

METODOLOGIA E FERRAMENTA PARA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS PARA CONTROLE DA EMISSÃO DE PARTICULADOS EM CALDEIRAS A BAGAÇO

Flávio Neves Teixeira

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos (NEST/DME/IEM/EFEI)
Av. BPS 1303, CP50, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil, 37.500-903
flavio@iem.efei.br

Electo Eduardo Silva Lora

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos (NEST/DME/IEM/EFEI)
Av. BPS 1303, CP50, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil, 37.500-903
electo@iem.efei.br

***Resumo.** O Proalcohol (Programa Nacional do Álcool), criado em 1975 pelo Governo Brasileiro para reduzir a importação de petróleo, é no mundo, uma importante iniciativa para substituir combustíveis fósseis por um combustível alternativo e renovável: o álcool carburante. A nova legislação normativa do setor elétrico (com a regulamentação da compra de excedentes de energia elétrica de autoprodutores) abre boas perspectivas de contribuição pelo setor sucroalcooleiro ao setor elétrico e, em última análise, ao país. Também se deve considerar que, de acordo com as tendências da Legislação Ambiental Brasileira, os padrões de emissão para poluição atmosférica levam à necessidade da caracterização dos particulados e da implantação de equipamentos de controle dos mesmos. Sendo assim, este trabalho apresenta uma metodologia que permite avaliar diferentes opções de sistemas de controle de material particulado (multiciclones e lavadores de gás) sob o ponto de vista técnico-econômico: determina-se a eficiência final de remoção de partículas, os custos de instalação e operação e, finalmente, o custo do tratamento de 1 m³ de gás. Apresenta-se resultados obtidos utilizando-se a metodologia proposta, para uma distribuição granulométrica típica de particulados.*

***Palavras chave:** emissões de particulados, caldeiras a bagaço, multiciclones, lavadores de gás*

1. Introdução

O Proálcool (Programa Nacional do Álcool), criado em 1975 pelo Governo Brasileiro para reduzir a importação de petróleo, é, no mundo, uma importante iniciativa para substituir combustíveis fósseis por um combustível alternativo e renovável: o álcool carburante. Analisando-se o Balanço Energético Brasileiro, nota-se que a cana de açúcar é uma das principais fontes energéticas do país, contribuindo com cerca de 10 % da oferta interna de energia. Esta relevante utilização de biomassa sucroalcooleira no Brasil distingue o país como o detentor de um dos mais importantes programas de energia renovável do planeta. Porém, o preço baixo e constante do petróleo no mercado internacional nos últimos anos e a desordem empresarial e institucional nacional, associado à ausência de um planejamento e de uma legislação coerente, tem provocado uma forte instabilidade naquele que pode representar um dos maiores programas de combustível alternativo e renovável, geração de empregos e redução líquida das emissões de carbono. Há de se ressaltar que toda essa tecnologia não pode e não deve ser abandonada apenas porque hoje os preços do petróleo estão baixos ou em função da aparente tranqüilidade política a nível internacional. Basta analisar projeções para o preço futuro do petróleo para concluir que, no mínimo o seu valor será mais alto do que o praticado atualmente.

O setor sucroalcooleiro é constituído pelas usinas, produtoras de açúcar e álcool (ou somente açúcar) e pelas destilarias (produtoras apenas de álcool). De uma forma geral, no processo de fabricação de açúcar e/ou álcool, há necessidade de energia mecânica para o acionamento dos equipamentos de preparo da cana e das moendas, de energia elétrica e de calor de processo (vapor d'água). O vapor é produzido nas caldeiras que queimam o bagaço de cana e é alimentado nas turbinas acionadoras das moendas e nos turbo geradores, para produção de energia mecânica e elétrica, respectivamente. O escape das turbinas de contrapressão, ou vapor de baixa pressão, serve para abastecer as necessidades de calor de processo.

Deve-se mencionar que a produção e consumo de energia geram diferentes tipos de impactos sociais e ambientais, dependendo da fonte primária escolhida e das respectivas tecnologias de conversão adotadas. Quando se fala da poluição do ar na indústria sucroalcooleira pensa-se principalmente na emissão de particulados e de óxidos de nitrogênio.

Porém não podemos esquecer de outros problemas de maior gravidade como é o caso do efeito estufa, em cuja solução a indústria sucroalcooleira pode dar uma contribuição importante como produtora de combustíveis líquidos e eletricidade de origem renovável. A substituição de combustíveis e eletricidade de origem fóssil por similares oriundos da cana de açúcar, contribui para a redução líquida da emissão de CO₂ (um dos agentes precursores do efeito estufa) e outros poluentes (por exemplo os óxidos de enxofre, tendo em vista que na composição do bagaço praticamente não existe o seu precursor - o enxofre). Assim o aspecto energético da cana de açúcar, além de ter uma importância econômica indiscutível, apresenta também vantagens ambientais que devem ser consideradas.

A maior necessidade de controle de emissões em caldeiras a bagaço é com o material particulado. Os equipamentos mais utilizados para o seu controle são:

- coletores mecânicos (ciclones e multiciclones);
- separadores úmidos (lavadores de gás - scrubbers);
- filtros de mangas;
- precipitadores eletrostáticos.

