

Engenharias, Ciência e Tecnologia 2

**Luís Fernando Paulista Cotian
(Organizador)**



Atena
Editora

Ano 2019

Luís Fernando Paulista Cotian

(Organizador)

Engenharias, Ciência e Tecnologia

2

Atena Editora

2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 2 [recurso eletrônico] / Organizador
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-085-8

DOI 10.22533/at.ed.858193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de
responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos
autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume II apresenta, em seus 15 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão de Resíduos relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Gestão de Recursos Naturais, Produção mais Limpa e Ecoeficiência e Gestão de Resíduos Industriais e Prevenção de Poluição.

As áreas temáticas de Gestão de Resíduos relacionadas tratam de temas relevantes para a prevenção de poluição. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão de Resíduos e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
AVALIAÇÃO DA ADSORÇÃO COM CARVÃO VEGETAL PARA A PURIFICAÇÃO DE BODIESEL OBTIDO A PARTIR DE ÓLEOS DE MILHO	
<i>Maria Carolina Sérgi Gomes</i>	
<i>Juliana Guerra Sgorlon</i>	
<i>Maraísa Lopes de Menezes</i>	
<i>Vassula Belinato Paiva</i>	
<i>Fernanda Nunes de Proença</i>	
<i>Mariane Borges Gheller</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8581931011	
CAPÍTULO 2	11
AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DO BAGAÇO DE MALTE SOBRE A ADSORÇÃO DO CORANTE DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO COLUNA DE LEITO FIXO	
<i>Jordana Benfíca Silva</i>	
<i>Heitor Otacílio Nogueira Altino</i>	
<i>Renata Nepomuceno da Cunha</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8581931012	
CAPÍTULO 3	18
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE PARTICULADO NA QUEDA DE PRESSÃO DE UM CICLONE LAPPLE	
<i>Rosilanny Soares Carvalho</i>	
<i>Daiane Ribeiro Dias</i>	
<i>João Carlos Gonçalves</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8581931013	
CAPÍTULO 4	30
AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS: SEDIM 2.0	
<i>Roberta de Almeida Costa Campeão</i>	
<i>Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8581931014	
CAPÍTULO 5	38
AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE UM CICLONE ADAPTADO COM BOCAIS ATOMIZADORES DE ÁGUA PARA COLETAR MATERIAL PARTICULADO PROVENIENTE DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	
<i>Ana Elisa Achilles</i>	
<i>Vádila Giovana Guerra Béttega</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8581931015	
CAPÍTULO 6	55
DESEMPENHO DE FILTRO TIPO BOLSA PARA SEPARAÇÃO DE RESÍDUOS DE HERBICIDAS	
<i>Daniela Teixeira Chaves</i>	
<i>José Roberto Delalibera Finzer</i>	
DOI 10.22533/at.ed.8581931016	

CAPÍTULO 7 71

DISTRIBUIÇÃO DE CHUMBO TOTAL EM AMOSTRAS DE SEDIMENTOS E SUBSTÂNCIAS HÚMICAS EXTRAÍDAS DE SEDIMENTOS COLETADOS EM MANANCIAS COM DIFERENTES TIPOS DE ÁGUA DA BACIA AMAZÔNICA

Tania Machado da Silva
Bruno Cesar Prior Rocha
Wilyane Silva Figueiredo
Luiz Fabrício Zara
Gustavo Rocha de Castro
André Henrique Rosa

DOI 10.22533/at.ed.8581931017

CAPÍTULO 8 87

ESTUDO DAS CONDIÇÕES PARA A SÍNTESE DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE ABACATE E PEROVSKITA RESIDUAL ($Ca_2Fe_2O_5$)

Rondinele Aberto dos Reis Ferreira
Juarez Hilleshein Júnior
Priscila Pereira Silva

DOI 10.22533/at.ed.8581931018

CAPÍTULO 9 102

ESTUDO DE CASO EM OBRA NA CIDADE DE MACEIÓ: PROPOSTA PARA MELHORIA NO DESTINO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Kelliany Medeiros Costa
José Leandro da Silva Duarte
Carmem Lúcia de Paiva e Silva Zanta

DOI 10.22533/at.ed.8581931019

CAPÍTULO 10 112

COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE VELOCIDADE DE SEDIMENTAÇÃO APLICADOS EM EMULSÕES A/O MONODIPERSAS

Lucas Henrique Pagoto Deoclecio
Ana Paula Meneguelo
Daniel Cunha Ribeiro

DOI 10.22533/at.ed.85819310110

CAPÍTULO 11 128

POTÊNCIA NECESSÁRIA AO RALEAMENTO DA VEGETAÇÃO NO SEMIÁRIDO

Márcio Waltzer Timm
Antônio Lilles Tavares Machado
Roberto Lilles Tavares Machado
Rafael Gonçalves Tonucci

DOI 10.22533/at.ed.85819310111

CAPÍTULO 12 137

SANEAMENTO: EVOLUÇÃO DAS OBRAS DE INFRAESTRUTURA E MELHORIA DA QUALIDADE DE VIDA DO BAIRRO PARAVIANA EM BOA VISTA/RR

Francilene Cardoso Alves Fortes
Emerson Lopes de Amorim
Iury Costa Aragão
Thiago Barreto Tavares
Cleiton Leandro Santana
Maikon Barros de Lima

