

Dimensionamento de ciclone para separação de partículas de ZnO.

George L. S. Magalhães; Alexandre B. França.

Resumo

RESUMO - O presente trabalho teve como objetivo projetar e dimensionar um separador ciclônico gás-sólido para a classificação de partículas de Óxido de Zinco (ZnO), visando obter um produto com granulometria inferior a $75\ \mu\text{m}$ (200 mesh). A motivação surgiu da necessidade de solucionar gargalos no setor de qualidade de uma empresa, onde o processo atual de peneiramento é demorado e em escala reduzida, mas pode ser substituído por um ciclone, um equipamento que realizará a separação do particulado e possui o valor de aquisição relativamente favorável e com baixo custo de manutenção. Para o desenvolvimento do projeto, realizou-se a caracterização física do pó de ZnO, incluindo testes de higroscopicidade e análise granulométrica via sedimentação, apresentando uma distribuição onde mais de 80% das partículas situam-se entre 10 e $30\ \mu\text{m}$. Foram avaliadas e comparadas três famílias clássicas de ciclones: Lapple Geral, Stairmand (Alta Eficiência e Alta Vazão) e Swift (Geral, Alta Eficiência e Alta Vazão). O dimensionamento utilizou as correlações de Lozia e Leith para eficiência de coleta e diâmetro de corte (D_{50}), e o modelo de Ramachandran para a estimativa da queda de pressão. Os resultados demonstraram que, embora os modelos Stairmand apresentem alta eficiência, seu custo energético e velocidade interna seriam excessivos. A configuração Swift de Alta Vazão (A.V.) mostrou-se a mais adequada, apresentando o menor consumo energético (95,52 W), menor queda de pressão (687,74 Pa) e um diâmetro de corte ($D_{50} = 9,12\ \mu\text{m}$) o que demonstrou ser compatível com a curva granulométrica do material. O projeto conclui que a implementação no processo via ciclone é tecnicamente viável, garantindo a recuperação de partículas grossas no *underflow* para reprocessamento e atendendo às exigências de qualidade visual do produto final.

Palavras-chave: Separador Ciclônico, Óxido de Zinco, Dimensionamento, Partículas.

Introdução

Realizar o dimensionamento correto de um separador de ciclone garante a eficiência de coleta desejada. Sendo assim, é importante conhecer suas principais características como altura do ciclone, comprimento do vórtice, diâmetro da saída inferior e superior, formatos geométricos do ciclone e diâmetro do corpo do ciclone. Saber calcular e determinar essas características do separador pode favorecer os principais indicadores de desempenho como a eficiência de coleta e queda de pressão. Para tal, foi dimensionado um ciclone tipo gás-sólido para realizar a separação e obtenção de Óxido de Zinco (ZnO) abaixo de 200 mesh ($\leq 75\ \mu\text{m}$).

Devido a um gargalo de processo que necessita ser solucionado visando atender as exigências do setor de qualidade em relação às propriedades visuais do produto comercializado, um dos reagentes sintetizados na empresa (Óxido de Zinco) é adicionado ao produto final, entretanto, a falta de classificação granulométrica desse material torna visível a sua presença no produto a ser comercializado.

Para sanar a demanda da qualidade, foram realizados estudos preliminares em peneiradores de 50, 100 e 200 mesh e definido que particulados que passaram pela peneira de 200 mesh ($\leq 75\ \mu\text{m}$) atingiram as características desejadas pelo setor de qualidade, sendo assim, foi discutido adicionar uma etapa de separação que atenda ao volume de material sintetizado e processado, e as partículas acima da dimensão determinada devem ser reprocessadas em moinhos para redução da granulometria.

Existem diferentes operações que podem realizar a separação desse material. Os peneiradores elétricos, que fazem a separação por tamanho ao interromper a passagem de partículas com diâmetros maiores que a malha da peneira e os separadores ciclônicos que usam corrente gasosa para separar particulados em relação a sua massa específica (massa/volume _{partícula}).

Alguns problemas são observados nos peneiradores elétricos. O trabalhador estará submetido ao intenso barulho do equipamento e sua vibração constante, podendo desenvolver problemas de audição, mesmo com uso do EPI. Pode ser necessário alterar a infraestrutura para

que a poluição sonora não ultrapasse os limites exigidos por lei devido a localização da empresa ser próximo a áreas urbanas, previsto pelo Código de Posturas como na Lei 1.802/2010 capítulo III, Art 75 do município de Ouro Branco-MG além do grande número de peças móveis aumentando o custo de manutenção. O equipamento deve ser dimensionado corretamente em relação ao volume a ser processado pois ao adicionar excesso de material, pode ocorrer o entupimento das malhas e reduzir a eficiência da separação. Em caso de entupimento, cada peneirador deve ser retirado e provavelmente desentupido com auxílio de água, pois qualquer material abrasivo em uma malha de 200 *mesh* pode danificá-la, porém, usar água para realizar a limpeza, vai exigir parada programada do equipamento para o tempo de secagem, pois a umidade presente nas malhas ao entrar em contato com o material, pode reduzir sua fluidez e resultar na sua redução da eficiência de separação.

O ciclone é um equipamento simples que exige um motocompressor de ar para criar a diferença de pressão e assim formar um fluxo de ar que carregará o particulado, uma bolsa filtrante para recuperar o material leve no *overflow* do ciclone e um coletor para recuperar partículas maiores no *underflow*, sendo assim, o equipamento é conhecido por ter um baixo custo inicial e de fácil manutenção. O dimensionamento correto permite processar grande volume de material e ainda exigir pouco espaço para acomodação.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo projetar e dimensionar diferentes modelos de separadores ciclônicos para obter partículas de óxido de zinco com diâmetros menores que 75 μm . Para isso, foi necessário estimar as condições de operação como vazão, pressão e volume de pó a ser processado, granulometria do pó e propriedades físicas do ZnO. Em seguida, foi avaliado a eficiência de separação esperada e o gasto energético.

Revisão

Funcionamento dos separadores ciclônicos.

Os separadores ciclônicos são destinados à separação de partículas presentes em uma corrente gasosa. Os ciclones apresentam uma geometria padrão cilindro-cônico sem necessidade de partes móveis e são constituídos por uma entrada lateral e duas saídas, uma localizada na base do equipamento onde fica o coletor de sólidos (*underflow*) e a outra saída localizado no topo do equipamento para corrente de partículas mais finas contidas em um filtro (*overflow*).

Um sistema de separação por ciclone pode ser ideal em uma indústria que precisa separar e classificar o material de interesse em relação a sua granulometria, devido a sua fácil manutenção, baixo investimento inicial, tamanho do equipamento compacto e versatilidade WANG, W. *et al.*, 2010.

O ciclone atua na separação de sólidos ao realizar a passagem de ar que carrega o material. Ao entrar

tangencialmente no equipamento, essa massa de ar cria um vórtice interno espiralado de forma que os sólidos maiores e mais pesados sofram a força centrípeta e gravitacional, consequentemente, a inércia faz com que esses particulados se aproximem da parede e sejam coletados na saída inferior. A diferença de pressão exercida dentro do ciclone faz com que o ar inverte sua direção e materiais mais leves e menores sejam coletados na saída superior (HAIG *et al.*, 2015).

A eficiência de um separador ciclônico depende diretamente de um conjunto de variáveis físicas, operacionais e geométricas que determinam o comportamento das partículas dentro do campo de forças centrífugas. Entre essas variáveis, destacam-se o diâmetro da partícula, a densidade do material particulado, a velocidade do gás e a geometria do ciclone, cada uma exercendo influência direta sobre o mecanismo de captura.

Diâmetro da partícula.

