

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Controle de emissão da fuligem nas caldeiras da indústria sucroalcooleira

AUTORES:

Celso M. Coutinho Junior*, Marcos Vinicius C. Oishi, Mônica Lopes Aguiar

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Engenharia Química

Via W. Luiz, km 235 – São Carlos SP

* bolsista doutorado PRH 44

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

Controle da Emissão de Fuligem nas Caldeiras da Indústria Sucroalcooleira

Abstract

Due to the large amount of bagasse generated in the milling of sugar cane, in the process of producing sugar and ethanol, several alternatives have been studied with the aim of reducing this waste. The burning of bagasse in the boilers, the alternative most commonly applied, makes the plant self-sufficient, generating in some cases a surplus of energy that is sold at dealerships. However this burn in the boilers generates a large amount of soot that is harmful to human health. Given the risk of severe fines to plants that do not comply with environmental legislation, it has been invested in equipments capable of treating this gas, removing the excess of particulate material before releasing it to the environment. One of these equipments is the Venturi scrubber, studied in this work. Some analyses were made regarding its efficiency, which is one of the highest among the washers, and also about the loss of pressure generated in the Venturi constriction, in order to obtain better working conditions of this equipment, simulating the operating conditions at the plant. Among the main parameters studied are the influences of water flow, the number of holes used in the wash, the air flow and temperature, since the gases are released from the boiler at high temperatures. These parameters were studied separately so that it was possible to discover the conditions that optimize the efficiency of the equipment, which was determined by comparing the particle size distribution of particles fed into the equipment with those collected in the mud, along with the minimization of pressure loss in the throat. For higher air flow rates the pressure drop was greater, presenting however a better condition of collect. The different arrangement of orifices does not significantly affect the pressure drop, and for higher air flow the arrangement of one hole and two holes in 180th showed smaller losses. The variation of water flow was given in a small range between the values of 7.55 ml /s and 15.1 ml /s showing these way inconclusive results about its impact on the efficiency of the equipment.

Introdução

A produção de etanol no Brasil através da cana de açúcar tem aumentado e se desenvolvido a cada ano. O Brasil é o país mais avançado do ponto de vista tecnológico, na produção e no uso de etanol como combustível, ele representa cerca de 40% da produção mundial.

No entanto as usinas sucroalcooleiras geram grandes quantidades de subprodutos, que podem vir a ser prejudiciais tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana, como a vinhaça, o bagaço de cana, o gás carbônico liberado da fermentação, entre outros.

Dentre esses subprodutos o bagaço se destaca devido a sua importância econômica, já que o mesmo é consumido na usina para a produção de energia por meio da co-geração, tornando a usina auto-suficiente em termos de energia, e em alguns casos sobrando energia para a posterior venda.

Se por um lado a co-geração é importante na geração energética, após a queima do bagaço, os gases de exaustão acabam arrastando material particulado para o meio ambiente. Para então atender às regulamentações ambientais, as usinas têm investido em equipamentos capazes de retirar esse material particulado dos gases resultantes da queima.

Os lavadores de gases são os mais utilizados nas usinas sucroalcooleiras na retirada desses materiais nocivos à saúde, pois podem operar a umidade e temperaturas mais elevadas. Dentre eles se destaca o Lavador Venturi que apresenta uma constrição (garganta) onde o material particulado é coletado com alta eficiência. Portanto ele é o objeto de estudo desse trabalho, que tem por objetivo melhorar seu funcionamento e eficiência, simulando as condições de funcionamento em uma usina e analisando as melhores condições de operação do equipamento.

