

# IMPORTÂNCIA DO USO DE CICLONES NOS PROCESSOS DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA

## AUTOR

**NUNES Laís de Souza**

Discente da União das Faculdades dos Grandes Lagos – UNILAGO

**VERONEZI Carolina Médici**

**LOPES Amarildo Marchi**

Docentes da União das Faculdades dos Grandes Lagos - UNILAGO

## RESUMO

As usinas sucroalcooleiras utilizam equipamentos denominados ciclones em duas etapas do processo, na secagem de levedura e nas caldeiras a bagaço. Os ciclones vêm ganhando cada vez mais espaço nas indústrias, sendo utilizados com a finalidade de separar as partículas sólidas contidas em um gás, por serem compactos, de fácil operação, possuírem uma construção simples e barata, não conterem partes móveis e poderem usar elevadas pressões e temperaturas. São operados individualmente ou em arranjos em série ou em paralelo. Para a projeção de um ciclone é importante conhecer os cálculos de parâmetros geométricos e operacionais, por meio das equações que propõem a otimização operacional. A presente revisão de literatura evidencia a importância do uso do ciclone no processo de uma usina sucroalcooleira, principalmente na produção de levedura para a fermentação. Foram abordados o processamento da indústria, destacando as etapas onde se utiliza os ciclones, além dos cálculos utilizados para o dimensionamento de ciclone. A utilização de ciclones pode proporcionar maior benefício no preparo da levedura, porém, os cálculos de parâmetros geométricos e operacionais devem ser devidamente realizados por meio de equações empíricas objetivando uma otimização operacional.

## PALAVRAS-CHAVE

Ciclone. Indústria sucroalcooleira. Dimensionamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais as usinas sucroalcooleiras ganham espaço no mercado investindo em tecnologia, modernização e pesquisa. As usinas sucroalcooleiras estão espalhadas por todo o Brasil, porém, em 2019, o estado de São Paulo foi considerado o maior produtor de cana-de-açúcar (358 milhões de toneladas), açúcar (24 milhões de toneladas) e etanol (13 milhões de litros) (AGROLINK, 2019), destacando algumas cidades, como Morro Agudo (71,32%), Barretos (41,82%), Guaira (47,68%) e Novo Horizonte (42,93%) (NOVOCANA, 2019). Com o aumento da produção de cana-de-açúcar, houve um grande impacto no desenvolvimento das regiões onde as usinas sucroalcooleiras se instalaram, reduzindo a pobreza e a miséria (NASTARI, 2012).

A produção de álcool é constituída pelas etapas de moagem, tratamento do caldo, aquecimento, decantação, evaporação, fermentação, centrifugação, destilação e armazenamento (SEBRAE, 2008). O processo de fermentação é importante, visto que os açúcares presentes no caldo são convertidos em etanol e outros subprodutos pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* (ALBARELLI, 2013). Para a obtenção da levedura existem diversas alternativas, como a sangria do leite de levedura, fundo de dorna e de vinhaça (SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE CANA-DE-AÇÚCAR, 2013). Nesse processo, após adquiri-la de forma úmida, as leveduras são secas por *spray-dryer* e vão para o ciclone. No ciclone, as partículas finas que não precipitaram e que podem ser levadas a exaustão são recuperadas (AQUARONE *et al.*, 2001). Outro processo das usinas sucroalcooleiras onde o ciclone pode ser encontrado é na utilização do bagaço da cana para produção de energia elétrica (CONAB, 2013).

Desde o seu surgimento, o uso dos ciclones vem crescendo em indústrias químicas, petroquímicas, têxteis, metalúrgicas, nuclear, entre outras. Sua utilização é viável devido ao baixo custo de construção, fabricação e a alta eficiência de coleta (CREMASCO, 2012). Os ciclones são equipamentos utilizados como filtros, que separam partículas sólidas em suspensão na corrente de gases de exaustão ou despoeiramento. Ainda, podem ter o propósito de classificadores de partículas sólidas, secadores, reatores, entre outros. As forças centrífugas desenvolvidas pelos ciclones fazem com que as partículas colidem contra as paredes provocando a redução na velocidade e a queda das mesmas pelo cone inferior, enquanto que o ar limpo sai pela parte superior (MORAES *et al.*, 2019). Usualmente projeta-se uma unidade, porém se a eficiência for alta, devem-se adotar ciclones em paralelo, ou seja, multiciclones que podem reunir em um único equipamento centenas de mini ciclones (VENTEC, 2008). Conhecendo a importância dos ciclones, o objetivo desta revisão foi relatar a utilização deles no processo de uma usina sucroalcooleira, principalmente na etapa de fermentação, a fim de ampliar o conhecimento sobre os tipos que podem ser utilizados, além dos parâmetros geométricos e operacionais.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Usinas sucroalcooleiras

A primeira tentativa de modernização do setor sucroalcooleiro no Brasil começou por volta do século XIX, no início da administração colonial até as primeiras décadas da fase republicana, com a atuação do Estado direcionando as atividades do setor (RAMOS, 1991). A crise internacional de 1930 ficou marcada pela alteração no ambiente econômico do país e especificamente no setor. Surgiu o Instituto do Açúcar e Alcool (IAA) em 1933, resultando em consequências ao longo das décadas, até que em 1970 houve a implantação do Proálcool (VIAN, 2003).