O tamanho da partícula é um dos fatores mais determinantes para a eficiência de coleta. Partículas maiores possuem maior massa e, portanto, experimentam forças centrífugas mais elevadas, migrando rapidamente para as paredes internas do ciclone. Por isso, ciclones apresentam alta eficiência para partículas acima de 10–20 μm , enquanto a captura de partículas finas (<5 μm) é mais limitada, exigindo geometrias otimizadas ou velocidades mais altas. Em termos gerais, quanto maior o diâmetro da partícula, maior a probabilidade de separação. A densidade também afeta a força centrífuga experimentada pelas partículas. Materiais mais densos possuem maior inércia e tendem a se deslocar mais facilmente para a parede do ciclone. Em contrapartida, partículas de baixa densidade permanecem mais tempo suspensas na corrente gasosa, reduzindo a eficiência global. Assim, a coleta melhora à medida que a densidade das partículas aumenta.

Velocidade do gás.

A velocidade de entrada do gás é fundamental, pois está diretamente relacionada à intensidade da força centrífuga gerada. Velocidades mais altas aumentam a rotação do fluxo interno (“vórtice”), elevando a força centrífuga e, consequentemente, a eficiência de separação. No entanto, velocidades excessivas podem provocar *reentrainment* (reatomização das partículas coletadas), elevar as perdas de carga e aumentar o desgaste do equipamento. Por isso, cada modelo de ciclone apresenta uma faixa ótima de operação.

Alta carga de material na entrada do ciclone

O excesso de pó processado em um ciclone pode alterar significativamente o seu desempenho, afetando tanto a eficiência de coleta quanto a distribuição interna de

concentrações de partículas. Estudos de simulação numérica, como o de (KOU; QIU; WANG, 2025; XUE et al., 2008), mostram que altas concentrações de sólidos modificam o campo de velocidade e intensificam o efeito de aglomeração, levando a uma redução da eficiência para partículas finas. De forma semelhante, WAN *et al.*, (2008) demonstra que diferentes tamanhos de partículas se distribuem de forma desigual no escoamento, e que concentrações elevadas aumentam o choque entre partículas, alterando suas trajetórias. Além disso, análises numéricas como as de QIAN *et al.*, (2007) evidenciam que maiores concentrações na entrada tendem a provocar sobrecarga do ciclone, aumento do “roping” e possível desvio de partículas para o vortex finder. Esses resultados reforçam que o controle da concentração de pó de entrada é essencial para garantir a operação eficiente e estável de separadores ciclônicos.

Configurações geométricas dos ciclones.

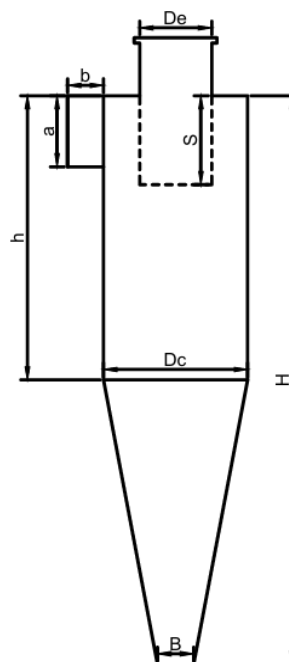
Há diversas famílias de separadores de ciclone, atualmente, novos designs geométricos de separadores ciclônicos são desenvolvidos baseando-se em modelagem computacional. Os pesquisadores Lapple, Swift e Stairmand, já desenvolvem modelos apresentados ao mercado desde os anos 60. Estes, trabalharam otimizando os designs geométricos dos ciclones empiricamente. Lapple realizou os primeiros estudos sistemáticos de modelos de ciclone, Swift e Stairmand aprimoraram os estudos de Lapple para otimizar o sistema de separação de partículas com diferentes parâmetros de processo. Algumas famílias de ciclones podem apresentar variações com foco em alta eficiência ou alta vazão. As dimensões desses ciclones foram definidas experimentalmente e devem seguir as proporções apresentadas na tabela 1 com auxílio da figura 1, como exemplo, a proporção da altura do corpo do ciclone para o diâmetro desse ciclone (H/D_c) é de 4,00 caso seja usado a configuração geométrica de Lapple e assim por diante caso seja usado a configuração de Stairmand ou Swift (LEITH; JONES, 1997).

No entanto, apesar da versatilidade, ciclones apresentam limitações quanto ao tipo de material particulado que podem ser processados de forma eficiente. De modo geral, ciclones não operam bem com materiais úmidos, pegajosos ou que tenham tendência à aglomeração, pois esses sólidos aderem às paredes internas, causando entupimentos, formação de depósitos e perda de eficiência. Da mesma forma, partículas excessivamente leves ou de densidade muito baixa, como poeiras ultrafinas, têm baixa inércia e não sofrem desvio radial suficiente para alcançar as paredes do equipamento fazendo com que a partícula escape pelo tubo de vórtex, caso o objetivo seja recuperar partículas no *Underflow* o operador deve conhecer se o material apresenta tamanho adequado para o uso de ciclone. Materiais fibrosos, elevado índice de floculação ou com alta área superficial

específica também prejudicam a performance, pois sua aerodinâmica não segue o modelo de partículas esféricas assumido pelas correlações de projeto. Além disso, correntes gasosas com umidade elevada podem provocar condensação no interior, ampliando a aderência de partículas e comprometendo a estabilidade do vórtice.

A configuração geométrica do ciclone, como os modelos clássicos de Stairmand, Lapple e Swift, define o comportamento do fluxo interno e o tempo de residência das partículas. Por exemplo, ciclones do tipo Stairmand Alta Eficiência possuem geometrias mais alongadas e entradas menores, aumentando o tempo de permanência das partículas no vórtice e, portanto, a eficiência no *Underflow*. Já modelos mais compactos tendem a apresentar menor perda de carga, porém com desempenho reduzido na captura de partículas finas. Parâmetros como diâmetro do corpo do ciclone, altura do cone, largura da entrada, comprimento da saída e ângulo do cone influenciam diretamente o padrão de escoamento e a eficiência (COURY; PISANI; HUNG, 2004). A Figura 1 apresenta um modelo de ciclone e suas dimensões avaliadas.

Figura 1: Dimensões de um separador ciclone gás-sólido.



Correlações matemáticas para projeto de ciclones.

Baseado nos formatos geométricos dos ciclones, diferentes autores propuseram equações matemáticas para determinar a eficiência de separação, diâmetro de corte da partícula D_{50} , queda de pressão e gasto energético. Cada

modelo matemático faz considerações sobre as partículas e propriedades físicas.

O diâmetro de corte (D_{50}) é definido como o diâmetro de partícula no qual 50% das partículas são coletadas pelo ciclone, representando um parâmetro crítico para avaliar sua eficiência de separação. Valores menores de d_{50} indicam maior capacidade do equipamento em capturar partículas finas. Esse conceito é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais, como na separação de óxidos metálicos, classificação de pós finos em processos de moagem, controle de emissões particuladas em sistemas de exaustão e na recuperação de materiais de alto valor agregado. Em todos esses contextos, o d_{50} permite comparar o desempenho de diferentes ciclones e otimizar a operação conforme as características do material processado.

Modelo de Barth

O modelo de Barth (1956) é um dos mais tradicionais e representa o comportamento das partículas a partir da relação entre suas velocidades terminais e o diâmetro de corte, D_{50} . A eficiência de coleta é descrita fundamentalmente pela razão entre a velocidade terminal da partícula considerada e a velocidade terminal da partícula coletada com 50% de eficiência. Esse enfoque torna o modelo relativamente simples do ponto de vista matemático, mas ele exige a correta determinação da velocidade tangencial máxima no ciclone, variável particularmente sensível à geometria e ao regime de operação. Embora robusto para ciclones de dimensões padronizadas e aplicado amplamente na literatura, o modelo de Barth pode apresentar divergências quando há variações significativas na rugosidade interna, desgaste operacional, ou quando o escoamento se afasta do comportamento idealizado do vórtice.