No Brasil poucas usinas adotam alguma medida de controle da emissão de particulados, embora exista a tendência de limitar estas emissões em 120 mg/Nm³, valor este somente alcançado com a utilização de métodos de controle. As poucas que empregam, utilizam ciclones (multiciclones) ou lavadores, onde os últimos mostram mais perspectivas. A não utilização de filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos se deve principalmente aos maiores custos de instalação, operação e manutenção no momento. Além disso, os filtros de manga também apresentam perigo de incêndio devido ao alto teor de carbono não queimado nas cinzas e arrastados junto aos gases.

Dessa forma, este trabalho apresenta uma metodologia que permite avaliar diferentes opções de sistemas de controle (multiciclones, lavador de gás tipo venturi e associação dos mesmos, ou seja, a utilização de multiciclones, para uma remoção “grossa”, e posterior tratamento no lavador de gás) sob o ponto de vista técnico-econômico: através da composição do bagaço e dos parâmetros operacionais da caldeira, determina-se a vazão de gases produzida. Conhecida a composição granulométrica dos particulados (tamanho das partículas e fração em massa) determina-se a eficiência por frações e total de remoção de partículas, para cada equipamento avaliado. Posteriormente, os custos de instalação e operação são avaliados e, finalmente, determina-se, para cada variante, o custo do tratamento de 1 m³ de gás, a fim de se selecionar qual deles apresenta o melhor desempenho, segundo diferentes parâmetros: eficiência de remoção (concentração final de particulados), perda de carga, consumo de água (no caso dos lavadores) e custos de tratamento.

2. Fundamentos do controle da emissão de particulados

Os particulados constituem um dos principais poluentes do ar. As partículas apresentam uma grande diversidade em tipos e tamanhos: elas podem estar tanto em gotículas líquidas como também na poeira seca, com uma grande variedade de propriedades físicas e químicas. Existem várias fontes de emissão dos particulados incluindo os processos industriais com e sem combustão, atividades de mineração ou construção, veículos automotores e refugos de incineração. As fontes naturais de particulados incluem os vulcões, incêndio em florestas, vendavais (tufões, tornados) entre outros. Além disso, emissões gasosas primárias podem reagir na atmosfera para formar espécies secundárias que nucleadas irão formar partículas condensáveis.

Antes de atentar para o projeto ou especificação de qualquer dispositivo de coleção de particulados, informações claras e fundamentadas sobre as partículas devem ser obtidas, bem como do fluxo dos gases e das condições do processo. Características importantes dos particulados incluem tamanho, distribuição granulométrica, tipo, densidade, espessura, corrosividade, reatividade e toxicidade. Características da corrente de gases de importância são a pressão, temperatura, viscosidade e umidade. Condições de processo incluem os parâmetros de operação da caldeira, vazão de gás, a carga de particulados (concentração em massa das partículas na corrente do gás), requerimentos de eficiência de remoção e queda de pressão (perda de carga) admissível.

3. Metodologia

A vazão de gases é determinada a partir da composição química elementar (base seca) do bagaço e do excesso de ar. Primeiramente calcula-se o consumo de bagaço Eq. (1), e a seguir o volume de gases produzido pela combustão de 1 kg de combustível. O produto destas grandezas é a vazão total de gases, que deve ser corrigida para a temperatura de saída dos gases Eq. (2).

$$\dot{m}_{\text{bag}} = \frac{Q}{\eta_{\text{cald}} \cdot \text{PCI}} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_{aa})}{\eta_{\text{cald}} \cdot \text{PCI}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\text{gases}} = \left(\frac{T_{\text{gas}} + 273}{273} \right) \cdot V_{\text{gasreal}} \cdot \dot{m}_{\text{bag}} = \left(\frac{T_{\text{gas}} + 273}{273} \right) \cdot V_{\text{gasteorico}} \cdot 1,0161 \cdot (E_{\text{ar}} - 1) \cdot V_{\text{ar}} \cdot \dot{m}_{\text{bag}} \quad (2)$$

sendo: (maiores detalhes podem ser vistos em Lora, 2001)

m_{bag} : consumo de bagaço [kg/s];

Q : calor absorvido pela água na caldeira [kW];

m_v : vazão de vapor na caldeira [kg/s];

h_v e h_{aa} : entalpias do vapor e água de alimentação, respectivamente, [kJ/kg];

η_{cald} : eficiência da caldeira;

PCI: poder calorífico inferior [kJ/kg];

m_{gases} : vazão total de gases corrigida para a temperatura de saída dos gases [m^3/s];

T_{gas} : temperatura de saída dos gases [$^{\circ}\text{C}$];

V_{gasreal} , $V_{\text{gas teóric}}$ e V_{ar} : volume de gás real e teórico e de ar, respectivamente, da queima de 1 kg de bagaço [m^3/kg];

E_{ar} : coeficiente de excesso de ar;

3.1. Metodologia para o cálculo de multiciclones: baseado em Licht (1988), Benítez (1993), Cooper and Alley (1994) e Lora (2001)

Para o cálculo da redução da concentração de particulados com multiciclones, quatro opções de configurações adimensionais padrões estão disponíveis, conforme a Tab. (1) e Fig. (1).