DOI 10.22533/at.ed.85819310112

CAPÍTULO 13	152
SANEAMENTO: IMPLICAÇÕES E EXECUÇÕES NAS OBRAS DE SANEAMENTO BÁSICO NO BAIRRO CINTURÃO VERDE NO MUNICÍPIO DE BOA VISTA/RR	
<i>Francilene Cardoso Alves Fortes</i>	
<i>Emerson Lopes de Amorim</i>	
<i>Simone Vieira Vaz</i>	
<i>Geislani da Luz Araujo</i>	
<i>Numeriano Dantas de Medeiros</i>	
<i>Fabio Rodrigues de Jesus</i>	
DOI 10.22533/at.ed.85819310113	
CAPÍTULO 14	166
SINTONIA ÓTIMA DO CONTROLADOR PID APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK	
<i>Rhonei Patric dos Santos</i>	
<i>Lucas Sampaio Garcia</i>	
DOI 10.22533/at.ed.85819310114	
CAPÍTULO 15	178
APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DO CAROÇO DE AZEITONA PARA A PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO	
<i>Luíza Silveira Cabral</i>	
<i>Manoela Silva Lima Mariotini Carotta</i>	
<i>Érica Vieira Barbosa</i>	
<i>Juliana Fusco Pachani dos Santos</i>	
<i>Ana Carla Pinheiro Lima</i>	
<i>Cristiane de Souza Siqueira Pereira</i>	
DOI 10.22533/at.ed.85819310115	
SOBRE O ORGANIZADOR	189

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DE UM CICLONE ADAPTADO COM BOCAIS ATOMIZADORES DE ÁGUA PARA COLETAR MATERIAL PARTICULADO PROVENIENTE DA QUEIMA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Ana Elisa Achilles

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Engenharia Química

*e-mail: anaachiles@hotmail.com

Vádila Giovana Guerra Béttega

Universidade Federal de São Carlos,
Departamento de Engenharia Química

*e-mail: anaachiles@hotmail.com

RESUMO: O Brasil é um dos líderes na produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar. Contudo, para suprir as demandas energéticas do setor, esse bagaço é utilizado como combustível e sua queima gera uma quantidade significativa de materiais particulados que são altamente nocivos à saúde humana. Assim, visando controlar a emissão desse poluente, faz-se necessário utilizar equipamentos eficientes para tratamento de gás. Dessa forma, este trabalho investigou o desempenho de um ciclone adaptado com bocais atomizadores de água para remover material particulado, composto por cinzas, oriundas da queima do bagaço da cana, de diâmetro volumétrico mediano de 7,47 μm . Nos testes foram avaliadas a eficiência global de coleta e a queda de pressão. Os experimentos foram conduzidos em três condições distintas, variando a velocidade do ar na entrada do ciclone, a concentração de pó na alimentação e as razões líquido-gás

(L/G). O estudo demonstrou que atomizar água no interior do ciclone aumenta sua eficiência global de separação quando comparada com sua operação a seco, sem prejudicar sua queda de pressão, elevando sua eficiência de 81 para 95%, com a utilização de uma L/G de 0,10 L/m³ e diminuindo, ligeiramente, sua queda de pressão.

PALAVRAS-CHAVE: Ciclone, Lavador de Gás, Material Particulado, Poluição do Ar

ABSTRACT: Brazil is one of the leaders in the production of sugar and ethanol from sugarcane. However, in order to supply the energy demands of the industry, the bagasse is used as a fuel and its burning generates a significant amount of particulate matter that is highly harmful to human health. Thus, to control the emission of this pollutant, it is necessary to use efficient equipments for gas treatment. Therefore, this work aims to investigate the performance of a cyclone adapted with water spray nozzles to remove particulate matter, composed of ash resulting from the burning of sugarcane bagasse, which has a median volume diameter of 7.47 μm . In the tests, the overall collection efficiency and pressure drop were evaluated. The experiments were conducted under three different conditions, varying the velocity of the air at the cyclone inlet, the concentration of powder in the feed and the liquid-gas (L/G)

ratios. The study showed that atomizing water inside the cyclone increases its overall separation efficiency when compared to its dry operation, without affecting its pressure drop, increasing its efficiency from 81 to 95%, using a L/G of 0,10 L/m³ and slightly decreasing its pressure drop.

KEYWORDS: Cyclone, Gas Scrubber, Particulate Matter, Air Pollution

INTRODUÇÃO

A degradação ambiental, aliada ao fato das fontes de combustíveis fósseis serem finitas, fez com que as fontes de energia renováveis e mais limpas ganhassem mais espaço no cenário mundial, em especial aquelas provenientes da biomassa. De acordo com a UNICA (2017), a biomassa foi a segunda fonte de geração energética mais importante na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) em 2016, destacando-se a energia oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar, a qual contribuiu com 67% desta parcela, evidenciando o potencial produtivo e energético do setor sucroalcooleiro no Brasil.

Dessa forma, para tornar a produção deste segmento industrial economicamente viável, faz-se necessária a aplicação de um sistema para suprir a demanda energética do processo, denominado por cogeração energética, no qual o bagaço da cana-de-açúcar é utilizado como combustível, em caldeiras de biomassa, com o propósito de gerar energia elétrica e formas usuais de energia térmica (Clementino, 2011).

Todavia, como efeito negativo, a queima do bagaço da cana-de-açúcar é responsável por gerar diversos poluentes gasosos, sendo que a maior parte destes consiste em materiais particulados (Cheng, 2009). Assim, visando controlar a emissão de material particulado, é imprescindível a utilização de equipamentos habilitados em tratamento de gás, como por exemplo, os ciclones e os lavadores de gás.

Os ciclones são equipamentos estáticos que empregam a força centrífuga a fim de separar a fase densa de um fluxo bifásico (Momenzadeh e Moghimann, 2010). Com isso, são largamente utilizados para coletar partículas sólidas de correntes gasosas em diversos processos industriais em virtude de sua construção ser relativamente simples; apresentar baixos custos de manutenção e ausência de partes móveis; além de ser capacitado para operar em ambientes corrosivos (Brar *et al.*, 2015). No entanto, estes dispositivos possuem como desvantagem uma baixa eficiência de coleta para partículas menores que, aproximadamente, 5 µm (Ioziá e Leith, 1989).

Já com relação aos lavadores de gás, embora uma de suas vantagens seja remover, com alta eficiência, partículas finas; estes são caracterizados por gerar um efluente líquido contendo todo o material coletado e, geralmente, possuem um maior custo de operação quando comparado com os ciclones convencionais (Lora, 2002).