Modelo de Leith e Licht

Com avanços na compreensão da turbulência interna dos ciclones, o modelo de Leith e Licht (1972) apresenta uma visão mais sofisticada do transporte das partículas que não são coletadas na primeira passagem. Seus autores consideram que essas partículas estão totalmente misturadas radialmente em uma determinada região interna do ciclone devido aos efeitos de turbulência, fator negligenciado em modelos mais simples. Assim, a eficiência passa a depender não apenas da força centrífuga, mas também do tempo disponível para que a partícula migre radialmente até a parede, conceito associado ao tempo de residência. Esse modelo é particularmente útil em situações onde o ciclone opera com fluxos mais turbulentos, partículas de granulometria mais fina ou maiores taxas de recirculação gás-partícula. No entanto, sua implementação requer o conhecimento de parâmetros como o expoente do vórtice (n) e o parâmetro geométrico G , os quais podem variar entre diferentes famílias de

ciclones e introduzem incertezas caso não sejam corretamente avaliados.

Modelo de Lozia e Leith

O modelo de Lozia e Leith (1989) foi desenvolvido para corrigir algumas limitações do modelo de Barth, incorporando resultados experimentais mais recentes que correlacionam diretamente a geometria do ciclone aos principais parâmetros internos do escoamento, como o diâmetro do eixo do vórtice (d_c), o comprimento do vórtice natural (Z_c) e a velocidade tangencial máxima. A partir de ajustes empíricos elaborados com base em 26 experimentos, o modelo produz estimativas mais realistas de D_{50} , sendo capaz de capturar variações decorrentes de pequenas mudanças geométricas. Ele também introduz a eficiência em função do diâmetro de Stokes, abordagem que considera a equivalência entre partículas reais e partículas hipotéticas com a mesma velocidade terminal. Essa formulação costuma fornecer previsões mais consistentes para partículas finas e sistemas de alta eficiência. Ainda assim, por depender de parâmetros ajustados experimentalmente, sua aplicação é ideal quando a geometria do ciclone e as condições de operação são semelhantes às estudadas pelos autores; caso contrário, sua precisão pode ser reduzida.

Correlações para queda de pressão

A queda de pressão (ΔP) em ciclones é um parâmetro essencial no projeto, pois representa o custo energético necessário para promover o movimento do gás no interior do equipamento. Em termos práticos, quanto maior for a ΔP , maior será o consumo de energia do ventilador ou exaustor. Por outro lado, ciclones com queda de pressão muito baixa geralmente apresentam menor eficiência de separação, pois o campo centrífugo gerado é mais fraco. Assim, o projeto ideal busca um equilíbrio entre eficiência e consumo energético.

Shepherd e Lapple (1939) é simples e amplamente usada para ciclones convencionais, mas apresenta maior desvio padrão. Ela enfatiza a influência da área da entrada ($a \cdot b$) normalizada pelo diâmetro do corpo. Entradas maiores tendem a reduzir a velocidade e diminuir ΔP , enquanto entradas estreitas aumentam a intensidade do escoamento e, portanto, a queda de pressão.

Casal e Benet (1983) propõe uma correlação, além de mais precisa, destaca que a relação entre entrada e diâmetro do ciclone exerce efeito não linear na ΔP [$(a \cdot b / D_c^2)^2$]. Isso significa que pequenas alterações dimensionais podem gerar aumentos substanciais na queda de pressão, o que é especialmente relevante no redesenho de ciclones em plantas industriais.

Ramachandran (1991) propõe um modelo que é considerada uma das mais completas, incorpora vários elementos geométricos como altura do duto de saída, dimensões da saída inferior, relação entre altura do corpo e

cone e diâmetro do olho do ciclone. Essa abordagem é mais moderna e mostra que ΔP não é governada apenas pela entrada, mas também pelo desenvolvimento do escoamento interno e das perdas por recirculação do vortex.

Metodologia

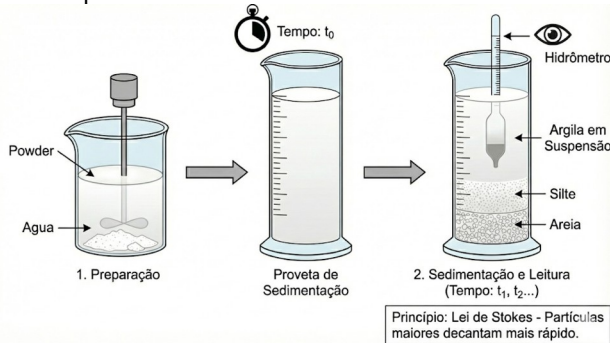
Caracterização do pó:

A higroscopicidade do pó de zinco foi avaliada em um medidor de umidade por infravermelho em que foram medidas 5 g de material e aquecido a 100 °C, a massa final foi medida até se torna constante.

Em um teste preliminar, foi usada uma malha 200 *mesh* e submetido a agitação (agitador eletromagnético) para realizar a separação e classificação do pó por 1h, sendo necessário adicionar bolas cerâmicas para auxiliar a autolimpieza da malha e evitar entupimento constantes.

Seguiu-se a norma com alterações ABNT NBR 7181: Análise granulométrica de solos. O método apresentado na Figura 2 consiste na homogeneização do particulado em uma proveta e o tempo de sedimentação.

Figura 2: Análise granulométrica de solos aplicado ao material particulado de ZnO.



Foi possível estimar a curva granulométrica para partículas abaixo de 74 μm usando o método de sedimentação ao considerar as partículas seguindo a lei de Stokes dada pela equação 1.

$$v(m/s) = \frac{(\rho_p - \rho_{md}) \cdot g \cdot d^2}{18 \cdot \mu} \quad (1)$$

Em que ρ_p é a densidade específica da partícula e ρ_{md} a densidade do meio dispersor. μ é a viscosidade do fluido e d é o diâmetro equivalente da partícula sedimentando. Ao reformular a equação, pode-se deixar o diâmetro em função dos dados obtidos experimentalmente e determinar qual a curva granulométrica do material.

$$d(m) = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot H}{(\rho_p - \rho_{md}) \cdot g \cdot t}} \quad (1.1)$$

H é a distância do centro do bulbo até a linha de leitura do densímetro, indicando qual a distância que a partícula percorreu em determinado tempo t .

Para realizar o experimento 91,71 g de material foram acondicionados em água destilada por 12h. No momento do teste, um mixer de alta frequência realizou a dispersão homogênea por 15 minutos, ao fim do tempo, o material disperso foi vertido em uma proveta de 1.000 mL, agitado por mais 1 minutos e em seguida deixado para sedimentar enquanto era avaliado a temperatura e a densidade em tempos distintos ($t_1 = 0,5$ min; $t_2 = 1$ min; $t_3 = 2$ min; $t_4 = 4$ min; $t_5 = 8$ min e $t_6 = 15$ min), as normas exigem 24h de análise mas tempos maiores que 15 min para este experimento apresentavam valores de densidade constante. Após a análise de sedimentação, o material foi vertido em uma peneira de 200 *mesh*, seco em estufa a 60 °C e medida a massa.

Para determinar as faixas de diâmetro da partícula para montar a curva granulométrica, usou-se a equação 2.

$$P(\%) = \frac{100 \cdot \rho_p \cdot (\rho_{mix} - \rho_{md}) \cdot V_s}{m_s \cdot (\rho_p - \rho_{md})} \quad (2)$$

Em que ρ_{mix} é a densidade do material disperso e V_s o volume da proveta. m_s é a massa seca de ZnO.