Tabela 1. Configurações padrão de um ciclone

Opção	Dimensões relacionadas ao diâmetro do corpo do ciclone - D_c (Vide Fig. (1))									
	$K_a=a/D_c$	$K_b=b/D_c$	$K_S=S/D_c$	$K_{D_e}=D_e/D_c$	$K_H=H/D_c$	$K_h=h/D_c$	$K_B=B/D_c$	NH	K	
Stairmand	0,5	0,2	0,5	0,5	4	1,5	0,375	6,4	551,3	
Lapple	0,5	0,25	0,625	0,5	4	2	0,25	8	402,9	
Swift	0,44	0,21	0,5	0,4	3,9	1,4	0,4	9,24	699,2	
Petterson&Witby	0,583	0,208	0,583	0,5	3,17	1,333	0,5	7,76	342,3	

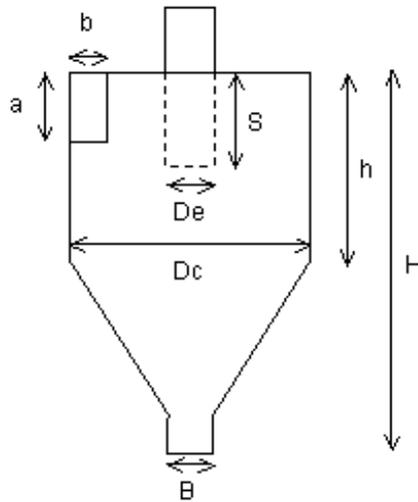


Figura 1. Dimensões de um ciclone relacionadas com a Tab. (1)

O cálculo da eficiência por frações e total é realizada segundo as Eq. (3) e (4), respectivamente, enquanto que a concentração de partículas na saída pela Eq. (8).

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \cdot \left[\frac{K \cdot m_{\text{gases},i} \cdot \tau}{M \cdot N_c \cdot D_c^3} \right]^{\frac{M}{2}} \right\} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{total}} = \sum_{i=1}^j W_i \cdot \eta_i \quad (4)$$

sendo:

η_i : eficiência de coleção de uma partícula de diâmetro i ;

$m_{gases,i}$: vazão de gases em cada ciclone (corresponde à vazão total de gases dividida pelo número de ciclones) [m^3/s];

$$\tau = \frac{\rho_{part} \cdot d_{p,i}^2}{18 \cdot \mu_{gas}} \quad (5)$$

ρ_{part} : massa específica da partícula [kg/m^3];

$d_{p,i}$: diâmetro i da partícula (para uma distribuição granulométrica, $i = 1, \dots, j$);

μ_{gas} : viscosidade cinemática do gás [$kg/m \cdot s$];

$$M = \frac{1}{m + 1} \quad (6)$$

$$m = 1 - \left(1 - 0,67 \cdot D_c^{0,14}\right) \cdot \left(\frac{T_{gas} + 273}{283}\right)^{0,3} \quad (7)$$

N_c : número de ciclones;

D_c : diâmetro do ciclone;

η_{total} : eficiência total de coleção;

W_i : fração em massa de cada partícula de diâmetro i ;

$$C_{saida,total} = \sum_{i=1}^j C_{saida,i} = \sum_{i=1}^j C_{entrada} \cdot W_i \cdot (1 - \eta_i) \quad (8)$$

sendo:

$C_{saida,total}$: concentração final das partículas na saída do multiciclone [mg/m^3];

$C_{saida,i}$: concentração na saída do multiciclone para cada partícula de diâmetro i [mg/m^3];

$C_{entrada}$: concentração do gás na entrada do multiciclone [mg/m^3];

A perda de carga nos multiciclones, parâmetro que define o consumo de energia elétrica do sistema de coleção, é dada pela Eq. (9). A potência necessária para “vencer” esta restrição é apresentada na Eq. (10), e que define o custo operacional com energia elétrica do sistema, baseado no número de horas de operação.

$$\Delta P = \frac{N_H \cdot \rho_{gas} \cdot m_{gases}^2}{2 \cdot K_a^2 \cdot K_b^2 \cdot N_c^2 \cdot D_c^4} \quad (9)$$

sendo:

ΔP : perda de carga [Pa];

ρ_{gas} : massa específica do gás [kg/m^3];

$$\dot{W}_{elet} = \frac{m_{gases} \cdot \Delta P}{\eta_{vent}} \quad (10)$$

sendo:

η_{vent} : eficiência do ventilador de tiragem.

Esta metodologia foi implementada em um software, cujo valor do número de ciclones e de seus respectivos diâmetros, é otimizado baseando-se na metodologia proposta por Benítez (1993), que utiliza os valores de custo de instalação (Eq. (11)) e operação (este subdividido em custo de recuperação de capital e custo com energia elétrica), associado a parâmetros de projeto. Desta forma é possível estimar o projeto mais econômico de uma instalação de multiciclones minimizando-se o custo anual total, que, em outras palavras, é o valor do diâmetro do ciclone que “zera” a Eq. (12).

$$C_{inst} = 7000 \cdot N_c \cdot a \cdot b + 72 \cdot N_c \quad (11)$$

$$C_{an,tot} = K_1 \cdot N_c \cdot K_a \cdot K_b \cdot D_c^2 + \frac{K_2 \cdot t \cdot N_H \cdot \rho_{gas} \cdot \dot{m}_{gases}^3}{2 \cdot \dot{W}_{elet} \cdot K_a^2 \cdot K_b^2 \cdot N_c^2 \cdot D_c^4} + K_3 \cdot N_c \quad (12)$$

sendo:

a, b, K_a e K_b : dimensões e parâmetros adimensionais do ciclone (vide Tab. 1 e Fig. 1)

