B = \frac{\sum y}{n} - A \frac{\sum x}{n}$$

ANEXO IV

A variância, também chamado de R^2 pode ser calculada conforme equações abaixo:

- Equação de 2º grau:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum y^2 - C \sum y - B \sum xy - A \sum x^2 y}{\sum y^2 - \frac{\sum y \sum y}{n}}$$

- Equação Exponencial ($y = \ln y$):

$$R^2 = \frac{(n \sum xy' - \sum x \sum y')^2}{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y'^2 - (\sum y')^2]}$$

- Equação Linear:

$$R^2 = \frac{(n \sum xy - \sum x \sum y)^2}{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}$$