Diante das desvantagens apresentadas pelo uso dos ciclones convencionais e das limitações oferecidas pelos lavadores de gás, surge então a concepção do ciclone

úmido. Este equipamento consiste em um separador ciclônico convencional adaptado com bocais atomizadores de líquido, usualmente a água, utilizados para promover um aumento da eficiência de coleta de partículas finas. Dessa forma, o ciclone úmido combina as vantagens de um ciclone convencional: construção relativamente simples, baixo custo de investimento e alta confiabilidade; com os benefícios de um lavador de gás, como a alta eficiência de coleta para material particulado de diâmetros da ordem de submicron (Krames e Büttner, 1994).

Segundo Yang e Yoshida (2004), o desempenho do ciclone úmido vai depender fortemente do método de injeção do líquido no interior do equipamento, das dimensões das gotas formadas, bem como da distribuição do fluxo e do momento inicial do líquido. Dessa maneira, diversos pesquisadores vêm conduzindo pesquisas a fim de avaliar o desempenho do ciclone úmido na coleta de materiais particulados alterando estas variáveis, como demonstrados pelos estudos de Krames e Büttner (1994); Yang e Yoshida (2004); Majewski (2006); Lee *et al.* (2008); Chiabai Junior (2014) e Alves (2017).

Com isso, este estudo visa investigar o desempenho de um ciclone adaptado com bocais atomizadores de água para a coleta de materiais particulados (MP) finos gerados pela queima do bagaço da cana-de-açúcar por meio da utilização de baixas razões líquido-gás (L/G) e compará-lo com o do ciclone operando a seco sob as mesmas condições experimentais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O esquema simplificado do aparato experimental utilizado na realização dos testes experimentais pode ser visualizado na Figura 1.

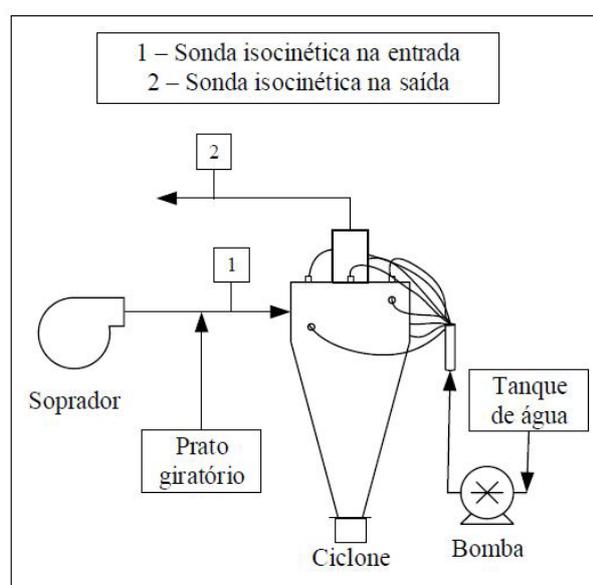


Figura 1: Aparato experimental.

Neste sistema, a corrente gasosa contendo apenas ar limpo foi alimentada através de um soprador e o material particulado por meio de um prato giratório, o qual tinha a sua velocidade de rotação controlada por um variador de velocidade e utilizava ar comprimido para arrastar o pó. Dessa maneira, o gás contendo partículas sólidas era direcionado para um ciclone do tipo Stairmand (1951) adaptado com bocais injetores de água. A alimentação de água foi realizada a partir de uma bomba de deslocamento positivo, a qual transportava a água contida em um tanque de água para os bocais conectados na parede do ciclone. Após a passagem pelo ciclone, a maior parte do material particulado mais a água injetada pelos bocais (quando o equipamento era operado a úmido) eram coletadas na parte inferior do ciclone em uma caixa coletora, enquanto que o ar limpo e uma pequena parcela de material particulado não coletada fluíam pela saída de topo conectada a um duto de saída. A concentração de material particulado contida na corrente gasosa foi medida tanto no duto de entrada quanto no de saída, simultaneamente, a fim de calcular a eficiência global do ciclone. Para efetuar esta aferição, foi coletada, isocineticamente, uma amostragem do pó de entrada (1) e de saída (2) por meio de sondas isocinéticas posicionadas no centro desses dutos de forma contrária ao sentido da corrente gasosa. As bases das sondas foram conectadas a membranas coletoras, as quais estavam contidas em suportes para onde o material particulado era arrastado e, posteriormente, coletado.

O ciclone empregado na realização dos testes experimentais é classificado como ciclone de entrada tangencial e fluxo reverso e suas configurações geométricas foram estabelecidas por Stairmand (1951). Além disso, com o propósito de aumentar a eficiência de coleta deste equipamento, foram adicionados oito bocais pulverizadores de água dispostos ao longo da sua parede. As Figuras 2 e 3 apresentam o ciclone utilizado nos experimentos com suas dimensões (em mm) e a disposição dos bocais injetores de água na parede do mesmo, respectivamente.

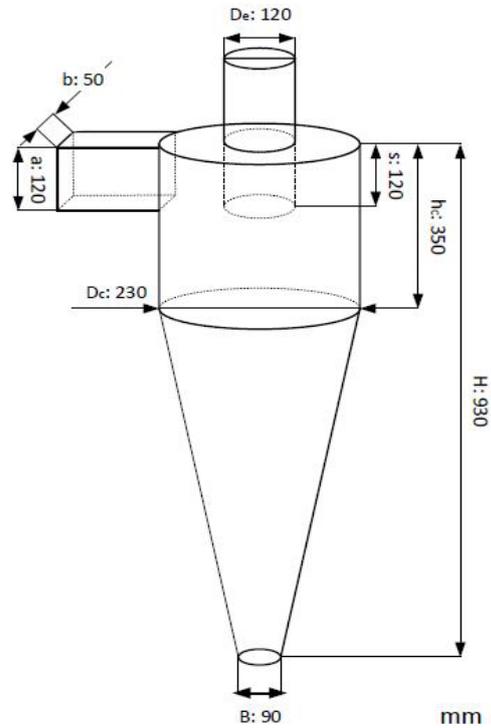


Figura 2: Ciclone experimental (em mm).