C_{inst} : custo do equipamento mais instalação [R\$];

$C_{an,tot}$: custo operacional anual total da instalação [R\$/ano];

K_1 : fator de recuperação de capital vezes a parte do custo instalado que é proporcional a área de entrada e ao número de ciclones [R\$/ano·m²];

K_2 : custo com energia elétrica [R\$/kWh];

K_3 : fator de recuperação de capital vezes a parte do custo instalado que é proporcional ao número de ciclones [R\$/ano];

t: número de horas anual de operação da instalação [h/ano]

3.2. Metodologia para o cálculo de lavadores de gás tipo venturi: baseado em Licht (1988), Cooper and Alley (1994) e Lora (2001)

Para o cálculo da eficiência por frações e total de um lavador de gás tipo venturi, adotou-se a seguinte metodologia. Primeiro, calcula-se a vazão de água relacionando-se a vazão de gases e a relação líquido/gás, conforme Eq. (13). Posteriormente calcula-se a velocidade média da mistura gás/água no venturi (Eq. (14)). Conhecida esta relação, deve-se então determinar o diâmetro da gota (D_{gota}) através da Eq. (15). Antes de calcular a eficiência, deve-se determinar o número de Knudsen (Kn), Eq. (16), o fator de Cunningham (F_C), Eq. (17), o número de Reynolds (Re), Eq. (18), o coeficiente da força de arraste (C_D), Eq. (19), o valor de B, Eq. (20) e o fator parâmetro inercial (F_i), Eq. (21).

$$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_{gas} \cdot (L/G) \quad (13)$$

sendo:

\dot{m}_{agua} : vazão de água no venturi do lavador [m³/s];

(L/G): relação do volume de água e do volume de gás no venturi do lavador [m³/m³]

$$v_{garg} = 0,752 \cdot v_{gas} \quad (14)$$

$$D_{gota} = \frac{42,19 + 3,6 \cdot 10^9 \cdot (L/G)^{1,932}}{(v_{garg})^{1,602}} \quad (15)$$

sendo:

v_{garg} : velocidade média da mistura gás/água no venturi [m/s];

v_{gas} : velocidade do gás na garganta do venturi, [m/s];

D_{gota} : diâmetro da gota de água após a atomização, [mm];

$$Kn = \frac{2 \cdot 0,1145 \cdot \frac{\mu_{gas}}{P_{gas} \cdot \sqrt{PM_{gas}/T_{gas}}}}{d_{p,i}} \quad (16)$$

$$F_C = 1 + Kn \cdot \left(1,257 \cdot 0,4 \cdot \exp \left[-\frac{1,1}{Kn} \right] \right) \quad (17)$$

$$Re = \frac{D_{gota} \cdot v_{garg} \cdot \rho_{gas}}{\mu_{gas}} \quad (18)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}} \quad (19)$$

$$B = \left(\frac{L}{G} \right) \cdot \frac{\rho_{\text{gota}}}{\rho_{\text{gas}} \cdot C_D} \quad (20)$$

$$F_i = \frac{F_C \cdot \rho_{\text{part}} \cdot d_{p,i}^2 \cdot v_{\text{garg}}}{9 \cdot \mu_{\text{gas}} \cdot D_{\text{gota}}} \quad (21)$$

$$\frac{\ln P_i}{B} = \frac{1}{F_i \cdot (1 - u_t) + 0,7} \cdot \left(4 \cdot F_i \cdot (1 - u_t)^{1,5} + 4,2 \cdot (1 - u_t)^{0,5} - 5,02 \cdot F_i^{0,5} \cdot \left(1 - u_t + \frac{0,7}{F_i} \right) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{F_i \cdot (1 - u_t)}{0,7} \right)^{0,5} \right) - \frac{1}{F_i + 0,7} \cdot \left(4 \cdot F_i + 4,2 - 5,02 \cdot F_i^{0,5} \cdot \left(1 + \frac{0,7}{F_i} \right) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{F_i}{0,7} \right)^{0,5} \right) \quad (22)$$

$$u_t = 2 \cdot \left(1 - x^2 - x \cdot \sqrt{x^2 - 1} \right) \quad (23)$$

$$x = 1 + \frac{3 \cdot L_{\text{garg}} \cdot C_D \cdot \rho_{\text{gas}}}{16 \cdot D_{\text{gota}} \cdot \rho_{\text{gota}}} \quad (24)$$

$$L_{\text{garg}} = \frac{2 \cdot L_{\text{ad,garg}} \cdot D_{\text{gota}} \cdot \rho_{\text{gota}}}{3 \cdot C_D \cdot \rho_{\text{gas}}} \quad (25)$$

sendo:

ρ_{gota} : massa específica da gota [kg/m^3];

ρ_{gas} : massa específica do gás [kg/m^3];

P_{gas} : pressão do gás [Pa];

PM_{gas} : peso molecular do gás [kg/mol];

L_{garg} : o comprimento da garganta [m]

$L_{\text{garg,ad}}$: comprimento adimensional da garganta [m]

Finalmente, pode-se então calcular a penetração das partículas, ou seja, a fração de partículas não coletada. Este valor deve ser calculado para cada diâmetro i (Eq. (26)) e, subtraindo-se de 100 %, tem-se então a eficiência por frações (Eq. (27)) e, enfim, considerando a fração em peso de cada partícula de diâmetro i , tem-se a eficiência total de coleção (Eq.(28)). A concentração final de partículas no gás é calculada da mesma forma como descrito para multiciclones (Eq. (8)).

