

Concepção de um lavador de gases aplicado no tratamento de efluentes gasosos de churrasqueira

Alexandre Teixeira D'Ávila da Cunha

Alexandre Teixeira D'Ávila da Cunha

**CONCEPÇÃO DE UM LAVADOR DE GASES APLICADO NO
TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS DE
CHURRASQUEIRA**

Trabalho submetido à Banca Examinadora
como parte dos requisitos para Conclusão do
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária
e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Cunha, Alexandre Teixeira D'Ávila

Concepção de um lavador de gases aplicado no tratamento
de efluentes gasosos de churrasqueira / Alexandre Teixeira
D'Ávila da Cunha; orientador, Maurício Luiz Sens - Florianópolis,
SC, 2016. 107 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Lavador de gases.
3. Tubo Venturi. 4. Churrasqueira. I. Sens, Maurício Luiz . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

**CONCEPÇÃO DE UM LAVADOR DE GASES APLICADO NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES GASOSOS DE CHURRASQUEIRA**

Trabalho submetido à banca examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

Florianópolis, 30 de novembro de 2016.

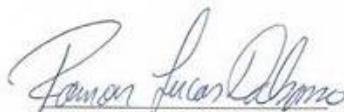


Prof. Dr. Mauricio Luiz Sens
Orientador

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Paulo Belli Filho
Membro da Banca



Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso
Membro da Banca

Há coisas que são boas por alguns instantes, outras
por algum tempo. Só algumas são para sempre.
(Olavo de Carvalho)

RESUMO

O carvão vegetal é consumido em larga escala no Brasil para preparação de alimentos, principalmente no churrasco, que faz parte da cultura da população, todavia a poluição atmosférica gerada nesta preparação é representa um risco para saúde e um impeditivo para instalação de churrasqueiras em algumas residências. O presente estudo trata da concepção de um lavador de gases que utiliza o tubo Venturi para promover a sucção dos efluentes gasosos gerados em uma churrasqueira, eliminando assim a necessidade de um exaustor para impulsionar a passagem dos gases por equipamentos de lavagem. Buscou-se avaliar a empregabilidade do equipamento de lavagem de gases em uma churrasqueira, onde os efluentes gasosos são caracterizados pelo material particulado emitidos pela queima do carvão vegetal e por compostos orgânicos voláteis oriundos da vaporização de gordura animal. O princípio do tratamento consiste na impactação direta do material particulado, de gases e vapores com a massa d'água que circula no sistema de lavagem. Busca-se avaliar se ao percorrer a tubulação de recirculação de água de lavagem e chegar ao reservatório, a turbulência na tubulação e o borbulhamento no reservatório são suficientes para transferir os poluentes da churrasqueira para a água de lavagem. A eficiência do equipamento foi avaliada através da escala de Ringelmann para os efluentes gasosos resultantes e indiretamente através da análise do efluente líquido gerado. Além disso, a percepção olfativa ajudou a avaliar a remoção de odores do efluente gasoso tratado, visto que o material particulado e os compostos orgânicos voláteis são os principais componentes odorantes do efluente gasoso. Verificou-se que houve transferência de poluentes do efluente gasoso para a água, observados através da variação de 3% no parâmetro pH, 343% na cor aparente, 91% na turbidez, 143% na DQO e 13,7% na condutividade do efluente líquido gerado. Percebeu-se também que o equipamento foi capaz de remover gorduras, mesmo estas não sendo solúveis em água, o alto tempo de contato dos gases com o líquido de lavagem permitiu a condensação dos vapores de gordura animal. Recomenda-se a avaliação da eficiência do lavador de gases através de amostragem isocinética, com isso também estimar a vazão de sucção necessária para o tratamento de todo o efluente gerado.

Palavras-chave: Material particulado. Tratamento de gases. Lavador de gases.