Estabeleceu-se, então, uma relação entre os conceitos teóricos da Nova Economia Institucional com a história do setor sucroalcooleiro no Brasil, onde foi notório o papel das instituições, como o Estado, a formação

cultural, a estrutura social e a forma de organização dos agentes econômicos e sociais para o desenvolvimento e evolução da atividade deste setor no país (QUEDA, 1972).

Na safra 2019/20 foram mais de 642,7 milhões de toneladas colhidas, representando um aumento de 3,6% em relação à 2018/19. A região sudeste, principal produtora do país, manteve o padrão de produção alcançando mais de 415 milhões de toneladas colhidas, sendo São Paulo e Minas Gerais, os estados de maiores destaques (CONAB, 2020). Em relação aos produtos providos da cana-de-açúcar, houve um aumento de 757,4 mil toneladas na produção de açúcar em duas grandes regiões. As regiões norte e nordeste resultaram em um aumento de 15%, enquanto a centro-sul apresentou um crescimento de 3% em relação à safra anterior. Em contrapartida, São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás e Alagoas são os maiores produtores nacionais de açúcar (CONAB, 2020). A produção de etanol totalizou 34 bilhões de litros produzidos a partir da cana-de-açúcar, sendo 10,12 bilhões correspondentes ao etanol anidro e 23,89 bilhões ao etanol hidratado. A estimativa da produção brasileira de etanol a partir da cana-de-açúcar teve uma evolução de 5,1% em relação à safra 2018/19 (CONAB, 2020).

## **2.2 Produção de álcool**

A cana-de-açúcar passa por diversas etapas até a produção de álcool. Ao chegar à usina, a cana-de-açúcar é depositada nas mesas alimentadoras da moenda, e lavada com água ou a seco, visto que contém diversas impurezas que são adquiridas durante a colheita. A limpeza utilizando água gera consideráveis perdas de açúcares, enquanto a seco, além de diminuir as perdas de açúcares, reduz a utilização de água no processo e melhora a qualidade do açúcar extraído (REIN, 2007). Após a limpeza, a cana passa por uma série de picadores e desfibradores com a finalidade de romper as células fibrosas para facilitar a moagem e promover uma maior eficiência na extração. Durante essa etapa, o caldo e a fibra são separados da cana. O caldo extraído é utilizado na produção de açúcar e álcool e a fibra forma o bagaço, que será queimado nas caldeiras para gerar energia (ROSA, 2012).

O caldo extraído contém impurezas solúveis e partículas sólidas em suspensão, que devem ser removidas para a produção de açúcar e obtenção de um produto com a qualidade esperada pelo mercado. A remoção de tais impurezas também é importante para produção do etanol, uma vez que quando não são removidas corretamente podem diminuir o rendimento na etapa de fermentação, dificultando o reciclo e recuperação da levedura. De modo geral, essa etapa é denominada de tratamento físico do caldo, onde os sólidos em suspensão, compostos em grande parte pelo bagacilho, são removidos em filtros. Em seguida, o caldo contendo ainda impurezas solúveis é enviado à etapa de tratamento químico (ALBARELLI, 2013).

Para o tratamento químico do caldo são utilizados produtos como o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e o ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Na produção de açúcar, é importante que ocorra, anteriormente, a etapa de neutralização do caldo. Nessa fase, o pH do caldo está entre 4,7-5,6, devendo ser corrigido até próximo a neutralidade (pH 7,0), com isso pode-se prevenir a degradação da sacarose. Para ambos os produtos são utilizados polímeros coagulantes (aniônicos ou catiônicos) em pequenas quantidades, a fim de auxiliar na reação entre o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e o ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), formando um material sólido coagulando as impurezas. A solução é deixada em um tanque de decantação, onde o caldo se torna clarificado. Diferentemente da produção de etanol, para a produção de açúcar, além dos produtos químicos citados, o caldo ainda passa por uma etapa de sulfitação, a qual ocorre por sublimação do enxofre em coluna, fazendo com que o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) produzido pelo forno seja inserido proporcionalmente ao fluxo de caldo, com a finalidade de eliminar as impurezas, como gomas e flavonoides que conferem cor ao açúcar (HAMERSKI, 2009).

O caldo clarificado possui concentração de sólidos solúveis de aproximadamente 15° Brix, logo vai para a etapa de concentração. Para a produção de açúcar, a concentração deve atingir em torno de 60° Brix, e, geralmente, é realizada em evaporadores de cinco a seis efeitos (DIAS, 2008). Enquanto que, para a produção de etanol deve possuir concentração entre 19 e 22° Brix, adequada para a fermentação (COPERSUCAR, 2010). O melaço resultante da produção de açúcar é misturado ao caldo. Caso a concentração final da mistura seja maior que a sugerida para a fermentação, adiciona-se água a solução e quando a concentração da mistura é inferior à necessária, essa deve passar por um evaporador de simples efeito para elevar a concentração (ALBARELLI, 2013).