É necessário considerar as configurações dos ciclones ao realizar dimensionamento para a separação de partículas. Os tipos de configuração do equipamento, nesse caso, as configurações de Lapple, Stairmand e Swift, por serem comumente usados em indústrias, portanto, já consolidadas, foram avaliadas no dimensionamento.

Balanco de massa

Determinar qual é o balanço de massa do produto é essencial para entender o comportamento da produção e se o processo estará atendendo a demanda da empresa, portanto, tem-se:

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{Overflow} + \dot{m}_{Underflow} \quad (3)$$

Sabendo qual é a eficiência de separação η_i e a fração mássica dessa faixa dado por x_i , podemos encontrar qual será a recuperação em Kg/h no *Overflow*.

$$\dot{m}_{Overflow_i} = x_i \cdot (1 - \eta_i) \cdot \dot{m}_{entrada} \quad (4)$$

Em que $\dot{m}_{Overflow_i}$ é vazão mássica para uma faixa de tamanho de partículas recuperadas no *Overflow* do ciclone.

Dimensionamento dos ciclones

Para dimensionar um ciclone, devem ser definidos alguns parâmetros de operação como a vazão mássica de alimentação a ser processada no equipamento e consequentemente conhecer qual a concentração ideal de particulados na entrada do ciclone sem prejudicar a eficiência de separação ou diminuir a vida útil do equipamento. Na Tabela 1, tem-se as proporções geométricas de cada família de ciclone obtidas do COURY; PISANI; HUNG, (2004).

Tabela 1: Proporções geométricas dos ciclones determinadas experimentalmente por Lapple, Stairmand e Swift.

	Lapple Geral	Stairmand A.E.	Stairmand A.V.
Q/Dc ² (m ³ /h)	6.860	5.500	16.500
a/Dc	0,50	0,5	0,8
b/Dc	0,25	0,2	0,35
H/Dc	4,00	4,0	3,7
h/Dc	2,00	1,5	1,7
De/Dc	0,50	0,5	0,75
B/Dc	0,25	0,375	0,4
S/Dc	0,625	0,5	0,85
	Swift Geral	Swift A.E.	Swift A.V.
Q/Dc ²	6.680	4.940	12.500
a/Dc	0,50	0,44	0,8
b/Dc	0,25	0,21	0,35
H/Dc	3,75	3,9	3,7
h/Dc	1,75	1,4	1,7
De/Dc	0,5	0,4	0,75
B/Dc	0,4	0,4	0,4
S/Dc	0,6	0,5	0,85

*A.E. = Alta Eficiência.
*E.V. = Alta vazão.

As dimensões obtidas dos separadores são usadas na determinação da eficiência de coleta η , o diâmetro de corte D_{50} e perda de pressão no equipamento ΔP . Esses dados ajudam na escolha do projeto com maior potencial de implementação na empresa. Diante dos variados modelos matemáticos, foi escolhido a correlação de Lozia e Leith devido a simplicidade para a resolução.

Diâmetro de corte.

O D_{50} foi obtido com o modelo de Lozia e Leith, dessa forma, a equação exige a variável $V_{\max}$ (m/h) que é obtido pela equação 5.

$$V_{\max} = 6,1 \cdot \frac{Q}{a \cdot b} \cdot \left(\frac{a \cdot b}{Dc^2} \right)^{0,61} \cdot \left(\frac{De}{Dc} \right)^{-0,71} \cdot \left(\frac{H}{Dc} \right)^{-0,33} \quad (5)$$

Em seguida, para calcular o diâmetro de corte, é necessário encontrar o comprimento natural Z_c e que está em função do diâmetro do eixo do vórtice central d_c , dado pela equação 6 cujo os valores foram substituídos em 7:

$$d_c = Dc \cdot 0,47 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{Dc^2} \right)^{-0,25} \cdot \left(\frac{De}{Dc} \right)^{1,4} \quad (6)$$

O d_c (m) definido é então substituído na equação (7) para a obtenção do comprimento natural Z_c (m). Usa-se a equação (8) caso seja atendida a condicional $d_c < B$.

- Se $d_c > B$

$$Z_c = (H - S) \cdot \left[\frac{H - h}{\frac{Dc}{B} - 1} \right] \cdot \left[\frac{d_c}{B} - 1 \right] \quad (7)$$

- Se $d_c < B$

$$Z_c = (H - S) \quad (8)$$

Resolvendo sequencialmente as equações 5, 6 e (7 ou 8), possibilitará a determinação do diâmetro de corte dado pela equação (9).

$$D_{50} = \left(\frac{9 \cdot Q \cdot \mu}{\pi \cdot \rho_p \cdot Z_c \cdot V_{\max}^2} \right)^{0,5} \quad (9)$$

Eficiência de coleta no Underflow.

A curva de eficiência teórica de coleta para diâmetros de partículas variando entre 1 e 80 μm indicará o comportamento do ciclone em relação à separação do pó. Dessa forma será possível saber se partículas menores que 75 μm serão encontrados na saída do *overflow*.

Determinar a curva de eficiência teórica usando a correlação de Lozia e Leith, exige encontrar o fator β dada pela equação (10)

$$A = \ln \left(\frac{a \cdot b}{Dc^2} \right) \quad (10.1)$$

$$B = \ln(D_{50}) \quad (10.2)$$

$$\ln \beta = 0,62 - 0,87 \cdot B + 5,21 \cdot A + 1,05 \cdot A^2 \quad (10.3)$$

O fator β calculado aproximará a curva de eficiência teórica da curva determinada empiricamente por

Lozia e Leith. Portanto, a eficiência η pode ser obtido pela equação 11.

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_{50}}{D_i}\right)^\beta} \quad (11)$$

Perda de pressão e custo energético.

Conhecer a perda de pressão do equipamento indica se o equipamento pode ter o custo energético compensando a separação do particulado.

Como discutido anteriormente, existem vários modelos matemáticos que visam determinar a perda de pressão, mas pensando na melhor proximidade de dados empíricos, usou-se a correlação de Ramachandran dado pela equação (12)

$$\Delta P = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \cdot 20 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{De^2}\right) \cdot \left(\frac{S \cdot Dc^2}{H \cdot h \cdot B}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

O custo energético em Watts para realizar a separação é dado pela equação (13).

$$W = \frac{\Delta P \cdot Q}{3.600 \cdot \varepsilon} \quad (13)$$

Em que Q é a vazão de ar em m³/s e ε é a eficiência do ventilador que consideramos 1 por desprezar perda por efeito Joule.

Resultados e Discussões

A análise termogravimétrica indicou uma perda de massa de 1,00 % $\pm$ 0,03 % o que indica ser um material com baixa higroscopicidade.

Para a determinar a densidade de material homogeneizado usou-se a equação 2 para cada tempo analisado.

$$P(\%) = \frac{100 \cdot 5,6 \cdot (1,060 - 0,997) \cdot 1.000}{91,71 \cdot (5,6 - 0,997)} = 83,57 \%$$

No tempo de 30 segundos, mais de 83% do material estava em suspensão e com a equação 1 é possível determinar qual diâmetro dessas partículas estavam suspensas. A temperatura no momento do teste era 25 °C, portanto, a viscosidade da água era $\mu = 0,00089$ Pa.s

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot 0,00089 \cdot 0,065}{(5.600 - 997,047) \cdot 9,80665 \cdot 30}} = 27,73 \mu\text{m}$$

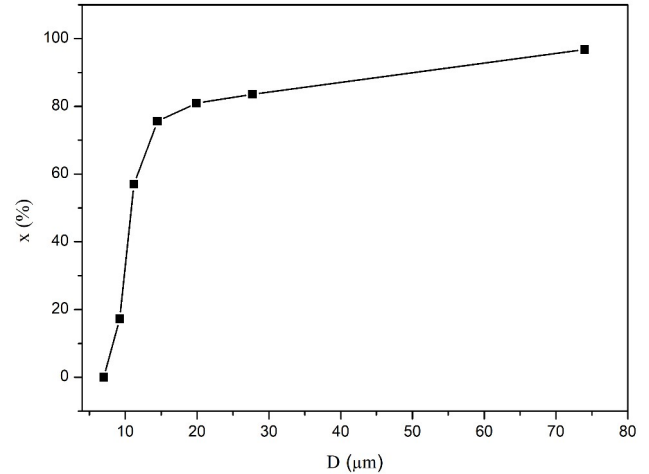
A altura H é determinada pela distância do centro do bulbo do densímetro a linha marcada. Todos os valores foram convertidos para metros e o tempo e altura foram substituídos para determinar a curva acumulativa granulométrica apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Fração acumulativa e diâmetro equivalente das partículas de ZnO.