ABSTRACT

Charcoal is consumed on a large scale in Brazil for the preparation of food, specially in barbecue, which is part of the culture of the population. However, the air pollution generated in this preparation is a health risk and an impediment to the installation of grills in some residences. The present study deals with the design of a gas scrubber using the Venturi tube to promote the suctioning of gaseous effluents generated in barbecue, eliminating the need for an exhaust fan to promote the passage of gases through the lavage equipment. The aim of this study was to evaluate the employability of the gas washing equipment in a barbecue, where the gaseous effluents are characterized by the particulate matter emitted by the burning of charcoal and by volatile organic compounds from the animal fat vaporization. The treatment principle consists of the direct impaction of the particulate matter, gases and vapors with the mass of water that circulates in the washing system. The aim is to evaluate whether, when traversing the wash water recirculation pipe and reaching the reservoir, the turbulence in the piping and the bubbling in the reservoir are sufficient to transfer the pollutants from the barbecue to the washing water. The efficiency of the equipment was evaluated through the Ringelmann scale for the resulting gaseous effluents and indirectly through the analysis of the resulting liquid effluent. In addition, olfactory perception has helped to assess the odor removal of the treated gas effluent, since particulate matter and volatile organic compounds are the major odorant components of the gaseous effluent. It was verified that there was transfer of pollutants from the gaseous effluent to the water, observed through the 3% variation in the pH parameter, 343% in the apparent color, 91% in turbidity, 143% chemical oxygen demand, and 13,7% in the conductivity of the generated liquid effluent. It was also noticed that the equipment was able to remove fats. Even if they were not soluble in water, the high contact time of the gases with the washing liquid allowed the condensation of animal fat vapors. It is recommended to evaluate the efficiency of the gas scrubber through isokinetic sampling in order to estimate the suction flow required to treat all the generated effluent.

Keywords: Particulate matter. Gas treatment. Scrubber.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variação da temperatura em função do tempo durante o teste do carvão.....	44
Figura 2. Consumo acumulado de massa em função do tempo durante teste do carvão.....	45
Figura 3. Churrasqueira em alvenaria.....	46
Figura 4. Sistema de ventilação local exaustora.....	47
Figura 5. Cabine de pintura.....	48
Figura 6. Coifas em uma planta industrial.....	49
Figura 7. Gradiente de velocidade em um captor.....	50
Figura 8. Impactação inercial.....	53
Figura 9. Interceptação.....	53
Figura 10. Interceptação.....	54
Figura 11. Câmara de sedimentação gravitacional.....	55
Figura 12. Esquema de funcionamento do balão gravimétrico.....	56
Figura 13. Esquema de funcionamento do ciclone.....	57
Figura 14. Esquema de funcionamento do filtro manga.....	58
Figura 15. Esquema de funcionamento do precipitador eletrostático.....	59
Figura 16. Esquema de funcionamento do lavador de spray.....	61
Figura 17. Esquema de funcionamento do lavador ciclônico.....	62
Figura 18. Esquema de funcionamento do lavador Venturi.....	63
Figura 19. Reatores de microalgas para tratamento de odores da fumaça de churrasqueira.....	64
Figura 20. Tubo Venturi.....	68
Figura 21. Hidrodinâmica no tubo Venturi pela equação de Bernoulli.....	70
Figura 22. Mapeamento hidrodinâmico em relação ao número de Reynolds no estrangulamento: (A.) razão entre vazão de ar e água (R_z) e eficiência de transferência de oxigênio (E); (B.) Eficiência de oxigenação (EO) e taxa de transferência de oxigênio (TTO).....	73
Figura 23. Variação de Q_v/Q_w em relação ao número de Reynolds para diferentes relações D_t/D e d/D_t ($D=36$ mm).....	75
Figura 24. Variação de Q_v/Q_w em relação ao número de Reynolds para diferentes relações D_t/D e d/D_t ($D=42$ mm).....	77
Figura 25. Variação de Q_v/Q_w em relação ao número de Reynolds para diferentes relações D_t/D e d/D_t ($D=54$ mm).....	77
Figura 26. Relação Q_a/Q_w por número de Reynolds em dois comprimentos de tubulação diferentes.....	79
Figura 27. Protótipo de lavador de gases autoaspirante com tubo Venturi.....	85
Figura 28. Tubo Venturi utilizado.....	87
Figura 29. Esquema do lavador de gases proposto.....	88
Figura 30. Churrasqueira com o sistema de lavagem de gases.....	89
Figura 31. Reservatório de água de lavagem.....	90
Figura 32. Lavador de gases durante o teste.....	91
Figura 33. Material sobrenadante no efluente do lavador de gases.....	93