Metodologia

Equipamento

O equipamento utilizado visava simular da melhor maneira as condições de saída do gás da caldeira. Para isso ele era constituído de um soprador da marca Ibram, com uma vazão máxima de 2 m³/s, responsável por alimentar a vazão de ar que o sistema necessitava, sendo que acoplado a ele existia um escape para que a vazão de ar pudesse ser controlada; um aquecedor com resistências elétricas para simular as temperaturas elevadas na saída da caldeira; um injetor de pó da marca Varired e modelo 00510/65, responsável por alimentar o pó, anteriormente cominuído, na corrente de ar; duas bombas centrífugas associadas em série, uma da marca Weg com potência de 1/3 CV e outra da marca Mark de potência ½ CV, com a finalidade de levar água do reservatório até os capilares da garganta do Venturi; um ciclone com a função de separar a corrente bifásica, formada pela água suja e o gás limpo. Além disso, foi utilizada uma placa de orifício na saída do soprador acoplada a um manômetro em U com água para se medir as vazões de ar e um manômetro em U com mercúrio localizado nas extremidades do lavador Venturi, para se medir a perda de carga deste.

O procedimento do experimento ocorria da seguinte forma: depois de ligado o soprador o, ar percorria pela tubulação passando pela placa de orifício até um ponto onde havia um pequeno orifício para a injeção de pó, o ar agora sujo, continuava seu caminho passando pelas resistências elétricas para elevar a temperatura a 100 °C até chegar ao lavador Venturi. Este era constituído por um tubo de seção transversal circular dotado de uma constrição do tipo Venturi que era dividida em três partes, a seção convergente, a garganta e a seção divergente como mostrado na Figura 1. O Lavador possuía quatro orifícios ao redor da garganta, onde continha a injeção de água. Devido à alta velocidade do gás na garganta, a água acabava se tornando um spray com pequenas gotículas. Assim, quando o gás sujo chegava nessa parte do trajeto, o pó presente nele acabava se “aderindo” a essas gotículas fazendo com se obtivesse duas fases no sistema, uma com gás limpo e a outra com água e material particulado, chamada de lama, essas duas fases eram então encaminhadas para o ciclone onde era obtida a separação do gás limpo e da lama de fundo.

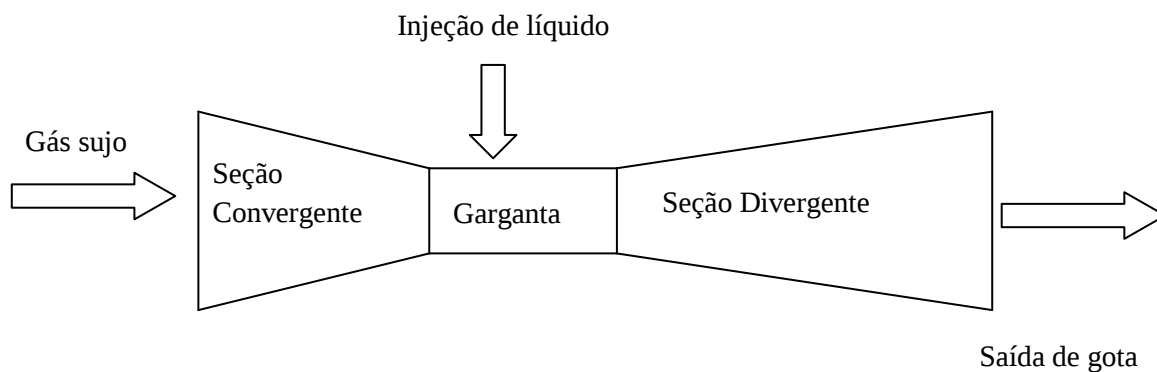


Figura 1: Esquema do lavador Venturi

Antes de se iniciar os experimentos foram feitas as calibrações do rotâmetro, para assim se determinar a vazão de água cedida pelas bombas e a calibração do injetor de pó para se determinar a vazão mássica de pó conferida ao sistema.

Após o ajuste dos equipamentos, foram realizados ensaios em branco, onde não haveria injeção de pó. Mantendo-se fixo os outros parâmetros, se variou a vazão de ar do sistema, para os diferentes orifícios com a finalidade de se determinar as melhores configurações do sistema.

Finalizado os ensaios em branco deu-se início aos ensaios com injeção de pó para se determinar como as vazões de água e ar influenciariam no desempenho do equipamento. Os experimentos foram realizados da seguinte forma: com a vazão de água e a injeção de pó constante variava-se a vazão de ar; com a vazão de ar e a injeção de pó constante variava-se a vazão de água.