$\rho_{\text{mix}} (\text{g/cm}^3)$	Tempo (s)	X (%)	D (μm)
-	-	96,25	< 74,00
1,060	30	83,57	27,73
1,058	60	80,92	20,06
1,054	120	75,61	14,79
1,040	240	57,04	11,47
1,010	480	17,25	10,17
0,997	900	0	7,86

Foi obtida a curva granulométrica acumulativa apresentada na Figura 3 a partir dos dados apresentados na tabela 2.

Figura 3: Curva granulométrica acumulativa.

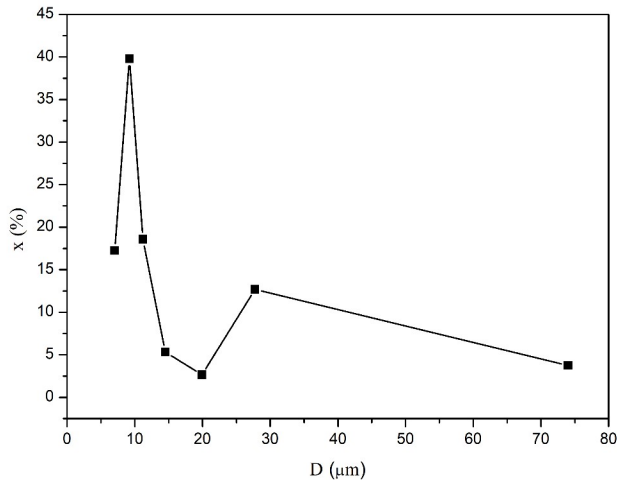


A tabela 2 indica que mais de 80 % das partículas do pó de ZnO está situada entre 10 e 30 μm . Existem algumas limitações do teste de sedimentação, o método não é preciso, apenas oferece uma estimativa aproximada. O baixo tamanho da partícula pode formar uma mistura coloidal em que partículas exercem interações eletrostáticas como as forças de Van Der Waals (SPASOJEVIĆ; IVANIŠEVIĆ; DUTOUR SIKIRIĆ, 2025) devido a dupla camada difusa na superfície da partícula, conseqüentemente o material pode formar aglomerados devido a essas interações, portanto, a estimativa do diâmetro da partícula pode, na verdade, ser o diâmetro equivalente hidrodinâmico do aglomerado sedimentado indicando que as partículas podem ser bem

inferiores ao apresentado pela Figura 3 (BITTELLI et al., 2019).

Seria importante repetir o teste usando um dispersante como Hexametáfosfato de sódio (Calgon) esse reagente quebra a dupla camada difusa e evita que as partículas se aglomerem e assim seria possível obter um resultado mais aproximado do comportamento individual de cada particulado. A distribuição granulométrica discreta apresentada na Figura 4 apresenta a fração mássica em cada faixa de tamanho da partícula.

Figura 4: Distribuição granulométrica discreta.



A distribuição granulométrica discreta indica que cerca de 40 % do material está entre 10,17 e 11,47 μm o que demonstra apresentar uma granulometria favorável ao uso de um separador ciclônico.

Na malha de 200 *mesh*, foram realizados 27 ensaios e foi possível definir que a fração mássica $X_{0-74\mu m} = 0,50 \pm 0,09$. Ou seja, 50% do material de ZnO tem granulometria abaixo que 74 μm. Portanto, nota-se que muito material fica retido na peneira mesmo a tabela 2 indicando que 96,25% do material particulado são menores que 74 μm. Isso pode ser explicado pela a alta coesão entre os particulados uma propriedade que ZnO forma grumos devido a interações eletroestáticas e pode ser confirmado visualmente ao avaliar após a peneiragem e ainda observar grumos pequenos que desagregam ao toque, mas que não passariam pela abertura da peneira de 200 *mesh*.

As considerações dos parâmetros de processo como temperatura de operação em torno 27 °C, pressão atmosférica (1 atm) e vazão mássica do produto a 10 kg de

ZnO em 1h de produção, portanto, usa-se como dado inicial na equação (3):

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{Overflow} + \dot{m}_{Underflow} \quad (3)$$

Em que, $\dot{m}_{entrada}$ é igual a 10 Kg/h de ZnO obtido com granulometria inferior a 74 μm.

Para calcular a vazão de ar é preciso conhecer a concentração de particulado que possibilita ocorrer o arraste da partícula em uma corrente gasosa. Em caso de futura prática experimental, é possível obter esse dado usando um amostrador isocinético, equipamento que possibilita determinar a concentração de partículas em um fluxo de ar. Nos estudos teóricos QIAN et al., (2007); WAN et al., (2008) e XUE et al., (2008), os autores trabalham com concentrações acima de 0,03 ou 2,00 Kg/m³ portanto, é considerável calcular o fluxo de partículas de ZnO na concentração de 0,02 Kg/m³ por volume de ar, dessa forma, torna possível determinar a vazão volumétrica de ar pela equação (14).

$$Q_{ar} = \frac{10}{0,02} = 500 \text{ m}^3/\text{h} \quad (14)$$

Com a vazão volumétrica calculada, pode-se determinar os dimensionamentos dos ciclones de cada configuração geométrica determinada por Lapple, Stairmand e Swift utilizando os dados da tabela 1. Primeiramente, usando Q/Dc^2 dado na Tabela 1 para a configuração de Lapple, tem-se

$$\frac{500}{D_c^2} = 6.860$$

$$\sqrt{\frac{500}{6.860}} = Dc = 0,27 \text{ m}$$

Dessa forma, foi obtido o diâmetro do corpo do ciclone Dc (m). O mesmo foi realizado para as outras famílias de ciclones. A dimensão Dc (m) após ser substituída com os dados de proporções geométricas da Tabela 1, foram compiladas na Tabela 2.

Tabela 2: Dimensionamento dos ciclones.

Dimensões (cm)	Lapple Geral	Stairmand A.E.	Stairmand A.V.
Dc	27,00	17,41	17,41
a	13,50	8,70	13,06
b	6,75	3,48	6,53
H	108,00	69,63	69,63
h	54,00	26,11	26,11
De	13,50	8,70	13,06
B	6,75	6,53	6,53

S	16,87	8,70	15,23
Dimensões (cm)	Swift Geral	Swift A.E.	Swift A.V.
Dc	27,36	31,81	20,00
a	13,68	14,00	16,00
b	6,84	6,68	7,00
H	102,60	124,08	74,00
h	47,88	44,54	34,00
De	13,68	12,73	15,00
B	10,94	12,73	8,00
S	16,41	15,91	17,00

O dimensionamento do ciclone pode ser observado pelas Figuras 5 e 6.

Figura 5: Desenho técnico dos ciclones Lapple, Swift e Stairmand para alta vazão respectivamente.