Figura 34. Mancha de gordura sobre a água de lavagem.....94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Poluentes atmosféricos e seus efeitos na a saúde humana.....	33
Tabela 2. Poluentes atmosféricos e seus efeitos para o meio ambiente	36
Tabela 3. Padrões de qualidade do ar.....	38
Tabela 4. Propriedades do carvão vegetal comercializado no sul de Santa Catarina.....	42
Tabela 5. Propriedades do carvão vegetal de Dias Júnior et al., (2015).....	43
Tabela 6. Velocidades de captura e condições de dispersão	51
Tabela 7. Relação entre escala de Ringelman, opacidade e trnasmitância de luz	66
Tabela 8. Normas para realização de amostragem isocinética	67
Tabela 9. Resultados das análises	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFC	Clorofluorcarbono
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA/SC	Conselho Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPA	Environmental Protection Agency
HCFC	Hidroclorofluorcarboneto
MME	Ministério de Minas e Energia
MP	Material Particulado
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
USEPA	United States Environmental Protection Agency
UVB	Ultravioleta tipo B

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1 AR ATMOSFÉRICO E USO DO AR	25
3.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	26
3.2.2 Efeitos da poluição atmosférica	32
3.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	37
3.3.1 Legislação Ambiental em outros países.....	40
3.4 CARVÃO VEGETAL	41
3.5 VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA.....	46
3.6 Mecanismos de coleta de material particulado.....	52
3.7 EQUIPAMENTOS DE TRATAMENTO DE ELFUENTES GASOSOS	54
3.7.1 Coletores secos.....	55
3.7.2 Coletores úmidos.....	60
3.8 Sistema de tratamento de gases de churrasqueira aplicado no Brasil	63
3.9 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO	65
3.10 Tubo Venturi.....	67
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
4.1 PRINCÍPIOS DO LAVADOR DE GASES DESENVOLVIDO	81
4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO	82
4.3 EXAUSTÃO DOS GASES LAVADOS	82
4.4 CONCEITOS DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA APLICADOS NO EXPERIMENTO	83

4.5	PRIMEIRO EXPERIMENTO COM O LAVADOR DE GASES PROPOSTO	84
4.6	SEGUNDO EXPERIMENTO COM O LAVADOR DE GASES PROPOSTO	86
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME), no ano de 2004 foram consumidas 9.834.000 toneladas de carvão vegetal no Brasil, sendo que deste total 90,95% foi para uso industrial, maior parte na indústria de ferro-gusa e aço. O consumo residencial neste mesmo ano foi de 779.000 toneladas, representando 7,92% do consumo total de carvão vegetal no Brasil. (BRASIL, 2006). No mundo, no ano de 2004, metade das famílias utilizavam lenha ou carvão vegetal para cocção ou aquecimento, o que representa 10,8% do consumo mundial de energia (EIA, 2006a).

Estes dados apontam que cocção de alimentos tem contribuição significativa no consumo, e conseqüentemente queima de combustíveis, em especial no Brasil, onde os climas equatorial e tropical abrangem a maior parte do país. Mesmo em regiões de clima mais ameno no inverno, não há cultura de utilização de lareiras ou sistemas de calefação no país, indicando que o alto consumo residencial de carvão vegetal está ligado a cocção de alimentos, em especial o tradicional churrasco.