O critério adotado para se determinar as melhores condições operacionais, foi o diâmetro médio das partículas coletadas na lama. Se o diâmetro médio da amostra da lama for próximo ao diâmetro médio do pó que alimentava o equipamento significa que o equipamento apresenta uma boa eficiência. No entanto se diâmetro médio das partículas da lama for menor do que o das partículas alimentadas no sistema significa que algumas partículas maiores estão “ficando no caminho”, podendo vir a ser prejudiciais já que causam incrustação e aumentam a perda de carga. Para a análise granulométrica das partículas na lama foi utilizado um analisador de partícula Malvern Mastersizer Microplus (MAF 5001).

Material Particulado

O material particulado utilizado para os testes foi à fuligem da queima do bagaço de cana (veja Figura 2), com densidade de $2,18 \text{ g/cm}^3$, determinada no picnômetro de hélio da marca Micromeritics, modelo Accupyc 1330. A distribuição granulométrica deste material foi obtida por um analisador de partícula Malvern Mastersizer Microplus (MAF 5001) e esta apresentada na Figura 3.

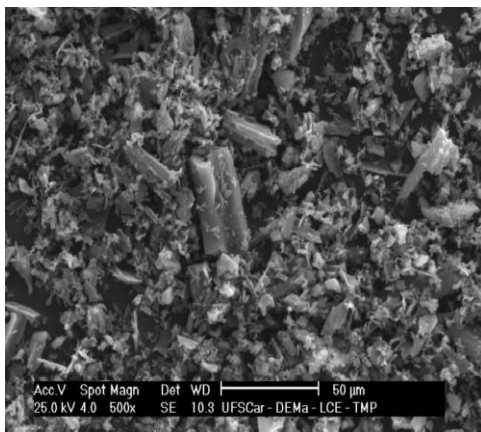


Figura 2: Imagem da fuligem gerada no MEV com ampliação de 500x

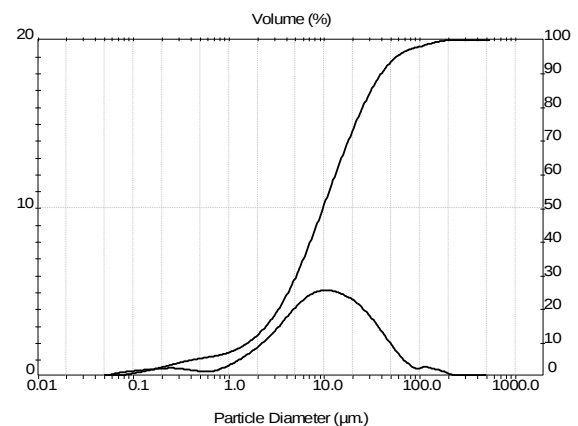


Figura 3: Análise granulométrica do particulado alimentado

Verifica-se que o valor do diâmetro médio das partículas coletadas foi de $9,8 \mu\text{m}$, considerada uma partícula fina, sendo que abaixo de $10 \mu\text{m}$ essas partículas são nocivas a saúde do homem, portanto a necessidade da limpeza dos gases na saída da caldeira.

Resultados e Discussão

Antes do início destes ensaios, para cada configuração de orifício mediu-se com auxílio do rotâmetro a vazão máxima e mínima de água que cada configuração suportava. A Tabela 1 mostra as vazões máximas e mínimas obtidas para cada configuração.

Tabela 1: Vazões de água máximas e mínimas de cada configuração

Configuração de orifício	Vazão Máxima (ml/s)	Vazão Mínima (ml/s)
1	15,10	6,96
2(90)	24,82	10,71
2(180)	22,66	8,57
3	31,29	10,71
4	36,69	13,93

Observa-se na Tabela 1 que vazão de água para 1 orifício, de 15,1 ml/s, foi o menor valor alcançado em relação aos demais orifícios sendo portanto este o valor limitante para efeito de comparação.

Ensaios em Branco

Os ensaios em branco foram realizados com a finalidade de se obter a melhor configuração de orifício do lavador. As configurações possíveis foram as de 1 orifício aberto, dois orifícios em 90 graus abertos, 2 orifícios em 180 graus abertos, 3 orifícios abertos e 4 orifícios abertos.