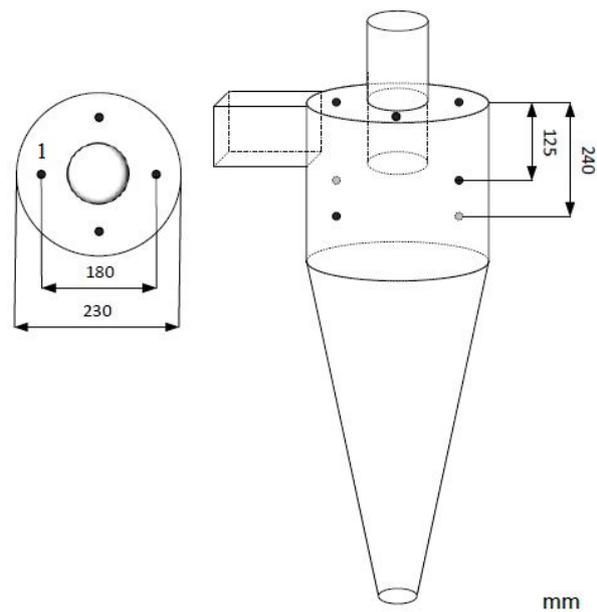


Figura 3: Disposição dos bocais (em mm).

Para a realização dos testes experimentais a úmido, foi utilizado apenas o bocal pulverizador 1, localizado na parede superior do corpo cilíndrico do ciclone perpendicular à entrada do gás no equipamento, como indicado na Figura 3.

Parâmetros Operacionais

A Tabela 1 exibe os parâmetros operacionais empregados neste estudo para o ciclone operando no modo seco.

Condição experimental	Vazão de gás Q_g (m ³ /min)	Velocidade de entrada no ciclone (m/s)	Concentração de MP na entrada (g/m ³)
1	4,89	13,57	0,42
2	3,88	10,71	0,49
3	2,89	8,02	0,66

Tabela 1: Parâmetros operacionais para o ciclone operando a seco.

Já para o ciclone operando a úmido, as condições experimentais apresentadas na Tabela 1 se mantiveram constantes. No entanto, adicionou-se no sistema, através do bocal pulverizador 1, uma vazão constante de água de 0,47 L/min. Com isso, as razões L/G para cada condição experimental estão apresentadas na Tabela 2.

Condição experimental	L/G (L/m ³)
1	0,10
2	0,12
3	0,16

Tabela 2: Razões líquido-gás (L/G) para o ciclone operando a úmido para cada condição experimental.

Material Particulado

O material particulado utilizado nos testes experimentais consistia de cinzas provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar, adquiridas em uma usina localizada no Estado de São Paulo. A determinação da distribuição volumétrica granulométrica e da densidade deste material particulado foi realizada por meio do equipamento Malvern Mastersize Microplus e de um picnômetro de gás Hélio, respectivamente.

Bocais Atomizadores

Os bocais empregados neste trabalho são classificados por serem atomizadores de pressão, ou seja, aqueles que convertem a pressão de um fluido em energia cinética (Lefebvre, 1989), sendo do tipo *pressure swirl*, no qual o líquido deixa o orifício na forma de um cone oco produzindo gotas uniformemente atomizadas. Estes dispositivos foram confeccionados com núcleos de cerâmica técnica, o que permite uma elevada resistência para todos os tipos de produtos químicos e alta precisão da taxa de vazão, e produz cones ocas com uma angulação de 90°.

A fim de caracterizar a distribuição do tamanho das gotas geradas, fez-se o uso do analisador de partículas Malvern Spraytech, o qual utiliza a técnica de difração de

raios laser, como mostrado na Figura 4.

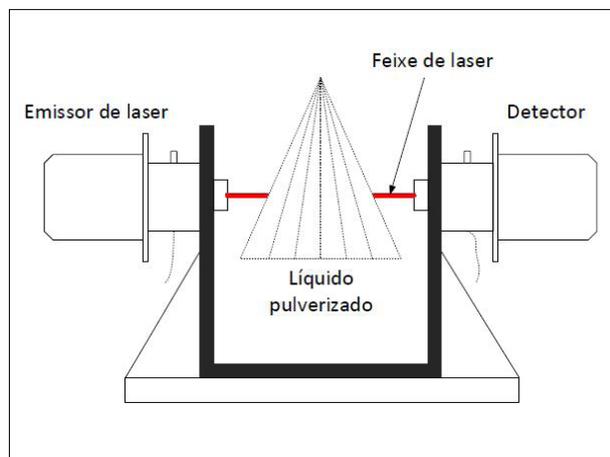


Figura 4: Esquema do Malvern Spraytech.

Neste equipamento, a luz laser é gerada através de um gerador Hélio-Neon de 3mW de potência. O feixe de luz é expandido por uma lente e, ao passar pelo spray pulverizador, parte de sua energia luminosa é difratada com ângulos distintos, sendo possível assim obter a distribuição de tamanho de gotas proporcionada pelo bocal, já que o ângulo de difração é inversamente proporcional ao tamanho da gota (Guerra, 2009). Em seguida, a luz passa por uma lente de Fourier, a qual é responsável por direcionar os raios de mesma angulação sobre um mesmo ponto no plano focal. Dessa forma, conhecendo-se esse ponto de convergência, é possível determinar o ângulo de difração e, conseqüentemente, o tamanho das gotas que ocasionaram essa difração. No detector, há um conjunto de 31 semianéis concêntricos os quais, por serem constituídos por um material fotossensível, têm a função de converter a energia luminosa que incide sobre cada semianel em uma corrente elétrica. Esta corrente gera um sinal analógico que é convertido em sinal digital antes de ser enviado a um computador de aquisição de dados. Por fim, com um programa adequado, o qual utiliza equações desenvolvidas por Swithenbank (1976), os sinais digitais são convertidos em uma distribuição de tamanho de gotas.

A caracterização do tamanho das gotas geradas pelos bocais empregados neste estudo foi efetuada de acordo com o esquema representado na Figura 5.