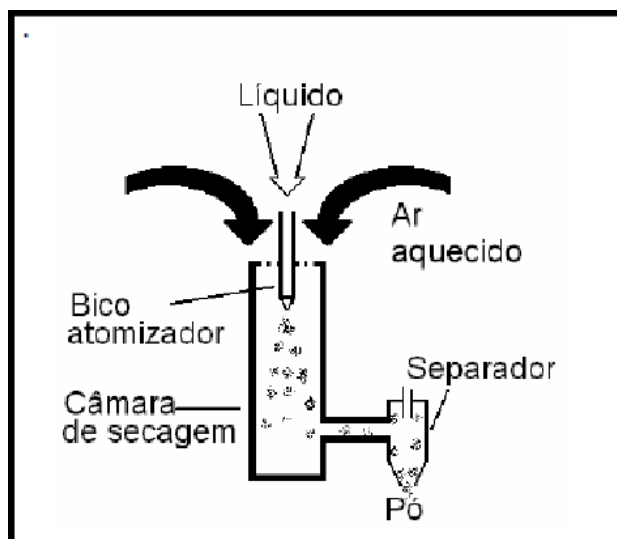
A fermentação representa a principal etapa do processo de produção do etanol. Nessa fase, os açúcares presentes no caldo são convertidos em etanol e outros subprodutos, devido a presença da levedura *Saccharomyces cerevisiae* (ALBARELLI, 2013). A levedura *Saccharomyces cerevisiae*, além de possuir elevado valor energético, apresenta um bom balanceamento de aminoácidos (LIMA, 2001).

Para a aplicação é necessário à obtenção da levedura seca. Existem várias formas para essa obtenção, dentre as quais se destaca o creme de levedura. Após a obtenção do produto úmido, é utilizada a técnica de secagem pela tecnologia *spray-dryer* (Figura 1) (FERREIRA, 1995). Este método é constituído pelo bombeamento do “leite” de levedura em uma câmara de secagem, passando por um cabeçote atomizador que, girando a altíssima rotação, atomiza o “leite” em pequenas gotículas e, combinado com o fluxo de ar quente, seca instantaneamente (AQUARONE *et al.*, 2001). Embora essa técnica exija um equipamento caro e tenha um elevado desperdício de energia, ele permite à obtenção de partículas de alta qualidade, de tamanho uniforme e forma esférica. Além disso, possibilita a secagem de produtos à pressão atmosférica, facilita a produção de grandes volumes em operação contínua utilizando-se equipamentos de fácil operação, e tem ampla aplicabilidade e flexibilidade por permitir o processamento de diversos tipos de materiais com rapidez e baixa umidade (OI, 2011). O benefício da secagem por *spray-dryer* está associado ao baixo tempo de exposição do produto a elevadas temperaturas, fazendo com que a temperatura no interior da gotícula permaneça baixa, o que pode levar a uma menor degradação dos nutrientes do produto (AZEREDO, 2004).

O produto é descarregado através de válvula rotativa, e então, pode ser armazenado na forma de “pó”, não necessitando peneirar, moer ou realizar qualquer outra operação. As partículas finas que não precipitaram e que tendem a ser arrastadas para a exaustão são recuperadas através dos ciclones (SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE CANA-DE-AÇÚCAR, 2013).

O processo de produção do etanol ocorre através do vinho produzido na fermentação com teor alcoólico entre 7-10% em massa, essa solução passa por um processo de destilação, onde é possível obter um etanol com concentração próxima a 93% em massa, conhecido também como etanol hidratado. Diferentemente, para a obtenção de etanol anidro (maior que 99% em massa), a mistura etanol-água passa por mais uma etapa de separação (CORTEZ, *et al.* 1992).