Para cada configuração de orifício variou-se a vazão de ar da mesma maneira, ou seja, de uma vazão de 0,49 m³/s até uma vazão de 1,85 m³/s passando por dois pontos intermediários igualmente espaçados. A Figura 4 mostra os valores obtidos para a perda de carga em função das vazões de ar para cada orifício.

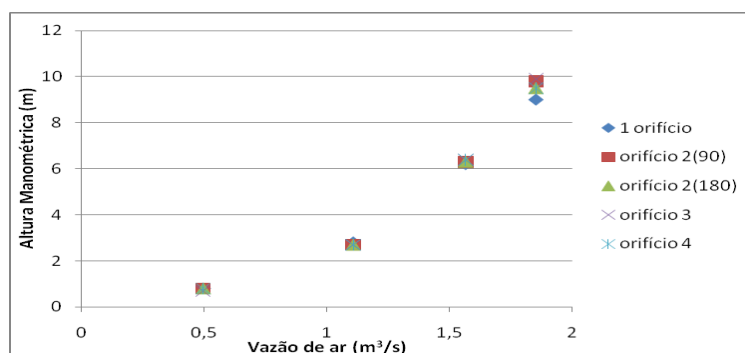


Figura 3: Perda de carga em função da vazão de ar

Nota-se nessa figura que as perdas de carga foram muito próximas para as vazões de ar analisadas, mostrando que as configurações apresentaram pouca influência no resultado final. No entanto é possível verificar uma pequena variação para vazões de ar maiores, sendo que aparentemente as configurações de 1 e 2 (180) apresentaram perdas de carga menores. Por ser inconclusivo este primeiro teste, foi realizada uma replica para confirmar os resultados obtidos. Novamente foi plotado um gráfico de perda de carga em função das vazões de ar para cada orifício apresentado na Figura 5.

A Figura 5 foi semelhante a Figura 4 confirmando que as configurações de 1 e 2(180) orifícios apresentaram perdas de carga ligeiramente menores para vazões mais altas. Dessa forma estas configurações são as mais apropriadas para serem utilizadas durante os próximos experimentos.

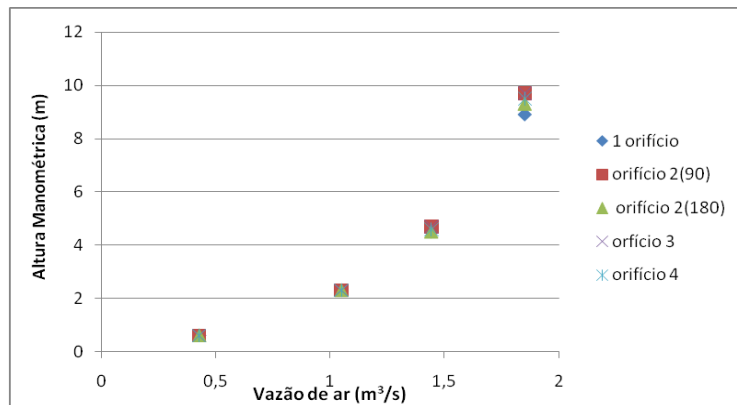


Figura 5: Perda de carga em função da vazão de ar

Injeção de Pó

Para os ensaios com alimentação de pó (fuligem), o primeiro parâmetro analisado foi a vazão de ar. O experimento foi realizado mantendo-se a vazão de água constante de 15,1 ml/s. A vazão mássica de alimentação de pó mantida constante durante todo o experimento em 0,008 g/s. Com as vazões de pó e água mantidas constante variou-se a vazão de ar igualmente para as diferentes configurações de orifício. Assim foram feitas as análises granulométricas da lama para as diversas vazões de ar, obtendo-se diferentes diâmetros médios. As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados das análises granulométricas realizadas para as configurações de 1 e de 2(180) orifícios.