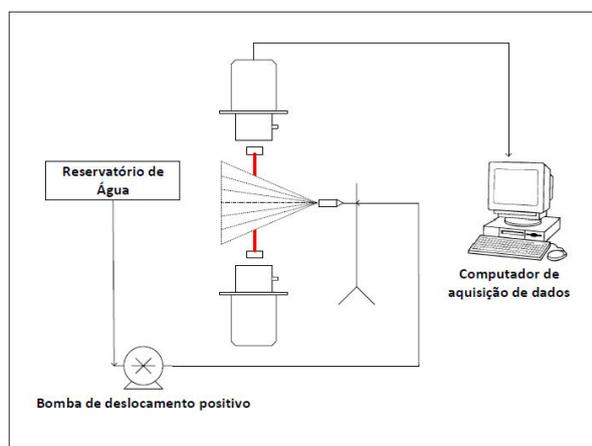


Figura 5: Esquema para caracterizar a distribuição do tamanho das gotas.

Neste sistema, o bocal atomizador foi acoplado a um suporte, o qual foi posicionado de modo que o feixe de laser incidisse no centro do cone de gotas atomizadas formado pelo spray. Assim, utilizando uma bomba de deslocamento positivo e um controlador de fluxo de água, foi possível promover a atomização das gotas com a vazão requerida pelo trabalho. A distribuição do tamanho das gotas foi obtida com o bocal situado em três distâncias diferentes em relação ao feixe de laser: 5, 15 e 30 cm, com o intuito de verificar o comportamento do tamanho das gotas à medida que o líquido pulverizado se afastava do orifício do bocal.

PERFIL DE VELOCIDADE

A determinação do perfil de velocidade do gás se deu nos dutos de entrada e de saída, por meio de um tubo de Pitot acoplado a um manômetro digital, nos locais onde foram realizadas as amostragens isocinéticas, uma vez que para efetuar uma amostragem isocinética representativa de uma corrente gasosa com material particulado em dutos fechados, deve-se verificar se o fluxo de gás está uniforme (Costa, 1998). Além disso, foi necessário verificar a uniformidade do fluxo gasoso no duto onde a pressão estática de saída foi aferida a fim de se garantir que o mesmo estivesse estabilizado.

EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA

De forma simplificada, a eficiência de coleta global é definida como sendo a razão entre a concentração de massa de sólidos coletados e a concentração mássica de sólidos alimentados no interior do ciclone, expressa pela Equação 1.

$$\eta = \frac{C_i - C_o}{C_i} \quad (1)$$

Sendo C_i e C_o as concentrações das partículas na corrente gasosa de entrada e de saída.

Para realizar a aferição da concentração do pó na corrente gasosa, utilizou-se o método da amostragem isocinética, o qual consiste em reter materiais particulados de uma corrente gasosa por meio de uma sonda e é realizada em condições tais que o fluxo de gás no bocal da sonda tenha a mesma velocidade que a vazão de gás que se pretende analisar (NBR 12019, 1990).

O sistema de amostragem isocinética era constituído por duas sondas metálicas em L, bombas de sucção para efetuar a coleta do material particulado nos dutos de entrada e de saída do equipamento, rotâmetros para controlar a vazão das bombas e suportes contendo membranas coletoras.

As membranas utilizadas para coletar o material particulado eram compostas por acetato de celulose e possuíam 47 mm de diâmetro e uma porosidade de 0,8 μm . As massas das membranas foram medidas antes e após a coleta do material particulado.

Com o propósito de manter a velocidade nos bocais das sondas de forma isocinética, as vazões das bombas de sucção foram controladas através de rotâmetros e suas vazões de operação foram determinadas fazendo-se o uso da Equação 2.

$$Q_b = \frac{\pi d_{bs}^2}{4} v_g \quad (2)$$

Em que Q_b corresponde à vazão de sucção da bomba; d_{bs} ao diâmetro do bocal da sonda e v_g à velocidade do gás no ponto de aferição.

Finalmente, para obter a concentração de material particulado tanto na entrada quanto na saída do ciclone, utilizou-se a Equação 3.

$$C_{i,o} = \frac{m_{i,o}}{Q_b t_a} \quad (3)$$

Na qual $m_{i,o}$ é a massa de material particulado retida na entrada e na saída do equipamento e t_a é o tempo de amostragem.

Queda de Pressão

A perda de carga (ΔP) no ciclone é determinada pela diferença entre a pressão estática no duto de entrada e no duto de saída conforme a Equação 4.

$$\Delta P = P_i - P_o \quad (4)$$

Em que P_i e P_o correspondem às pressões estáticas nos dutos de entrada e de saída, respectivamente.

Dessa maneira, a fim de determinar a queda de pressão oferecida pelo ciclone em operação, foi aferida a diferença entre as pressões estáticas de entrada e de saída no equipamento para todas as condições experimentais com o auxílio de um manômetro em U. A pressão estática de entrada foi medida logo na entrada do ciclone. Já a pressão estática de saída foi aferida no duto de saída em um local onde o fluxo gasoso estivesse estabilizado.

Os resultados de queda de pressão obtidos foram comparados com os valores teóricos propostos pela correlação de Shepherd e Lapple (1939), a qual está expressa pela Equação 5.

$$\Delta P = 8\rho_G v_i \left(\frac{ab}{D_e^2} \right) \quad (5)$$

Na qual ρ_g é a densidade do gás; v_i é a velocidade da corrente gasosa na entrada do ciclone; e os parâmetros a , b e D_e são as dimensões geométricas do ciclone demonstradas na Figura 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do Material Particulado

A Figura 6 mostra a curva de frequência cumulativa volumétrica das cinzas utilizadas nos testes experimentais.