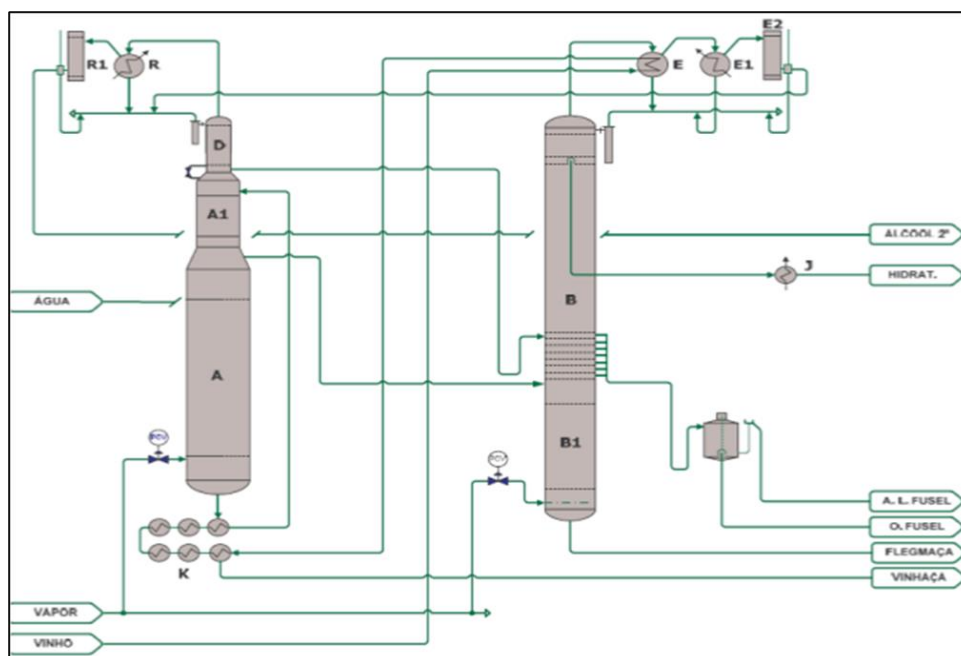
**Figura 1** - Esquema de funcionamento do *spray-dryer*.



Fonte: Reprodução de Engel *et al.* (2016).

O etanol hidratado, ainda passa por duas etapas de aquecimento para chegar à temperatura adequada à destilação. O primeiro aquecimento é realizado em um trocador de calor que utiliza o produto de topo da coluna de destilação B para atingir a temperatura do vinho de 60 °C. O segundo aquecimento utiliza um trocador tendo como fonte de aquecimento o produto de fundo da coluna A para atingir a temperatura final do vinho de 93 °C (Figura 2). A obtenção de etanol hidratado pela destilação é realizada normalmente por um conjunto de cinco colunas (MEIRELLES, 2006).

**Figura 2 - Colunas de destilação.**



Fonte: Reprodução de Meirelles (2006).

Na etapa seguinte ocorre a desidratação. O uso de peneiras moleculares para desidratação do etanol está crescendo em todo o país, por ser uma tecnologia que está disponível para o setor por diferentes fabricantes de equipamentos. Este processo consiste na separação física das moléculas de água e de etanol, através de uma coluna de adsorção utilizando zeólitas, minerais porosos com a capacidade de peneiramento e seletividade molecular, como adsorvente. A água é adsorvida na zeólita e o etanol segue seu fluxo fora da resina. O processo

conta com duas colunas de adsorção em paralelo operando em ciclos de adsorção e dessorção para recuperação do adsorvente. Este processo tem a grande vantagem de não deixar contaminantes no etanol anidro, além do baixo consumo de vapor. Entretanto, sua instalação requer um maior investimento inicial (FONSECA, 2011).

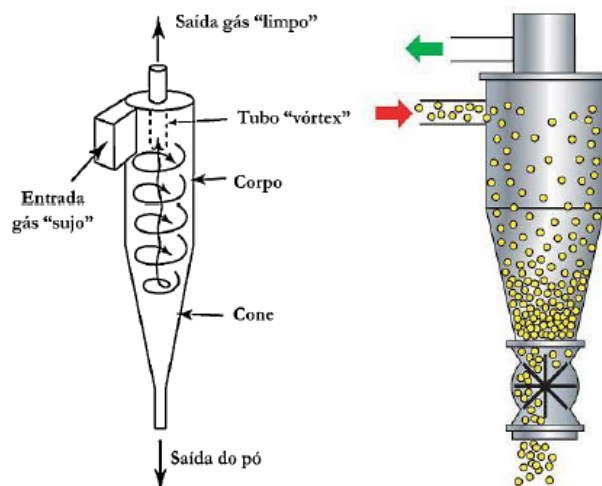
O bagaço, derivado do esmagamento da cana nas moendas, é utilizado para queima na caldeira visando à produção de vapor e, conseqüentemente, a energia para a indústria. Este bagaço é transportado por esteiras da moenda até a entrada das fornalhas. O excesso, chamado “bagaço de retorno”, é encaminhado para o pátio e armazenado para utilização futura ou comercialização com terceiro (ROSA, 2012). Para que isso seja possível, também nesta etapa se utiliza o ciclone. A secagem desses resíduos em ciclones pode auxiliar na otimização energética de uma unidade industrial. De acordo com Fonseca (2017), houve um aumento no poder calorífico e diminuição da umidade do bagaço da cana-de-açúcar após passar por um secador ciclone.

## 2.3 Ciclones

Os ciclones, também conhecidos como coletores centrífugos de poeira ou separadores ciclônicos, são utilizados desde o Egito antigo. Durante séculos suas funções foram sendo modificadas de modo a encontrar uma ampla faixa de aplicações. A partir de 1925, o uso dos ciclones foi consolidado em grande parte devido à quantidade de publicações sobre ele (LAPPLE, 1951). Atualmente, o ciclone é amplamente utilizado na separação de sólidos e gases, controle de emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis ou biomassa obtida a partir de fontes renováveis, controle da contaminação do ar, etc. (CREMASCO, 2014).