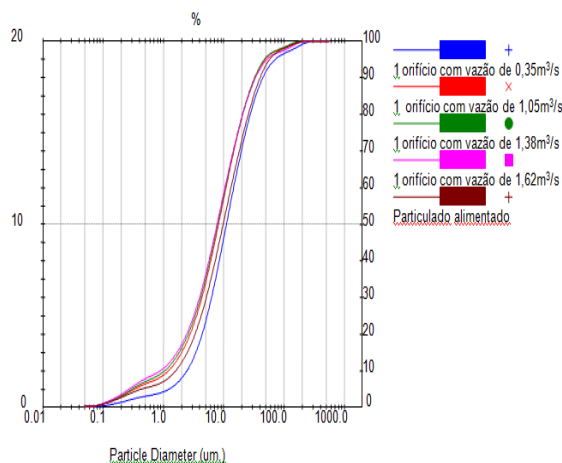


Figura 6: Análise granulométrica da lama, utilizando diferentes vazões de ar para a configuração de 1 orifício

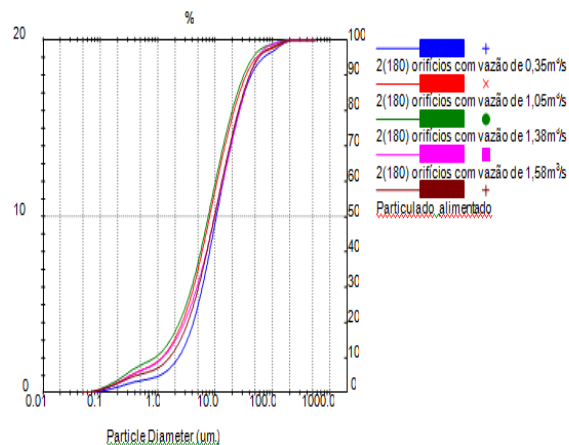


Figura 7: Análise granulométrica da lama, utilizando diferentes vazões de ar para a configuração de 2(180) orifícios.

Verifica-se nas Figuras 6 e 7 que a curva da distribuição granulométrica do pó alimentado foi similar ao comportamento das configurações investigadas, permanecendo entre elas. Esse resultado mostra que as partículas que estavam presentes na alimentação foram em sua grande maioria coletadas, o que pode estar indicando uma alta eficiência de coleta nas partículas do equipamento. Para melhor análise deste parâmetro construiu-se a Figura 8 do diâmetro médio das partículas da lama em função da vazão de ar, para todas as configurações possíveis.

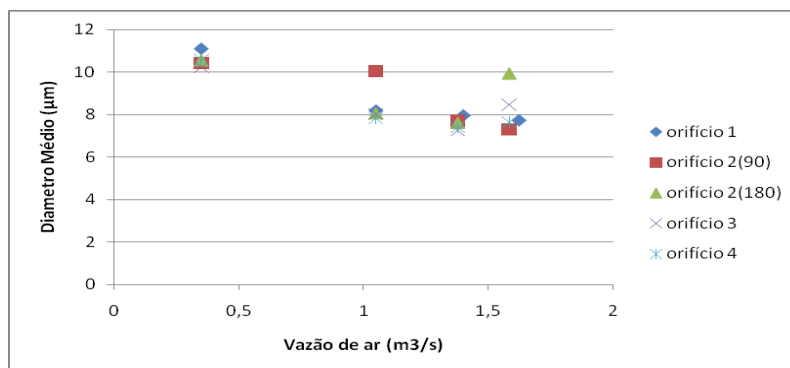


Figura 8: Diâmetro médio de coleta (μm) em função da vazão de ar (m^3/s)

Nota-se na Figura 8 que independente da configuração, quanto maior a vazão de ar, os diâmetros médios tendem a diminuir. Portanto a vazão de ar tem influência diretamente na eficiência do lavador. No entanto, alguns pontos para vazões mais altas não se observou tal comportamento. Esse resultado pode ser devido às limitações de operação do equipamento. Pelas equações de eficiência (Calvert, 1970) esperava-se para maiores vazões de ar teria se melhores eficiências.