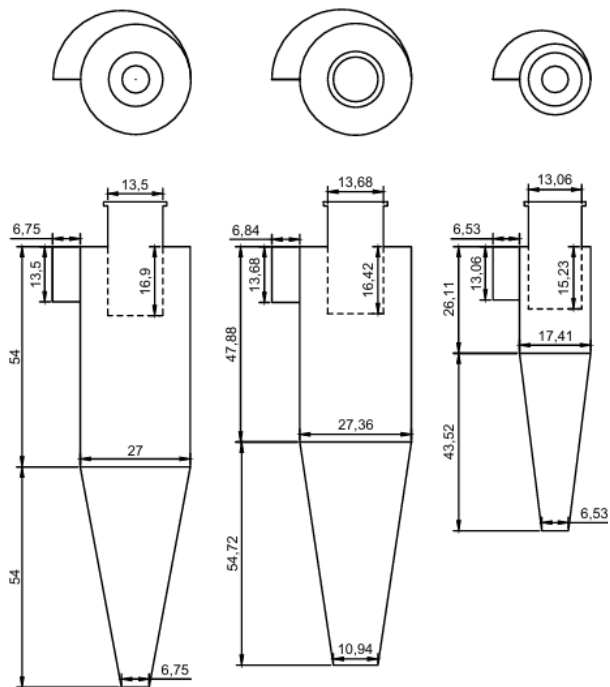
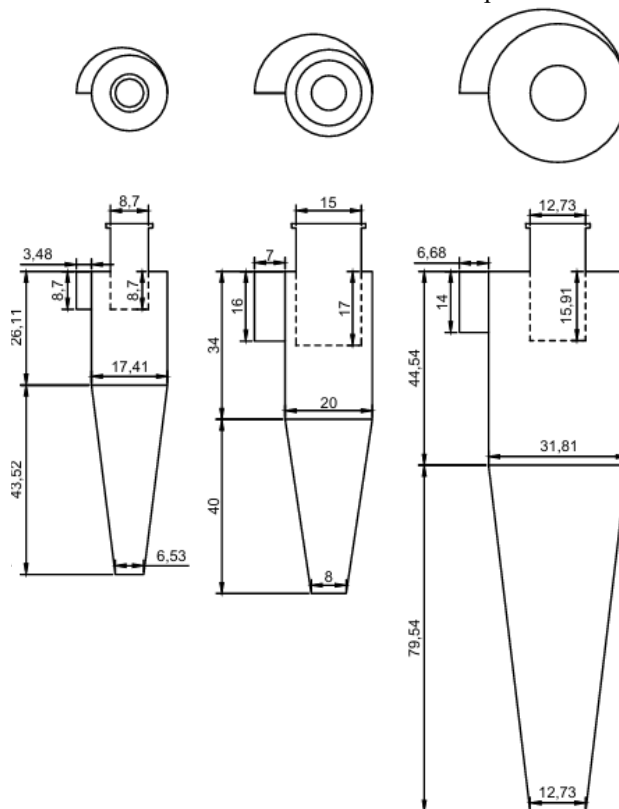


Figura 6: Desenho técnico dos ciclones Stairmand para alta eficiência, Swift para alta vazão e Swift para alta

eficiência

respectivamente.



Determinando D_{50} para as famílias de ciclones projetadas.

Usando as equações na configuração geométrica do Lapple como exemplo, as dimensões foram substituídas na equação (5).

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{6,1 \cdot \frac{500}{0,135 \cdot 0,675} \cdot \left(\frac{0,135 \cdot 0,675}{0,27^2} \right)^{0,61}}{\left(\frac{0,135}{0,27} \right)^{0,71} \cdot \left(\frac{1,08}{0,27} \right)^{0,33}} \quad (15)$$

$$V_{m\acute{a}x} = 99527,12 \text{ m/h} = 27,65 \text{ m/s} \quad (15.1)$$

Em seguida, foi definida d_c que é o diâmetro do tubo central de saída e está associado empiricamente a Z_c , caso $d_c > B$, em que o diâmetro do tubo de saída no *overflow* é proporcional ao comprimento natural Z_c .

$$d_c = \frac{0,27 \cdot 0,47 \cdot \left(\frac{0,135}{0,27}\right)^{1,4}}{\left(\frac{0,135 \cdot 0,0675}{0,27^2}\right)^{0,25}} \quad (16)$$

$$d_c = 0,081 \text{ m}$$

Como $d_c = 0,081 > B = 0,0675$ para a configuração de Lapple, determina-se Z_c que é o comprimento natural, uma medida que relaciona o caminho que um fluxo de ar percorre dentro do ciclone antes de sair. O Z_c pode ser associado ao tempo de residência da partícula e tem influência na eficiência de separação e perda de carga. O valor d_c dado pela equação 16 pode ser substituído na equação 7.

$$Z_c = (1,08 - 0,1687) \cdot \left[\frac{1,08 - 0,54}{\frac{0,27}{0,0675} - 1} \right] \cdot \left[\frac{0,081}{0,0675} - 1 \right]$$

$$Z_c = 0,876 \text{ m}$$

Não são todas as configurações que seguiram a condição $d_c > B$, Swift, Swift A.E. e Stairmand A.E. foram projetadas com dimensões em que $d_c < B$. Em seguida, os valores de $V_{\max}$ e Z_c , foram substituídos na equação 17 para encontrar o diâmetro de corte.

A viscosidade do ar μ foi considerada $1,8 \times 10^{-5}$ kg/m.s enquanto a densidade da partícula ρ_p foi considerada 5.610 Kg/m^3 e esses valores substituídos na equação 9.

$$D_{50} = \left(\frac{9 \cdot 0,1389 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 5610 \cdot 0,876 \cdot 27,65^2} \right)^{0,5} \quad (18)$$

$$D_{50} = 7,26 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 7,26 \mu\text{m}$$

O diâmetro de corte para as configurações Swift e Stairmand foram calculadas e compiladas na Tabela 3.

Tabela 3: Diâmetro de corte obtido para cada família de ciclones.

Diâmetro do pó (μm)	Lapple Geral	Stairmand A.E.	Stairmand A.V.
D_{50}	7,26	5,38	8,40
	Swift	Swift	Swift

	Geral	A.E.	A.V.
D_{50}	7,34	6,66	9,12

Os diâmetros de cortes D_{50} indicam que as partículas abaixo de $10 \mu\text{m}$ serão recuperadas em grande parte no *overflow*, sendo assim, a expectativa de obter particulados menores que os $74 \mu\text{m}$ de ZnO exigidos pela empresa são tecnicamente favoráveis.

Determinando a eficiência de separação para as famílias de ciclones projetadas.

Primeiro, o fator β deve ser obtido para corrigir os valores teóricos de eficiência e aproximar os dados do expoente β surge em equações de correlação que relacionam a eficiência de coleta com variáveis como o diâmetro da partícula e a velocidade do gás. Ele representa a sensibilidade da eficiência em relação ao tamanho das partículas. Em termos práticos: Se β é alto, pequenas variações no tamanho das partículas causam grandes mudanças na eficiência. Se β é baixo, a eficiência varia de forma mais suave com o tamanho das partículas. Portanto, usou-se a equação (10).

$$A = \ln\left(\frac{0,135 \cdot 0,0675}{0,27^2}\right) \quad (19.1)$$

$$B = \ln(6,66 \cdot 10^{-4}) \quad (19.2)$$

$$\ln \beta = 0,62 - 0,87 \cdot B + 5,21 \cdot A + 1,05 \cdot A^2 \quad (19.3)$$

Substituindo A e B na equação, tem-se:

$$\ln \beta = 0,614 \quad (19.3)$$

Portanto, o valor de β para a configuração de Lapple é de 1,85.