$$P_i = \exp \left(\frac{\ln P_i}{B} \cdot B \right) \quad (26)$$

$$\eta_i = 1 - P_i \quad (27)$$

$$\eta_{\text{total}} = \sum_{i=1}^j W_i \cdot \eta_i \quad (28)$$

Um dos principais parâmetros de medida do desempenho de lavadores de gás é o valor de sua perda de carga. O seu cálculo é realizado segundo a Eq. (29). A potência necessária para “vencer” esta perda de carga é calculada conforme apresentada na Eq. (10), e também define o custo operacional com energia elétrica do sistema ,baseado no número de horas de operação.

$$\Delta P = \rho_{\text{gota}} \cdot v_{\text{garg}}^2 \cdot \left(\frac{L}{G} \right) \cdot u_t \quad (29)$$

sendo:

ΔP : perda de carga no lavador [Pa];

4. Estudos de casos

Conforme já mencionado, para se alcançar uma concentração de 120 mg/Nm³ de particulados nos gases de exaustão de uma caldeira a bagaço, torna-se necessário instalar equipamentos de controle. Baseado nas metodologias descritas anteriormente, a seguir é feita uma análise de uma caldeira a bagaço, cuja distribuição granulométrica dos particulados é conhecida. Os resultados permitem orientar entre a escolha dos diferentes sistemas avaliados, a saber:

- multiciclone tipo Swift;
- lavador de gás tipo venturi;
- multiciclone tipo Petterson&Witby

Os dados da composição química elementar do bagaço e de operação da caldeira considerados são apresentados, respectivamente, nas Tab (2) e (3). A Tab. (4) mostra os dados da granulometria do particulado considerado, ou seja, o tamanho das partículas e a fração em massa de cada diâmetro (d_{pi}) da partícula (neste caso, $i = 1, \dots, 12$). A figura representa o percentual em massa acumulado para cada diâmetro d_{pi} .

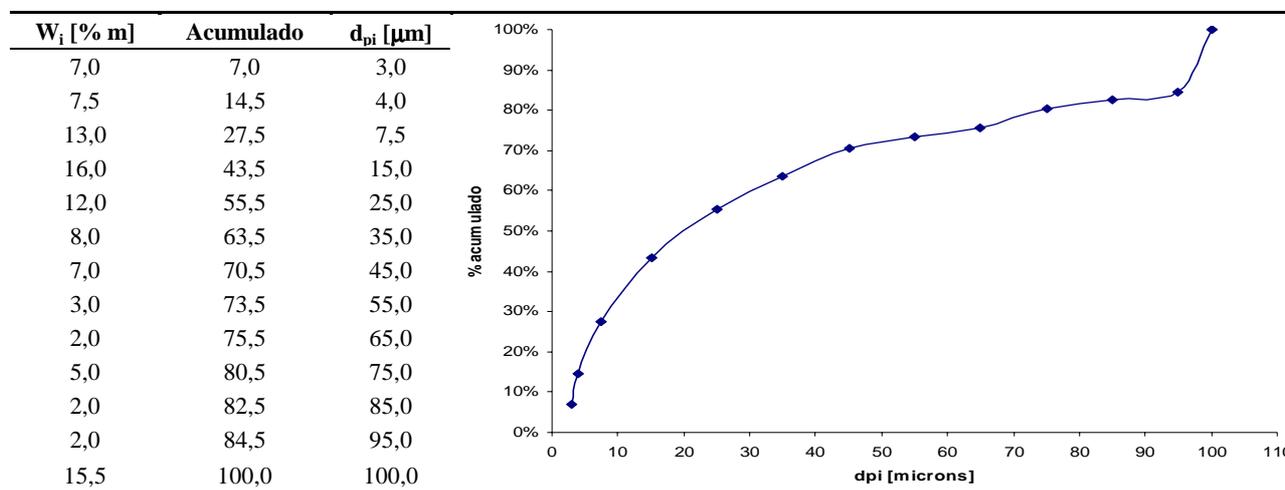
Tabela 2. Composição elementar de referência (base seca) e poder calorífico do bagaço

Elemento	Valor	Unidade
Carbono	46,79	%
Hidrogênio	5,99	%
Enxofre	0,34	%
Oxigênio	43,13	%
Nitrogênio	0,20	%
Cinzas	3,55	%
Umidade	49,60	%
Sacarose	1,7	%
PCI	7.948	kJ/kg

Tabela 3. Parâmetros de operação da caldeira

Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão de vapor na caldeira	80,0	t/h
Temperatura da água de alimentação da caldeira	101	°C
Pressão do vapor na saída da caldeira	2,0	MPa
Temperatura do vapor na saída da caldeira	300	°C
Eficiência da caldeira	85	%
Calor necessário	49.306	kW
Coeficiente de excesso de ar	1,45	-
Temperatura dos gases na saída	170	°C
Vazão de gases (corrigido para a temperatura saída)	41,75	m ³ /s
Concentração de partículas nos gases de exaustão da caldeira	10.000	mg/Nm ³

Tabela 4. Granulometria do particulado



A Fig. (2) representa a eficiência por frações para cada equipamento considerado. Na Tab. (5) mostram-se os valores de desempenho de cada alternativa avaliada, ou seja, eficiência total, concentração na entrada e concentração na saída. Deve-se salientar que a concentração de entrada no lavador associado ao multiciclone é o valor da concentração de saída do multiciclone Peterson. Pode-se constatar que apenas os lavadores de gás conseguem atingir um valor de concentração final de 120 mg/m³. A variação na concentração final de cada partícula em função de seu diâmetro é apresentada nas Figs. (3), (4), (5), e (6).