São equipamentos utilizados nas indústrias para a separação de partículas sólidas contidas em um gás (COOPER *et al.*, 1994). Além de serem compactos, possuírem uma construção simples e barata, tem como vantagens a facilidade de operação, a ausência de partes móveis e a possibilidade de uso a elevadas pressões (100 bar) e temperaturas (1000°C), que são determinadas pelo material utilizado em sua construção (YUU *et al.*, 1978). Contudo, como as partículas de menor tamanho são influenciadas pela força de arraste, pois a ação da força centrífuga torna-se negligenciável em partículas de massa reduzida, os ciclones apresentam baixa eficiência de coleta para as partículas menores que, aproximadamente, 5 µm e alta queda de pressão (DIRGO *et al.*, 1985; ACHILES, 2018). Para separar as partículas de poeira da corrente de gás, este equipamento utiliza força centrífuga, que pode variar entre 5 a 2500 vezes o seu peso. Quanto maior a velocidade de entrada do gás ou quanto menor o diâmetro de entrada do ciclone, maior será a eficiência da coleta e maior será a queda de pressão no ciclone (PAIVA, 2010). Tais equipamentos são formados por um corpo cilíndrico e cônico, dotado de uma entrada tangencial e duas saídas orientadas no eixo central (Figura 3). Sua configuração pode ser determinada por três correntes gasosas.

**Figura 3 - Movimentação em um ciclone.**



Fonte: Adaptado de Chiabai Junior, 2014).

A primeira é a alimentação, em que a corrente gasosa carregada de partículas entra tangencialmente na parte superior do equipamento; a segunda é denominada *underflow*, saindo na parte inferior do equipamento com as partículas de diâmetros maiores, consequentemente carregando uma boa parte das partículas de diâmetros menores; e a terceira corrente é formada pelo vórtex que se forma em sentido contrário a alimentação, denominada *overflow*. Esse caráter tridimensional de movimento descrito pelo gás dificulta o conhecimento exato de como é realizada a separação das partículas (CRESMASCO, 2014).

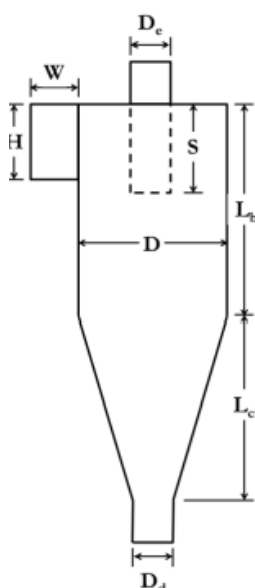
Os ciclones podem operar individualmente ou em arranjo em série ou paralelo. Ao projetar um ciclone são importantes dois parâmetros para avaliação do projeto e desempenho do equipamento, sendo eles, a eficiência de coleta de partícula e a perda de carga através do ciclone, tendo esta relação direta com os custos operacionais. O ciclone pode ser especificado pelo seu diâmetro de corte ( $D_c$ ) que é definido como sendo o tamanho da partícula para qual o ciclone possui um rendimento de 50%. Sendo assim, as partículas com diâmetros maiores que o diâmetro de corte, são coletadas com uma eficiência superior a 50% (Equação 1) (LACERDA, 2007).

$$D_c = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot N \cdot v \cdot (\rho_p - \rho)}} \quad (1)$$

Onde  $D_c$  é o diâmetro de corte,  $b$  é a largura do bocal de entrada,  $N$  é o número de voltas feitas pelo gás no interior do ciclone (igual a 5),  $v$  é a velocidade de entrada do gás no ciclone (recomenda-se usar 15 m/s),  $\mu$  é a viscosidade do gás,  $\rho_p$  é a densidade da partícula e  $\rho$  a densidade do gás (LACERDA, 2007).

Verifica-se pela Equação (1) que o  $D_c$  depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições operacionais. Estas condições operacionais dependem do tipo de ciclone a ser utilizado (CERRI, 2010), visto que esses podem ser utilizados individuais, em arranjos em série ou paralelo. As proporções existentes entre as dimensões geométricas estão diretamente relacionadas com a capacidade e o poder de classificação do equipamento (LACERDA, 2007). Geralmente, as dimensões geométricas são colocadas em formas de razão entre uma das dimensões e o diâmetro da parte cilíndrica do ciclone, sendo elas o diâmetro de corte ( $D_c$ ), a altura do bocal de entrada ( $a$ ), largura do bocal de entrada ( $b$ ), o comprimento do cilindro de saída ( $S$ ), diâmetro do duto de saída de gás ( $D_e$ ), altura da parte cilíndrica do ciclone ( $h$ ), a altura total do ciclone ( $H$ ) e o diâmetro da saída de pó ( $B$ ) (Figura 4) (CIPOLATO, 2011).

**Figura 4** - Dimensões de um ciclone.



Fonte: Reprodução de Chiabai Junior (2014).