Outro importante parâmetro que influencia na eficiência de coleta, conhecido da literatura (Gonçalves, 2000; Nukiyama e Tanasawa, 1938 e Young et al, 1984) é a vazão de água, portanto esta variável também foi investigada. Mantendo-se a vazão de ar constante em $1,42 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma vazão de pó de $0,0082 \text{ g/s}$, se variou, para as configurações de 1 e de 2(180) orifícios, a vazão de água em $7,55 \text{ ml/s}$; $10,79 \text{ ml/s}$ e $15,1 \text{ ml/s}$. para diferentes tempos na temperatura de 100°C . Foram feitas análises granulométricas da lama para estas condições operacionais e se obteve diferentes diâmetros médios. Os resultados estão descritos nas tabelas 2 a 4.

Tabela 2: Diâmetros médios em função da vazão de água de $7,55 \text{ ml/s}$

Vazão de água (ml/s)	n orifícios	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Tempo (min)	Diâmetro (μm)
7,55	1	101	5	7,61
	1	101	10	7,81
	1	100	15	7,45
	2(180)	103	5	7,67
	2(180)	102	10	7,62
	2(280)	103	15	7,68

Tabela 3: Diâmetros médios em função da vazão de água de $10,79 \text{ ml/s}$

Vazão de água (ml/s)	n orifícios	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Tempo (min)	Diâmetro (μm)
10,79	1	100	5	7,84
	1	99	10	7,74
	1	102	15	7,49
	2(180)	103	5	8,11
	2(180)	102	10	7,61
	2(280)	102	15	7,58

As médias aritméticas dos diâmetros obtidos foram de $7,64 \mu\text{m}$, $7,72 \mu\text{m}$ e $7,79 \mu\text{m}$ para as vazões de $7,55 \text{ ml/s}$, $10,79 \text{ ml/s}$ e $15,1 \text{ ml/s}$ respectivamente. Verifica se que os diâmetros não

variaram muito, mantendo-se numa mesma faixa. Assim a distribuição das partículas coletadas na lama foi semelhante para as diferentes vazões, mostrando que elas apresentaram eficiências de coleta altas já que a média de seus diâmetros foi menor que 9,8 μm e que a vazão de água não foi de grande influência na coleta das partículas. No entanto, as vazões utilizadas foram muito próximas e baixas, devido ao fato de que a configuração de 1 orifício suporta até 15,1 ml/s. No entanto não foi possível analisar eficientemente a influência da vazão de água neste equipamento.

Tabela 4: Diâmetros médios em função da vazão de água de 15,1ml/s

Vazão de água (ml/s)	n orifícios	Temperatura (em °C)	Tempo (min)	Diâmetro (μm)
15,10	1	101	5	8,03
	1	101	10	7,65
	1	101	15	7,78
	2(180)	102	5	7,88
	2(180)	103	10	7,61
	2(280)	102	15	7,8

Conclusões

A partir dos resultados experimentais obtidos e tendo em vista os objetivos a que esse trabalho se propôs as principais conclusões foram:

- os ensaios em branco mostraram que as configurações de orifício afetam pouca a perda de carga, sendo que para maiores vazões a perda de carga tendeu a aumentar;
- para os testes com a vazão de ar foi possível observar que para maiores vazões a eficiência de coleta foi maior;
- para todas as vazões de água investigadas os diâmetros médios da lama ficaram próximos do diâmetro médio do pó alimentado, indicando uma alta eficiência do equipamento, no entanto esses resultados não são conclusivos devido às limitações do equipamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos da ANP pelo incentivo financeiro e pela iniciativa de apoio a pesquisa.

Referências Bibliográficas

- CALVERT, S. Venturi and other atomizing scrubbers efficiency and pressure drop. AIChE Journal, v. 16, p. 393-396, 1970.
- GONÇALVES, J. A. S. Aspectos da modelagem matemática de Lavadores Venturi. Tese de doutorado, São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 2000.
- NUKIYAMA, S.; TANASAWA, Y. Experimento n atomization of liquid by means of air stream. Transactions of the Society of Mechanical Engineers-Japan, v.4, n.14, p. 86-93, 1938.
- YUNG, S. C.; CALVERT, S.; DUNCAN, M. Performance of gas-atomized spray scrubbers at high pressure. Journal of the Air Pollution CONTROL Association, v.34, n.7, p. 736-742, 1984.