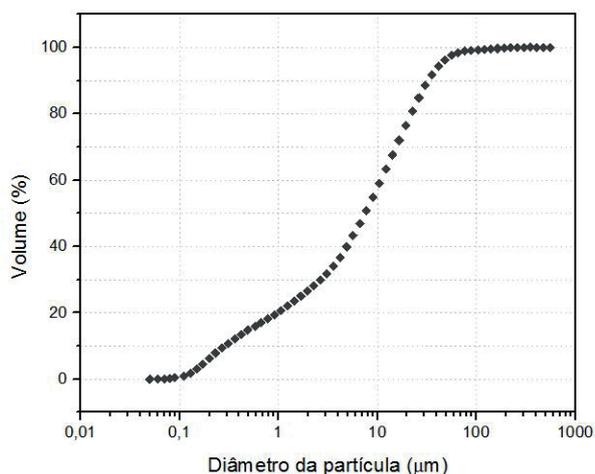


Figura 6: Frequência cumulativa volumétrica do material particulado.

O diâmetro mediano volumétrico (d_{p50}) das cinzas foi de $7,47 \mu\text{m}$ e a densidade obtida foi de $2,51 \text{ g/cm}^3$.

CARACTERIZAÇÃO DOS BOCAIS ATOMIZADORES

A distribuição da frequência volumétrica do tamanho das gotas geradas com o bocal atomizador localizado a 5 cm do feixe de laser e com uma vazão de 0,40 L/min de água está contida na Figura 7.

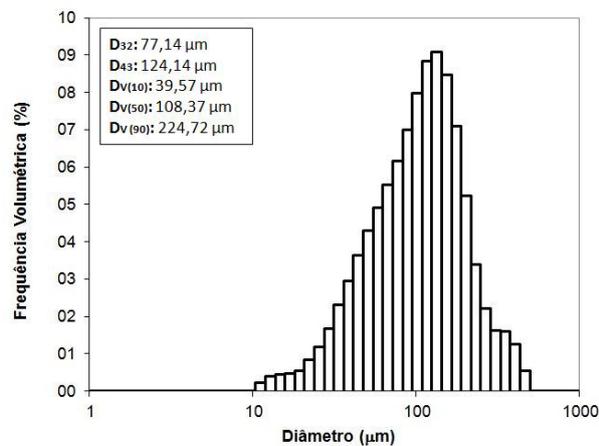


Figura 7: Distribuição do tamanho das gotas.

Os diâmetros médios de Sauter das gotas aferidos para cada posicionamento do bocal atomizador em relação ao feixe de laser estão expostos na Tabela 3.

Posição	Diâmetro médio de Sauter (D_{32})
5 cm	77,14 µm
15 cm	87,14 µm
30 cm	120,51 µm

Tabela 3: Diâmetros médios de Sauter das gotas para cada posição do bocal.

De acordo com os dados contidos na Tabela 3, é possível observar que os tamanhos das gotas aumentaram à medida que o líquido se distanciava do orifício pelo qual este deixava o atomizador. Esse comportamento pode ser atribuído ao momento inicial do líquido, o qual era alto quando este deixava o bocal com uma velocidade elevada, atomizando-o em menores tamanhos. Ao passo que o líquido atomizado se afastava do orifício em formato de um cone oco, possivelmente as gotas se aglomeravam e, conseqüentemente, aumentavam de tamanho.

EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA: OPERAÇÃO A SECO

As eficiências globais de coleta com o ciclone operando a seco para cada condição experimental estão demonstradas na Tabela 4.

Condição experimental	Eficiência global de coleta (η_g)
1	0,81
2	0,78
3	0,75

Tabela 4: Eficiências de coleta globais para o ciclone operando a modo seco.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, é possível analisar que a condição experimental 1, a qual foi executada aplicando uma maior velocidade de entrada da corrente gasosa no ciclone, apresentou uma eficiência de coleta global mais elevada que as condições experimentais que foram realizadas com velocidades de entrada menores. Este comportamento já foi evidenciado por Leith e Mehta (1973), os quais mencionam que a eficiência de coleta de um separador ciclônico é mais alta quando há um aumento na velocidade de rotação no vórtice do ciclone.

EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA: OPERAÇÃO A ÚMIDO

A Figura 8 apresenta o comparativo entre as eficiências de coleta globais com o ciclone operando no modo seco e úmido para cada condição experimental.

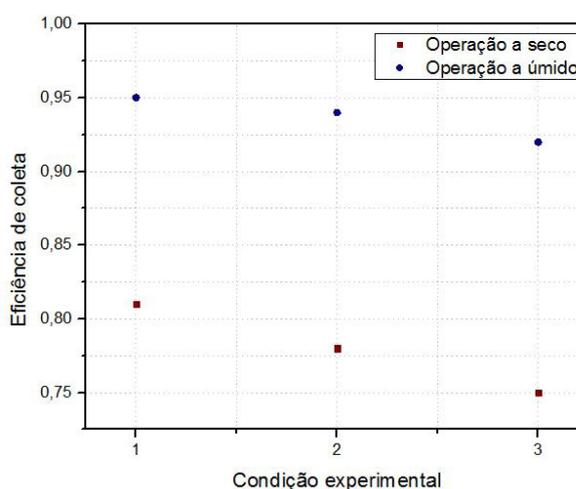


Figura 8: Eficiências de coleta globais para o ciclone operando a seco e a úmido.

Avaliando os resultados demonstrados no gráfico da Figura 8, observa-se que, para todas as condições experimentais, houve um aumento significativo nas eficiências de coleta globais ao promover a pulverização de água no interior do ciclone. Estes aumentos estão mostrados na Tabela 5.

Condição experimental	Eficiência a seco (η_s)	Eficiência a úmido (η_u)	Aumento na eficiência
1	0,81	0,95	14%
2	0,78	0,94	16%
3	0,75	0,92	17%

Tabela 5: Aumento nas eficiências de coleta globais.

Semelhantemente ao comportamento do ciclone operando no modo seco, a condição experimental que apresentou a maior eficiência global de coleta, quando se introduziu água no equipamento, foi a condição 1. No entanto, a partir dos dados contidos na Tabela 5, verifica-se que a condição que apresentou um maior aumento em sua eficiência foi a 3, em virtude da maior razão líquido-gás empregada.