De acordo com as dimensões, os ciclones são divididos em famílias. Estas são definidas como um conjunto específico de separadores que possuem como principais características as relações fixas entre suas medidas geométricas, a eficiência de coleta, o diâmetro de corte e a queda de pressão (Tabela 1.).

**Tabela 1.** Dimensões dos diferentes tipos de ciclones.

Razão Dimensão/Diâmetro	Famílias		
	Stairmand	Swift	Lapple
$a/D_c$	0,50	0,44	0,50
$b/D_c$	0,20	0,21	0,25
$D_e/D_c$	0,50	0,40	0,50
$S/D_c$	0,50	0,50	0,63
$h/D_c$	1,50	1,40	2,00
$H/D_c$	4,00	3,90	4,00
$B/D_c$	0,38	0,40	0,25
<b>K</b>	551,3	699,2	402,9
<b>N<sub>H</sub></b>	6,4	9,24	8,0
<b>Eficiência</b>	Média	Alta	Baixa

K = parâmetro de configuração geométrica (adimensional); N<sub>H</sub> = parâmetro de perda de carga (adimensional).

Fonte: Adaptado de Cooper *et al.* (1994).

O desempenho dos ciclones tem sido amplamente estudado na literatura, considerando diversas teorias que se baseiam em modelos simplificados ou dependem de equações empíricas, sendo válidas apenas em certas condições operacionais. Não há uma comprovação de qual modelo trabalha sob condições ótimas, visto que os ciclones têm sido desenvolvidos praticamente apenas através de procedimentos experimentais, sendo difícil provar matematicamente qual dispõe do melhor *design* (COOPER *et al.*, 1994).

A teoria de Lapple (1951) para o cálculo do diâmetro crítico é a mais conhecida dentre as que adotam a abordagem do tempo de trajetória para o cálculo de eficiência, sendo, da mesma forma, uma das teorias mais

simples que existem para isso. Lapple assumiu que a carga de sólidos que entra no ciclone encontra-se uniformemente distribuída ao longo da abertura de entrada. Uma vez estabelecida essa hipótese, é de se esperar que o diâmetro de partícula capaz de percorrer, durante o seu tempo de residência dentro do ciclone, exatamente a distância correspondente à metade da largura do bocal de entrada ( $b$ ), seja coletado com 50% de eficiência. Essa passa a ser, então, o diâmetro crítico de partícula (Equação 2).

$$b = \frac{D_c}{4} \quad (2)$$

Embora seja recomendado que se determine o valor de  $N$  experimentalmente para o caso de cada ciclone, no caso específico de seu experimento, Lapple (1951), adotou o valor de  $N = 5$ , resultando na Equação (3).

$$D_c = 13,96 \cdot \frac{v \cdot (\rho_p - \rho) \cdot D^2}{\mu} \quad (3)$$

Para um ciclone Lapple, as velocidades recomendadas situam-se na faixa de 6 e 21 m/s, sendo de 15 m/s a velocidade usualmente utilizada (MASSARANI, 1997; MALDENER, 2012). Velocidades de entrada mais altas proporcionam maior eficiência de coleta, no entanto aumenta a queda de pressão no ciclone. Portanto, é necessário fazer uma média entre maior eficiência de coleta e baixa queda de pressão no ciclone (GIMBUN *et al.*, 2005). Para averiguar se o dimensionamento está correto é considerada a relação entre as dimensões  $H$  e  $D_c$ . Caso  $H$  seja diferente de  $D_c/2$  é necessário reprojeter o ciclone (COELHO, 2012).

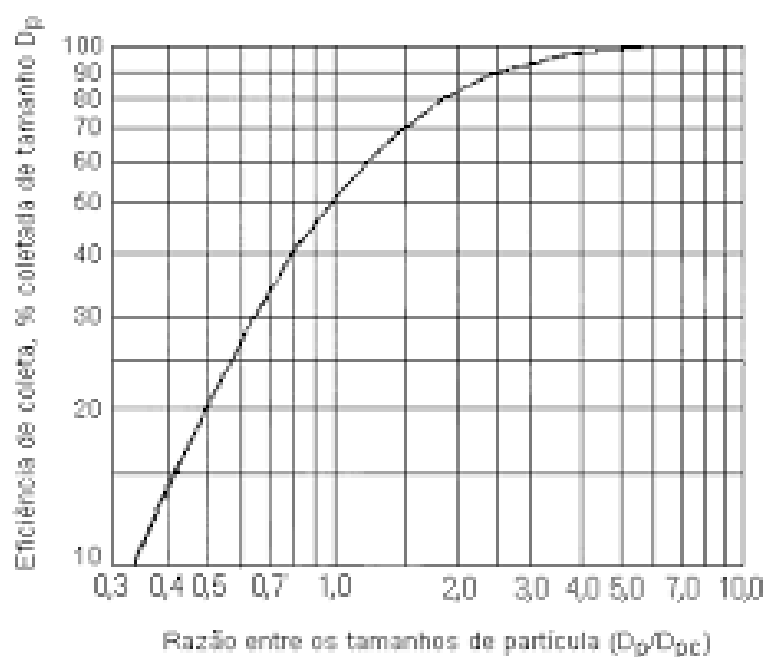
A eficiência global de separação de um ciclone é influenciada por vários fatores, como as condições de operações, as propriedades físicas do material sólido alimentado e a geometria do ciclone. O aumento da velocidade de entrada faz com que aumente a força centrífuga, aumentando assim a eficiência, porém a queda de pressão também aumenta nesse caso (SAUGO, 2013). É definida como a razão entre, a massa de sólidos retidos na saída inferior (*underflow*) e a massa de sólidos alimentados no ciclone, de acordo com a Equação 4.