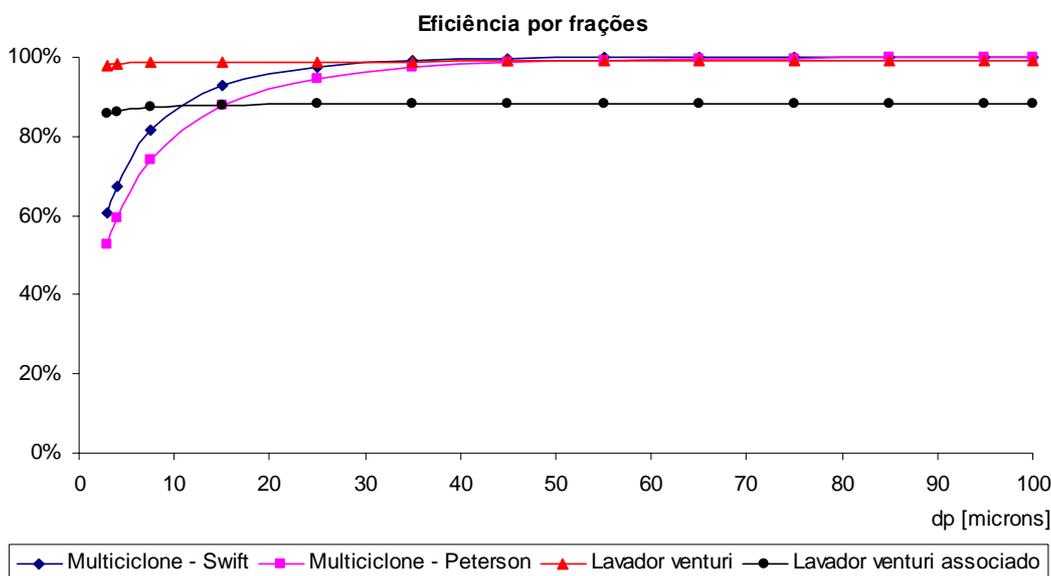


Figura 2. Eficiência por frações

Tabela 5. Valores de desempenho para cada equipamento avaliado

Multiciclone Swift	Eficiência total [%]	90,9
	Concentração na entrada [mg/Nm ³]	10.000,0
	Concentração na saída [mg/Nm ³]	911,3
Multiciclone Peterson	Eficiência total [%]	87,4
	Concentração na entrada [mg/Nm ³]	10.000,0
	Concentração na saída [mg/Nm ³]	1264,0
Lavador venturi	Eficiência total [%]	98,8
	Concentração na entrada [mg/Nm ³]	10.000,0
	Concentração na saída [mg/Nm ³]	120,0
Lavador venturi/multiciclone	Eficiência total [%]	86,8
	Concentração na entrada [mg/Nm ³]	1.264,0
	Concentração na saída [mg/Nm ³]	120,0

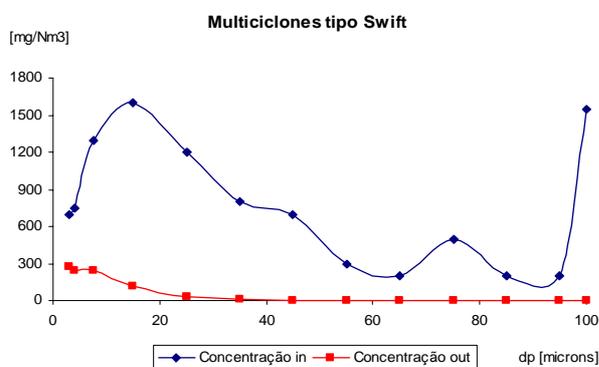


Figura 3. Variação entre a concentração na entrada (in) e na saída (out) para o multiciclone tipo Swift em função do tamanho das partículas

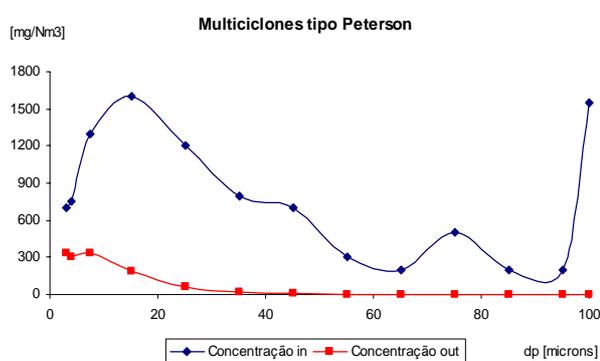


Figura 4. Variação entre a concentração na entrada (in) e na saída (out) para o multiciclone tipo Peterson em função do tamanho das partículas