Ao substituir por cada diâmetro de interesse, é possível conhecer com qual eficiência a partícula é recuperada no coletor do ciclone. Sendo assim, a partícula com diâmetro de $74 \mu\text{m}$ terá uma eficiência de:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{6,66}{74}\right)^{1,85}} \quad (19)$$

$$\eta_{74} = 98,65 \%$$

Tabela 4: Eficiência de separação (*Underflow*) para partículas maiores que $74 \mu\text{m}$.

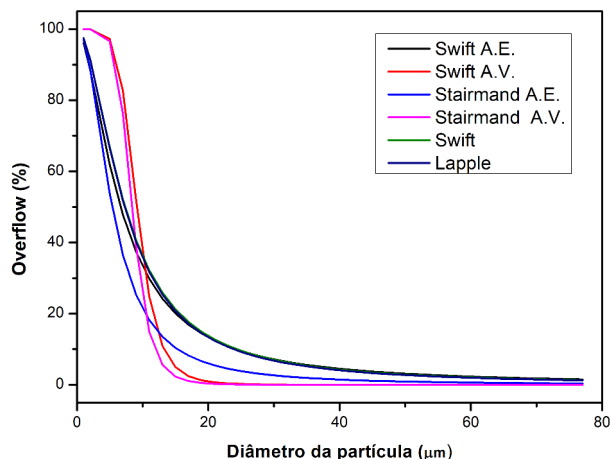
% (<i>Underflow</i>)	Lapple Geral	Stairmand A.E.	Stairmand A.V.
---------------------------	--------------	----------------	----------------

η_{74}	98,65	99,59	99,99
	Swift Geral	Swift A.E.	Swift A.V.
η_{74}	98,56	98,36	99,99

Ou seja, será obtido no *Underflow* presença mínima de partículas de ZnO maiores que 74 μm .

Com a equação 9, foi possível montar uma curva de eficiência de coleta no *Overflow* de cada ciclone dimensionado e os dados foram apresentados na Figura 7.

Figura 7 Curva de eficiência no *Overflow* para cada família de ciclone.



Nota-se que as famílias Stairmand A.V. e Swift A.V. apresentam comportamentos de eficiência muito semelhantes; o mesmo ocorre entre os modelos Swift e Swift A.E.. A partir da comparação entre os desenhos técnicos (Figuras 5 e 6), a Tabela 1 e o gráfico de eficiência, observa-se que ciclones com desempenho semelhante compartilham proporções geométricas próximas, especialmente na razão entre as dimensões do corpo do ciclone e o diâmetro do cilindro (D_c), ainda que apresentem diferenças absolutas nas medidas. Essa tendência reforça que configurações geométricas equivalentes tendem a gerar curvas de eficiência semelhantes, o que é fundamental para a escolha adequada do modelo a ser dimensionado.

Com base nos resultados obtidos, qualquer um dos modelos de ciclone analisados é capaz de atender à faixa de diâmetro exigida pela empresa, visto que é baixa a probabilidade de partículas maiores que 75 μm aparecerem no *overflow*. A fração que tende a predominar nesse fluxo é constituída por partículas abaixo de 10 μm , indicando a necessidade de recirculação desse material no processo.

Entretanto, o ponto crítico identificado é a baixa eficiência na recuperação de partículas entre 20 e 75 μm , faixa na qual o desempenho dos modelos se mostra insatisfatório. Assim, conhecer com maior precisão a curva granulométrica do material nessa região é essencial para

avaliar se o uso do ciclone é realmente conveniente para essa etapa do processo.

Determinando a queda de pressão nos equipamentos dimensionados.

Para calcular a queda de pressão dentro do equipamento, foi considerada a densidade do ar a 27 °C dada como $\rho = 1,29 \text{ Kg/m}^3$ e o valor substituído na equação (12):

$$\Delta P = \frac{\frac{1,29 \cdot 15,24^2}{2} \cdot 20 \cdot \left(\frac{0,135 \cdot 0,0675}{0,135^2} \right)}{\left(\frac{0,1687 \cdot 0,27^2}{1,08 \cdot 0,54 \cdot 0,0675} \right)^{-\frac{1}{3}}}$$

$$\Delta P = 1017,18 \text{ Pa}$$

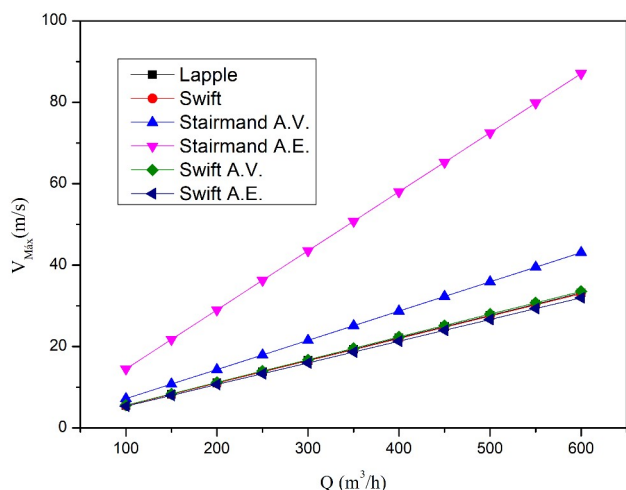
A queda de pressão e o consumo energético foram definidos para cada ciclone dimensionado e compilados na Tabela 5.

Tabela 5: Queda de pressão e gasto energético referente a cada família de ciclone avaliada.

	Lapple Geral	Stairmand A.E.	Stairmand A.V.
ΔP (Pa)	1017,18	6565,61	1250,30
W (Watts)	141,28	911,89	173,65
	Swift Geral	Swift A.E.	Swift A.V.
ΔP (Pa)	869,02	1005,12	687,74
W (Watts)	120,70	139,60	95,52

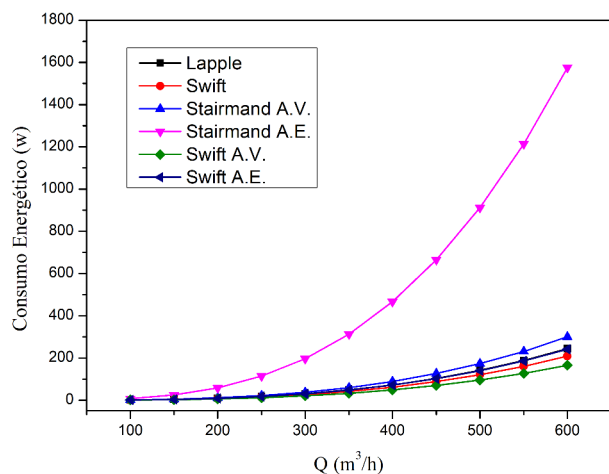
Estudos como o FENG et al., (2025), MISIULIA; LIDÉN; ANTONYUK (2023) e WANG et al., (2023) discute o efeito da velocidade tangencial dentro de um ciclone como o aumento da eficiência de separação. Sabe-se que a alta velocidade da partícula pode causar um desgaste da superfície interna do ciclone o que diminuiria a sua vida útil ou necessitaria de manutenções periódicas bem mais frequentes, outro problema é o aumento da diferença de pressão que consequentemente aumenta o gasto energético. A figura 8 apresentam as velocidades máximas tangenciais em relação ao aumento de vazão de entrada dos ciclones avaliados nesse estudo, enquanto a figura 9 avalia o gasto energético ao aumentar a vazão de entrada

Figura 8: Velocidade máxima no interior do ciclone.



A queda de pressão em relação a variação da vazão volumétrica de ar auxilia com a decisão de qual ciclone atenderá a demanda com menor custo de energia. (Figura 9).

Figura 9: Consumo de energia em reação ao aumento de vazão de entrada.