$$\eta = m_s / m_e \quad (4)$$

Onde:  $\eta$  = eficiência do ciclone;  $m_s$  = vazão mássica de sólidos na saída inferior (*underflow*);  $m_e$  = vazão mássica de entrada de sólidos (CERRI, 2010).

A eficiência pode aumentar quando a concentração de sólidos aumenta, pois, as partículas mais grossas carregam as mais finas para a circunferência do ciclone, onde elas são coletadas (CERRI, 2010). A eficiência dos ciclones também pode ser medida em função dos diâmetros das partículas (Figura 5).

**Figura 5** – Eficiência de coleta em função dos diâmetros das partículas.



Fonte: Reprodução de Lapple (1951).

A perda de carga nos ciclones é importante para determinar a potência necessária ao soprador, utilizado para a movimentação da mistura gás-sólidos. Normalmente, esta perda varia de 5 a 10 cargas de velocidade, referentes à área de entrada do equipamento (MACHADO, 2007). Outro fator muito importante a se considerar na operação industrial de ciclone é o consumo de energia que está diretamente relacionado à potência do exaustor, dependendo diretamente da perda de carga efetiva em operação do ciclone. É necessário um critério técnico no balanceamento da velocidade de entrada e concentração de sólidos versus a perda de carga, para que se possa obter o adequado desempenho industrial do equipamento (CIPOLATO, 2011).

### 3. CONCLUSÃO

Desde o surgimento do ciclone, sua utilização vem crescendo cada vez mais, como em indústrias químicas, petroquímicas, têxtil, metalúrgica, nuclear e entre outras. Além das indústrias citadas, o ciclone também é encontrado em usinas sucroalcooleiras, seja para produção de levedura seca, seja para secagem do bagaço da cana. Este equipamento é amplamente utilizado para a separação de partículas sólidas contidas em um gás, além de serem compactos e possuírem uma construção simples e barata, tem como vantagens a facilidade de operação, a ausência de partes móveis e a possibilidade de uso a elevadas pressões e temperaturas. Podendo ser operado individualmente ou em arranjos de vários conectados em série ou em paralelo.

O estudo de ciclones é de grande importância para a indústria, uma vez que o baixo custo e a alta eficiência de coleta são muito favoráveis. Assim, para projetar um ciclone é importante realizar os cálculos de parâmetros geométricos e operacionais como a eficiência de coleta, queda de pressão e vazão volumétrica por meio de equações empíricas que objetivam a otimização operacional de ciclones.

### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHILES, A. E. **Avaliação experimental de um ciclone adaptado com bocais pulverizadores de água.** Dissertação (Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

AGROLINK – Eliza Maliszewski. **São Paulo é 20% do agro brasileiro**. 2019. Disponível em: [https://www.agrolink.com.br/noticias/sao-paulo-e-20--do-agro-brasileiro\\_425136.html](https://www.agrolink.com.br/noticias/sao-paulo-e-20--do-agro-brasileiro_425136.html). Acesso em: 20 de agosto de 2020.

ALBARELLI, J. Q. **Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda geração: simulação, integração energética e análise econômica**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

AQUARONE, E. *et al.* **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001. 593 p.

AZEREDO, H. M. C. de. **Fundamentos de estabilidade de alimentos**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical. 2. ed. 2004. 195 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77697/1/CLV12015.pdf>. Acesso em: 30 de setembro de 2020.

CERRI, F. F. P. **Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação ciclônica de sais de iodo na indústria química**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

CHIABAI JUNIOR, J. **Avaliação do desempenho de um ciclone stairmand adaptado com bicos injetores de água**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

CIPOLATO, C. A. **Dimensionamento, construção e análise de desempenho de ciclone para otimização da separação granulométrica de partículas em fábrica de tintas em pó**. 2011. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2011.

COELHO, P. **Ciclones industriais - Separadores ciclônicos**. 2012. Disponível em: <https://www.engquimicasantosp.com.br/2012/07/ciclones-industriais.html>. Acesso em: 04 de setembro de 2020.

CONAB. **Perfil do Setor do Açúcar e do Alcool no Brasil**. V.5, p. 1-88. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 5 de setembro de 2020.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. CONAB, V.6 - SAFRA 2019/20 - N.4 - Quarto levantamento, Brasília, 2020, p. 1-58.