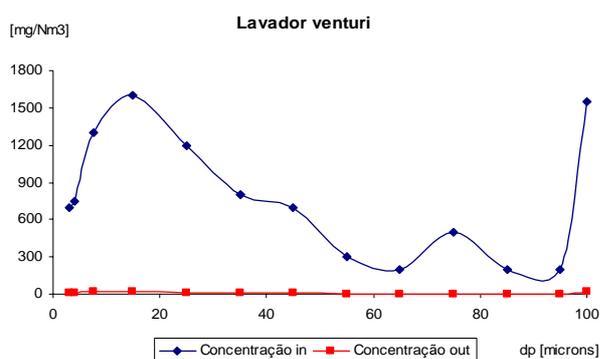


Figura 5. Variação entre a concentração na entrada (in) e na saída (out) para o lavador tipo venturi em função do tamanho das partículas

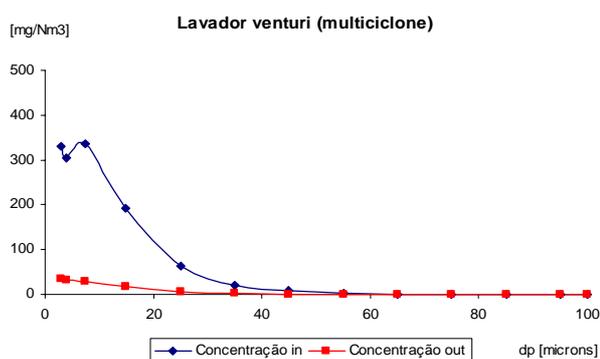


Figura 6. Variação entre a concentração na entrada (in) e na saída (out) para o lavador tipo venturi associado ao multiciclone tipo Peterson em função do tamanho das partículas

A fim de se verificar a variação no número de ciclones em função da variação do custo da eletricidade, análises de sensibilidade foram realizadas. A Fig (7) apresenta o resultado do cálculo de otimização para o caso em que se diminui o preço da eletricidade em 10 % e quando se aumenta até 20 % com relação ao valor utilizado nos cálculos (o número de ciclones tipo Swift para a condição “ótima” foi de 242 células com 0,39 m de diâmetro e uma perda de carga de 518 Pa). Como era de se esperar, com a eletricidade ficando mais cara, tende a aumentar o número de multiciclones e com isso reduzir a perda de carga.

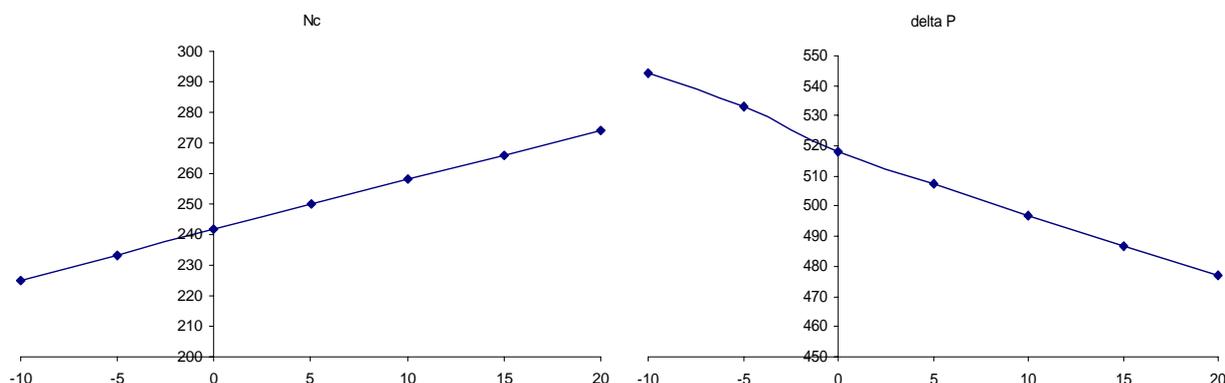


Figura 7. Variação do número de ciclones (Nc) e da perda de carga (deltaP) em função do custo da eletricidade.

Para o lavador, avaliou-se como se comporta a perda de carga, variando-se a velocidade do gás de 40 m/s (valor utilizado nos cálculos) para 60 e 80 m/s e para diferentes relações líquido/gás (o valor de “referência” foi de 2,04 litros de água para cada m³ de gás), e mostrada na Fig. (8). Os pontos no gráfico representam 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,04, 2,5, 3,0, 3,5 e 4,0 l/m³. Pode-se constatar que na medida em que se aumenta a velocidade do gás, para uma dada relação líquido/gás, a perda de carga também aumenta ao custo de uma pequena redução na eficiência. Deve-se salientar que o aumento da quantidade de água deve ser visto como desfavorável, tendo em vista a disponibilidade e o custo do tratamento posterior desta.

Finalmente, na Tab. (6), é apresentado o custo do tratamento para as variantes analisadas. Pode-se notar que o custo de tratamento com multiciclones é menor e que também são bem mais baratos do que o lavador, porém não atendem ao valor de concentração final desejado. Tendo em vista que a perda de carga nos lavadores é bem maior do que nos multiciclones, o custo operacional dos mesmos é superior. Com relação ao custo de tratamento de 1 m³ de gás, constata-se que a variante que apresenta o menor valor é a que emprega multiciclones associado ao lavador de gás.