Para promover uma melhor avaliação do comportamento do ciclone operando no modo úmido, serão realizados mais experimentos, inclusive analisando a eficiência de coleta fracionária para cada condição. Todavia, já é possível observar que, quando se adiciona líquido no interior do ciclone, mesmo para baixas razões L/G, há um incremento significativo em sua eficiência de separação de partículas, uma vez que além da ação da força centrífuga, mecanismo de coleta característico dos separadores ciclônicos, há também os mecanismos de captura típicos de lavadores agindo sobre o material particulado, os quais são: impactação inercial, interceptação e difusão.

Além disso, Chiabai Junior (2004), descreve, em sua pesquisa sobre o desempenho do ciclone úmido para a remoção de particulados, que o aumento da eficiência de coleta nesses dispositivos se dá por dois principais fenômenos: a adição de um corpo coletor e a eliminação do rebatimento das partículas. No primeiro, as gotas geradas no corpo do ciclone atuam como uma resistência ao fluxo gasoso, isto é, as partículas mais finas que não seriam coletadas com o equipamento operando a seco, colidem ou aderem à superfície das gotas, tendo as suas massas aumentadas. Esse acréscimo nas massas das partículas é responsável por elevar a inércia das mesmas, fazendo com que a força centrífuga do ciclone se torne mais eficaz. Já o segundo fenômeno refere-se ao fato de que, ao se introduzir água no interior do ciclone, gera-se um filme líquido na parede interna do equipamento. Este filme reduz a energia de impacto das partículas na parede, evitando que estas sejam ricocheteadas e direcionadas para a corrente gasosa de saída.

Por fim, a Tabela 6 realiza um comparativo entre os resultados determinados neste trabalho com os resultados obtidos pelo estudo realizado por Alves (2017), o qual investiga o mesmo equipamento que está sendo avaliado no presente trabalho para remover material particulado proveniente da queima do bagaço da cana-de-açúcar em condições semelhantes à condição experimental 1.

Estudo	Q_g (m ³ /min)	d_{p50} (μ m)	η_s	η_u	L/G (L/m ³)
Atual	4,89	7,47	0,81	0,95	0,10
Alves (2017)	4,28	9,00	0,82	0,97	2,53

Tabela 6: Resultados comparativos entre o trabalho atual e o de Alves (2017).

Assim, por meio da Tabela 6, nota-se que Alves (2017) utilizou uma razão líquido-gás, aproximadamente, 28 vezes maior que a empregada na condição experimental 1 para atingir eficiências globais de coletas semelhantes. Esta diferença pode ser atribuída aos diferentes tipos de bocais utilizados nos trabalhos. No estudo de Alves (2017), foram empregados bocais atomizadores por pressão do tipo leque, com ângulos de abertura de 110°. Todavia, os tamanhos das gotas produzidas por este dispositivo ($D_{32} > 300 \mu\text{m}$) eram maiores que as gotas utilizados no presente trabalho, evidenciando que a distribuição do tamanho das gotas influencia, significativamente, os equipamentos de coleta de material particulado e, dessa forma, deve ser estudado com maior cautela.

AVALIAÇÃO DA QUEDA DE PRESSÃO

A queda de pressão experimental proporcionada pelo ciclone operando no modo seco e os seus respectivos valores teóricos estão apresentados na Tabela 7.

Condição experimental	ΔP_{exp} (Pa)	ΔP_{teo} (Pa)	Erro relativo (%)
1	657,05	666,06	1,35
2	411,88	428,79	3,94
3	215,75	244,86	11,89

Tabela 7: Resultados experimentais e teóricos de queda pressão e seus respectivos erros relativos para o ciclone operando a seco.

Considerando os dados expressos na Tabela 7, observa-se que a queda de pressão aumenta quanto maior for a velocidade do gás na entrada do ciclone. Além disso, nota-se que os resultados experimentais foram próximos dos valores teóricos propostos pelo modelo de Shepherd e Lapple (1939), apresentando erros relativos baixos (menores que 5%) para as condições experimentais que empregaram maiores velocidades de entrada (1 e 2). Já para a condição 3, o aumento do erro relativo pode estar associado à diminuição da precisão do equipamento de medida de queda de pressão quando se trabalha com baixas velocidades.

Com relação ao ciclone operando com a injeção de água, o gráfico da Figura 9 ilustra os resultados de queda pressão obtidos comparados com os do ciclone operando no modo seco.

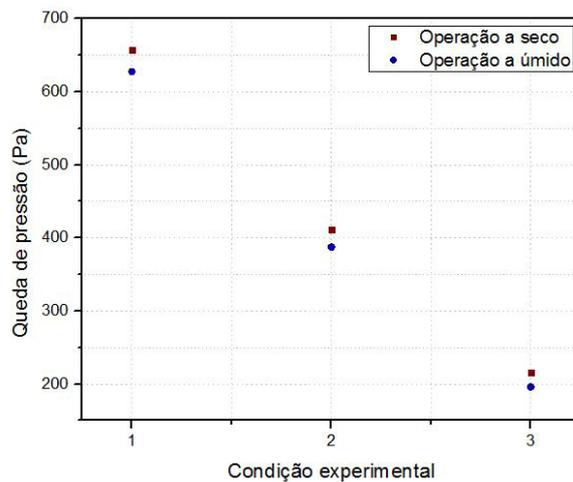


Figura 9: Resultados de queda de pressão para o ciclone operando nos modos seco e úmido.

Analisando os resultados de queda de pressão exibidos na Figura 9, verifica-se que as quedas de pressão para o ciclone úmido, apesar de serem ligeiramente menores, foram próximas dos valores obtidos para o ciclone operando a seco. Entretanto, ainda é necessário um estudo mais aprofundado a fim de avaliar se esta diminuição está relacionada com a precisão do equipamento de medida ou se a injeção de água no interior do equipamento está influenciando este comportamento.

CONCLUSÃO

Este estudo comprovou que a atomização de água no interior do ciclone melhora o seu desempenho, aumentando, significativamente, a sua eficiência global de coleta para materiais particulados provenientes da queima do bagaço da cana-de-açúcar, sem comprometer a sua queda de pressão. Além disso, os resultados demonstraram a importância de se avaliar a distribuição do tamanho de gotas em coletores úmidos a fim de se atingir melhores eficiências de separação, por meio da utilização de baixas razões líquido-gás.