COOPER, C. D. *et al.* **Air pollution control - A design approach**. United States of America: Waveland Press, 1994.

COPERSUCAR, **Álcool**. 2010. Disponível em: <http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/alcool.aspmistura>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

CORTEZ, L. *et al.* **Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização**. Revista Brasileira de Energia, v.2, n. 2, 1992.

CREMASCO, M. A., 2012, **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. Ed. Edgar Blucher, São Paulo, Brasil.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluido Mecânicos**. São Paulo: Blucher, 2014, 2. ed.

DIAS, M.O.S. **Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço**. 2008. 282 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

DIRGO, J. *et al.* **Performance of theoretically optimised cyclones**, Filtr. Sep. 22 (1985).

ENGEL, B. *et al.* **Tecnologias de atomização e desidratação: alternativas para a produção de farinhas a partir de vegetais**. Revista Jovens Pesquisadores, Santa Cruz do Sul, v. 6, n. 1, p. 31-44, 2016.

FERREIRA, E. M. F. C. **Identificação e controle adaptativo de processos biotecnológicos**. Porto, 1995. 299f. Tese (Doutoramento em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. GRANGEIRO.

FONSECA, B. E. **Automação e modelagem de um ciclone secador de partículas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

FONSECA, N. A. A. **Simulação do processo de adsorção PSA para separação da mistura etanol – água**. 2011. 155f. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Química - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

GIMBUN, J. *et al.* **The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: a CFD study**. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v. 44, n. 1, p. 7–12, 2005.

HAMERSKI, F. **Estudo de variáveis no processo de carbonatação do caldo de cana-de-açúcar**. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2009.

LACERDA, A. F. **Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2007.

LAPPLE, C. E. **Processes use many collector types**. Chemical Engineering, 58 (1951).

LIMA, U.A. *et al.* **Biotecnologia Industrial**, vol. 2 EngenhariaBioquímica; 1.<sup>a</sup> ed; cap. 9; São Paulo, SP; Editora Edgard Blücher, 2001.

MACHADO, A. P. **Otimização do processo de embalagens de polietileno**. Monografia (Engenharia Química) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2007.

MALDANER, L. H. **Uso de ciclones para coleta de material particulado gerado no beneficiamento de madeira**. Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

MASSARANI, G. **Problemas em Sistemas Particulados**. Rio de Janeiro: Editora Edgar, 1997, 77 p.

MEIRELLES, A.J.A. **Expansão da produção de bioetanol e melhoria tecnológica da destilação alcoólica**. In: FAPESP. Workshop do projeto diretrizes de políticas públicas para a agroindústria canavieira do estado de são paulo: produção de etanol. Lorena, 2006. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

MORAES, R. A. *et al.* **Desenvolvimento e construção de um ciclone para separação de partículas a partir de materiais de baixo custo**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 11, Vol. 06, pp. 16-28. Novembro de 2019.

NASTARI, P. M. **A importância do setor sucroenergético no brasil**. 2012 Revista Agroanalysis – Mercado & Negócio p. 16. 2012.

NOVOCANA. **Ranking traz as 100 cidades brasileiras que mais produziram cana-de-açúcar em 2017**. 2019. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/ranking-100-cidades-brasileiras-mais-produziram-cana-de-acucar-2017-161018>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

OL, R. K. **Secagem da biomassa de banana verde em spray-dryer**. 2011. 68 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PAIVA, J. J. D. S. **Captura de Poeiras Finas com Ciclones de Recirculação Eletrostática**. Tese (Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.

QUEDA, O. **A intervenção do estado e a agroindústria açucareira paulista**. 1972. Tese (Doutorado) Piracicaba. ESALQ/USP, 1972.

RAMOS, P. **Agroindústria Canavieira e Propriedade Fundiária no Brasil**, 1991. Tese (Doutorado em Administração). São Paulo, FGV, 1991.

REIN, P. **Cane sugar engineering**. Berlin: Verlag Dr. Albert Bartens KG, 2007. 768 p.

ROSA, C. R. **Proposta de indicadores ambientais para usinas de açúcar, etanol e energia**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2012.

SAUGO, D. **Ciclone associado a filtro de manga para remoção material particulado de unidade de recebimento de milho**. Monografia (Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2013.

SEBRAE - **Cadeia produtiva da indústria sucroalcooleira**. Recife, 2008. Disponível em: <http://189.39.124.147:8030/downloads/sucroalcooleira.pdf>. Acesso em: 04 de setembro de 2020.

SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE CANA-DE-AÇUCAR, 17., 2013. Olinda. Olinda: Centro de Convenção de Pernambuco.

VENTEC, A. **Manual Técnico de Instalação, Operação e Manutenção – Multiciclone**. p. 1-7.2008.

VIAN, C. E. F. **Agroindústria canavieira: estratégia competitivas e modernização**. Campinas: Editora Átomo, 2003.

YUU, S. *et al.* "The Reduction of Pressure Drop due to Dust Loading in a Conventional Cyclone", Chem. Eng. Scie., Vol. 33, 1978.