Tabela 6. Cálculo do custo específico de tratamento de 1 m³ de gás

	Vazão de gases [m ³ /s]	Custo equipamento [R\$]	Custo operacional total anual [R\$/ano]	Custo do equipamento para 1 m ³ de gás [R\$/m ³ /s]	Custo específico do tratamento de 1 m ³ de gás [R\$/m ³]
Swift	41,75	180.383	60.447	4.321	5,03E-05
Peterson	41,75	154.796	48.729	3.708	4,05E-05
Lavador	41,75	1.542.240	565.020	36.940	4,70E-04
Lavador/Peterson	41,75	1.697.036	550.978	40.648	4,58E-04

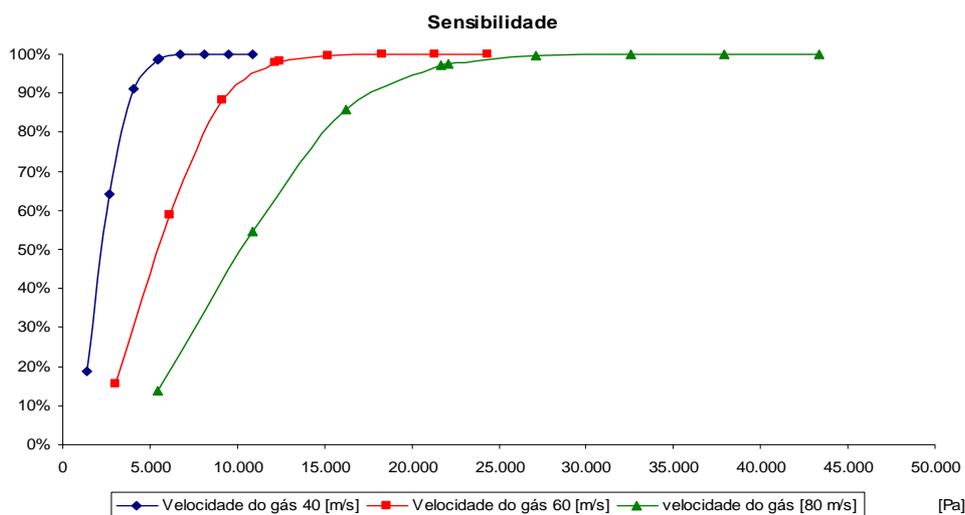


Figura 8. Variação da perda de carga e eficiência do lavador tipo ciclone com relação a velocidade do gás e a relação líquido/gás

Deve ser mencionado que durante os cálculos econômicos, o custo operacional considera 8.000 h/ano, 5 % ao ano do custo total com equipamentos para O&M, vida útil da instalação de 20 anos e taxa de atratividade de 15 %.

5. Conclusões

A otimização do projeto de um multiciclone, com relação ao número de ciclones e ao diâmetro dos mesmos, deve ser realizada levando-se em consideração as dimensões padrões, o requerimento de eletricidade e o investimento. A relação entre estes parâmetros é dada pela perda de carga e pela concentração final de partículas.

Dois fatores devem ser tomados em consideração durante o projeto de um lavador de gás: a relação (L/G) e a queda de pressão na garganta do venturi.

O multiciclone conectado a um lavador de gás é a variante que apresenta o menor custo específico de tratamento de 1 m³ de gás, considerando a necessidade de uma concentração final de 120 mg/ Nm³.

6. Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho contou com o apoio da CAPES, através de uma bolsa de doutorado.

7. Referências

- Benítez, J., "Process Engineering and Design for Air Pollution Control", PTR Prentice Hall, 1993;
 Cooper, C.D., Alley, F.C., "Air Pollution Control - A Design Approach", Waveland Press, Inc., 1994;
 Licht, W., "Air Pollution Control Engineering: Basic Calculations for Particulate Collection", Marcel Dekker Inc., 1988;
 Lora, E.S., "Controlling Air Quality in the Sugar Cane Industry", bilingual, Bartens, 2001;

METHODOLOGY AND TOOL FOR EMISSION CONTROL EQUIPMENTS SELECTION FOR PARTICULATE MATTER IN BAGASSE BOILER

Flávio Neves Teixeira

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos (NEST/DME/IEM/EFEI)
 Av. BPS 1303, CP50, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil, 37.500-903
flavio@iem.efei.br

Electo Eduardo Silva Lora

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - Núcleo de Estudos em Sistemas Térmicos (NEST/DME/IEM/EFEI)
 Av. BPS 1303, CP50, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil, 37.500-903
electo@iem.efei.br

Abstract: The Proalcool (Brazil Alcohol Program), created in 1975 by the Brazilian Government to reduce the petroleum import, is in the world, an important initiative to substitute fossil fuels for an alternative and renewable fuel: the alcohol fuel. The new normative legislation of the electric sector (with the regulation of the purchase of surpluses of electric power from autoproducers)

opens good perspectives for the contribution of the alcohol sector to the electric sector and to the country. It may also consider that, in agreement with the tendencies of the Brazilian Environmental Legislation, the emission patterns for atmospheric pollution take to the need of these emissions characterization and of the implementation of equipments for its control. Considering the exposed above, this work presents a methodology that allows to evaluate different options of particulate control systems (multicyclones and gas scrubbers) under the technical and economical viewpoint: it is determined the global removal efficiency of particles, the built-up and operation costs and finally the treatment cost of 1 m³ of gas. The obtained results methodology are presented for a typical particles size distribution.

Keywords: particulate emissions, bagasse boiler, multicyclones, gas scrubbers