NOMENCLATURA

- a \equiv altura da entrada do ciclone [m];
- b \equiv largura da entrada do ciclone [m];
- B \equiv diâmetro da base cônica do ciclone [m];
- C_i \equiv concentração de sólidos na entrada [kg/m^3];
- C_o \equiv concentração de sólidos na saída [kg/m^3];
- D_{32} \equiv diâmetro médio de Sauter [m];
- d_{bs} \equiv diâmetro do bocal da sonda isocinética [m];
- D_c \equiv diâmetro do corpo cilíndrico do ciclone [m];

D_e \equiv diâmetro do duto de saída do ciclone [m];
 ΔP \equiv queda de pressão no ciclone [kg/ms²];
 ΔP_{exp} \equiv queda de pressão experimental no ciclone operando a seco [kg/ms²];
 ΔP_{teo} \equiv queda de pressão teórica no ciclone operando a seco [kg/ms²];
 d_{p50} \equiv diâmetro mediano volumétrico da partícula [m];
 H \equiv altura total do ciclone [m];
 h_c \equiv altura do corpo cilíndrico do ciclone [m];
 L/G \equiv razão líquido-gás [L/m³];
 m_i \equiv massa de sólidos retida na entrada [kg];
 m_o \equiv massa de sólidos retida na saída [kg];
 MP \equiv material particulado [-];
 η \equiv eficiência global de coleta [-];
 η_s \equiv eficiência global de coleta a seco [-];
 η_u \equiv eficiência global de coleta a úmido [-];
 P_i \equiv pressão estática na entrada do ciclone [kg/ms²];
 P_o \equiv pressão estática na saída do ciclone [kg/ms²];
 Q_b \equiv vazão de sucção da bomba [m³/s];
 Q_g \equiv vazão da corrente gasosa [m³/s];
 ρ_g \equiv densidade do gás [kg/m³];
 S \equiv altura do duto de saída do ciclone [m];
 t_a \equiv tempo de amostragem isocinética [s];
 v_g \equiv velocidade do gás no ponto de amostragem [m/s];
 v_i \equiv velocidade do gás na entrada do ciclone [m/s].

REFERÊNCIAS

ALVES, A. C. M. (2017), **Otimização dos Processos de Separação de um Ciclone Adaptado com Pulverizadores de Água**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 127 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química).

BRAR, L. S.; SHARMA, R. P.; ELSAYED K. (2015), “**The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high efficiency cyclone**”, Powder Technology p. 668-677.

CHENG, J. J. (2009), Biomass to Renewable Energy Processes. Boca Raton (FL): CRC Press.

CHIABAI JUNIOR, J. C. (2014), **Avaliação do Desempenho de um Ciclone Staimand Adaptado com Bicos de Injetores de Água**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 75 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química).

CLEMENTINO, L. D. (2001), **A Conservação da Energia por meio da Co-Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: Editora Érica.

COSTA, M. A. M. (1998), **Amostragem de Partículas Dispersas em Correntes Gasosas Confinadas**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 138 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química).

GUERRA, V. G. (2009), **Investigação do Efeito de Injeção de Líquido por Orifícios Múltiplos na Formação de Gotas em um Lavador Venturi**. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 154 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Química).

IOZIA, D. L.; LEITH, D. (1989), “**Effect of dimensions on gas flow pattern and collection**

efficiency”, *Aerosol Science and Technology*, v.10, p. 491-500.

KRAMES, J.; BÜTTNER, H. (1994), “**The Cyclone Scrubber – a High Efficiency Wet Separator**”. *Chemical Engineering Technology*, vol. 17, p. 73-80.

LEE, B.-K.; JUNG, K.-R.; PARK, S.-H. (2008), “**Development and application of a novel swirl cyclone scrubber - (1) Experimental**”. *Journal of Aerosol Science*, p. 1079-1088.

LEFEBVRE, A. H. (1989), “**Atomization and Sprays**”. West Lafayette, Indiana: Taylor & Francis, 421 p.

LEITH, D.; MEHTA, D. (1973), “Cyclone performance and design”, *Atmospheric Environment Pergamon Press*, v. 7, p. 527 -549.

LORA, E. E. S. (2002), **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético**, Industrial e de Transportes. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ed.Interciência, 481 p.

MAJEWSKI, R. (2006), **Projeto, Construção e Avaliação Experimental de um Lavador de Gases Industriais**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 126 p. (Tese de Doutorado em Engenharia Química).

MOMENZADEH, A.; MOGHIMAN, M. (2010), “**Effect of droplet injection on particle separation efficiency of cyclone separators**”, 13th Annual & 2nd International Fluid Dynamics conference, Shiraz University Shiraz Iran.

BRASIL. **Norma Brasileira Regulamentadora 12019 (1990), Efluentes Gasosos em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias – Determinação de Material Particulado**, Rio de Janeiro, 12 p.

SHEPHERD, C. B.; LAPPLE, C. E. (1939), “**Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors**”. *Industrial and Engineering Chemistry*, p. 972-984.

STAIRMAND, C. J. (1951), “**The design and performance of the cyclone separators**”. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, p. 356-372.

SWITENBANK, J.; BEER, J. M.; TAYLOR D. S.; ABBOT, D.; MACCREATH, G. C. (1976), “**A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution – Experimental diagnostics in gas phase combustion systems**”. *Progress in Astronaut and Aeronauts*, v.53, p. 421 – 447.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA DE AÇÚCAR – ÚNICA (2017), **Biomassa é a segunda maior fonte de energia em 2016**. São Paulo. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/namidia/3474249920338941144/biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia-em-2016/>>. Acesso em: junho/2017.

YANG, K.-S.; YOSHIDA, H. (2004), “**Effect of mist injection on particle separation performance of cyclone scrubber**”. *Separation and Purification Technology*, p.221-230.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro, à Usina Bunge pelo fornecimento do material particulado e à empresa MagnoJet por ter concedido os bocais atomizadores para os testes experimentais.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-085-8