Dessa forma, pode-se descartar o uso de ciclone da família Stairmand seja alta eficiência ou alta vazão pois ambos apresentam o consumo energético e velocidade máxima maiores. Portanto, as famílias de ciclone Swift e Lapple podem ser escolhidos para o projeto pois apresentam consumo de energia bem semelhantes. Porém, ao avaliar a figura 7 e a curva granulométrica na figura 4 o modelo de Swift para alta vazão melhor se adequa devido o diâmetro de corte ser próximo a faixa granulométrica de 10,17 a 11,47 μm , ter o menor consumo de energia e apresentar uma faixa de velocidade tangencial máxima sem aumentar consideravelmente com o aumento da vazão de entrada. Sendo assim, o dimensionamento do separador ciclônico para Swift A.V. mostrou-se ter grande potencial para atender as exigências da empresa. O pó coletado no

underflow pode ser reprocessado em um moinho de facas e recirculado no processo até a completa recuperação no *overflow* e ainda obter um diâmetro de partícula bem menor em comparação ao esperado o que o setor de qualidade pode entender como algo vantajoso tendo em vista a limitação anterior causada pela peneira.

Conclusões

O estudo permitiu o dimensionamento teórico de um sistema de separação ciclônica capaz de ser implementado no processo de classificação de Óxido de Zinco, atendendo à demanda industrial por partículas abaixo de 75 μm .

A caracterização do material mostrou que o ZnO possui baixa higroscopicidade, mas elevada coesão, formando aglomerados que dificultam o peneiramento tradicional. A análise granulométrica indicou que a maior parte do material possui diâmetro favorável à separação centrífuga.

A comparação entre as configurações geométricas de Lapple, Stairmand e Swift evidenciou diferenças significativas no desempenho operacional: Os modelos Stairmand (Alta Eficiência e Alta Vazão) foram descartados devido à elevada queda de pressão e altas velocidades tangenciais, que implicariam em maior desgaste abrasivo do equipamento e consumo energético superior a 900 W no caso do modelo de alta eficiência enquanto os modelos Lapple e Swift apresentaram desempenhos energéticos mais equilibrados.

Conclui-se que o ciclone Swift de Alta Vazão (A.V.) é a escolha ideal para o processo. Este modelo apresentou o melhor equilíbrio operacional, com um diâmetro de corte (D_{50}) de 9,12 μm ou seja, uma eficiência de coleta no *Overflow* superior a 50% para partículas maiores que 9 μm . Além disso, registrou a menor queda de pressão do estudo (~ 688 Pa) e o menor custo energético (~ 95 W).

A implementação deste equipamento permitirá a recirculação do material grosseiro para o moinho de facas, eliminando a presença de particulados visíveis no produto final exigido pela empresa. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a validação experimental com um protótipo em escala piloto para confirmar os dados de eficiência de coleta e ajustar os parâmetros de operação real.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 2025.

Bittelli, M., Andrenelli, M. C., Simonetti, G., Pellegrini, S., Artioli, G., Piccoli, I., & Morari, F. (2019). Shall we abandon sedimentation methods for particle size analysis in soils? *Soil and Tillage Research*, 185, 36–46.

COURY, J. R.; PISANI, R.; HUNG, Y.-T. Cyclones. *Air Pollution Control Engineering*, p. 97–151, 2004.

D, L., & W, L. (1972). The collection efficiency of cyclone type particle collectors - A new theoretical approach. *AIChE Symp Ser (Am Inst Chem Eng)*, 68(126), 196–206.

Feng, M., Gui, C., Zhou, Y., & Lei, Z. (2025). Numerical study on performance optimization and flow mechanism of a new cyclone separator. *Green Chemical Engineering*, 6(1), 76–84.

Haig, C. W., Hursthouse, A., Mcilwain, S., & Sykes, D. (2015). An empirical investigation into the influence of pressure drop on particle behaviour in small scale reverse-flow cyclones. *Powder Technology*, 275, 172–181.

Iozia, D. L., & Leith, D. (1989). Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology*, 10(3), 491–500.

J, C., & M, M.-B. J. (1983). A better way to calculate cyclone pressure drop. *Chemical Engineering*, 90(2), 99–100.

Kou, J., Qiu, H., & Wang, C. (2025). Numerical simulation analysis of particle motion behavior and key structures inside a novel cyclone separator. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 85, 114–127.

LEITH, D.; JONES, D. L. Cyclones. *Handbook of Powder Science & Technology*, p. 727–752, 1997.

Misiulia, D., Lidén, G., & Antonyuk, S. (2023). Secondary Lip Flow in a Cyclone Separator. *Flow, Turbulence and Combustion* 2023 110:3, 110(3), 581–600.

Ouro Branco (MG). Código de Posturas na Lei 1.802 capítulo III, Art 75. de 6 de julho de 2010. INSTITUI O CÓDIGO DE POSTURAS DO MUNICÍPIO DE OURO BRANCO E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS. 2010.

Qian, F., Huang, Z., Chen, G., & Zhang, M. (2007). Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations. *Computers & Chemical Engineering*, 31(9), 1111–1122.

Ramachandran, G., Leith, D., Dirgo, J., & Feldman, H. (1991). Cyclone Optimization Based on a New Empirical Model for Pressure Drop. *Aerosol Science and Technology*, 15(2), 135–148.

Shepherd, C. B., & Lapple, C. E. (1939). Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors. *Industrial & Engineering Chemistry*, 31(8), 972–984.

Spasojević, L., Ivanišević, I., & Dutour Sikirić, M. (2025). Stability and application of TiO₂ nanomaterials in aqueous suspensions: a review. *RSC Advances*, 15(27).

W., B. (1956). Berechnung und Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund neuer Untersuchungen. *Brennst.-Warme-Kraft*, 8, 1–9.

Wan, G., Sun, G., Xue, X., & Shi, M. (2008). Solids concentration simulation of different size particles in a cyclone separator. *Powder Technology*, 183(1), 94–104.

Wang, C., Ma, Y., Sui, W., Wang, C., Ma, Y., & Sui, W. (2023). The Secondary Flows in a Cyclone Separator: A Review. *Processes* 2023, Vol. 11, 11(10).

Wang, W., Zhang, P., Wang, L., Chen, G., Li, J., & Li, X. (2010). Structure and performance of the circumfluent cyclone. *Powder Technology*, 200(3), 158–163.

Xue, X., Sun, G., Wan, G., & Shi, M. (2008). Numerical simulation of particle concentration in a gas cyclone separator. *Petroleum Science* 2007 4:3, 4(3), 76–83.

Lista de Simbologia

- a – Largura da entrada do ciclone (m)
- b – Altura da entrada do ciclone (m)
- B – Diâmetro da saída inferior (*underflow*) (m)
- Dc – Diâmetro do corpo do ciclone (m)
- De – Diâmetro da saída superior (*overflow*) (m)
- D₅₀ – Diâmetro de corte (50% de eficiência) (m ou μm)
- D_i – Diâmetro da partícula da classe i (m ou μm)
- g – Aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
- H – Altura do corpo do ciclone (m)
- h – Altura do cilindro do ciclone (m)
- ms – Massa seca do sólido (kg)
- Q – Vazão volumétrica de ar ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ou $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
- S – Comprimento do tubo de saída (m)
- V_s – Volume da proveta (m^3)
- V_{max} – Velocidade tangencial máxima no ciclone ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ou $\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)
- W – Potência consumida pelo ventilador (W)
- Z_c – Comprimento natural do vórtice (m)
- β – Expoente empírico da curva de eficiência
- ΔP – Queda de pressão no ciclone (Pa)
- ε – Eficiência do ventilador ou motocompressor
- η_i – Eficiência de coleta para partículas da classe i
- μ – Viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- ρ – Densidade do gás ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- ρ_p – Densidade da partícula ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- ρ_{md} – Densidade do meio dispersor ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- ρ_{mix} – Densidade da suspensão ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- $\dot{m}_{entrada}$ – Vazão mássica de alimentação ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)