O grande volume de carvão vegetal consumido, mesmo que diminuto se comparada a outras fontes poluidoras, possui sua parcela de contribuição para a poluição atmosférica. Por característica das chaminés das churrasqueiras, a dispersão dos poluentes na atmosfera muitas vezes não se dá de maneira adequada, seja por chaminés muito baixas, mal projetadas ou pelas condições atmosféricas não favoráveis. Nesse aspecto, a má dispersão dos poluentes gerados na churrasqueira representa um risco a saúde das pessoas próximas. Dentre os principais poluentes oriundos da queima de carvão e gorduras animais está o material particulado (MP), principalmente as partículas inaláveis, compostos orgânicos voláteis (COV) e monóxido de carbono (CO).

Pensando em alternativas para mitigar os efeitos dos poluentes oriundos da churrasqueira na saúde das pessoas expostas e propiciar a utilização de churrasqueiras em locais antes inviáveis devido a impossibilidade de instalação de chaminé, como por exemplo sacadas de apartamentos, elaborou-se uma proposta de tratamento dos poluentes através de um lavador de gases, que é um equipamento que objetiva a remoção de poluentes de um efluente gasoso através do contato com um meio de lavagem, geralmente a água.

Foi projetado um lavador de gases que utiliza o efeito Venturi para proporcionar o contato do gás com o meio de lavagem. Porém, diferente do lavador Venturi já existente, que pulveriza o líquido de lavagem no fluxo gasoso, necessitando assim de bomba d'água e bomba exaustora de

gases. Diferentemente do lavador Venturi supracitado, o lavador aqui desenvolvido capta os poluentes da churrasqueira através da pressão negativa gerada pelo tubo Venturi, succionando os efluentes gasosos para dentro do sistema. O efluente líquido resultante da lavagem dos gases será analisado visando identificar a transferência de poluentes do efluente gasoso para a água de lavagem.

Espera-se que este sistema de lavagem de gases possibilite a coleta e tratamento dos gases gerados na combustão de carvão vegetal e gorduras animais em churrasqueiras. Sendo este lavador uma alternativa tecnológica inovadora, perante a atual variedade de lavadores de gases existentes no mercado, almeja-se disponibilizar uma solução eficiente, de fácil manuseio e custo reduzido para o tratamento de poluentes atmosféricos de pequenas fontes geradoras.

Este lavador de gases tem especial importância no desenvolvimento de novas alternativas e tecnologias para o tratamento de efluentes gasosos e da promoção da saúde daqueles expostos a poluição gerada nas churrasqueiras. Além disso, permite a instalação de churrasqueiras em ambientes que não propícios a instalação de chaminés devido a dificuldades em dispor os efluentes gerados de maneira adequada, se impactar terceiros.

2 OBJETIVOS

Os objetivos foram divididos de maneira a facilitar a compreensão de todos os assuntos relacionados.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho fundamenta-se em projetar um lavador de gases e verificar a sua eficiência para a controle da poluição atmosférica oriunda da combustão de carvão vegetal em uma churrasqueira.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o propósito definido no objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar o consumo de carvão em uma churrasqueira residencial
- Caracterizar qualitativamente os gases gerados em uma churrasqueira
- Definir parâmetros de projeto para o sistema proposto
- Propor um lavador de gases para o tratamento de gases emitidos pela queima de carvão vegetal em uma churrasqueira utilizando o tubo Venturi para aspirar o efluente;
- Avaliar a eficiência do sistema proposto quanto a remoção de material particulado (MP) através da escala de Ringelmann e indiretamente pela mudança nos parâmetros de qualidade do efluente gerado;
- Avaliar a qualidade do efluente líquido resultante da lavagem dos gases para os parâmetros turbidez, condutividade, Carbono Orgânico Dissolvido (COD) Demanda Química de Oxigênio (DQO) e pH, visando identificar a transferência de poluentes;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AR ATMOSFÉRICO E USO DO AR

O ar atmosférico é essencial para animais e vegetais em suas funções vitais, para o homem, além das funções vitais, o ar atmosférico possui outros usos importantes, como comunicação, transporte, combustão, processos industriais e receptor e transportador de resíduos da atividade humana (LIMA, 2007)

A atmosfera é a camada de gases que envolve a terra, é constituída principalmente de nitrogênio e oxigênio, é composta por cinco camadas concêntricas, que são: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera (RAVEN, et. al., 1995).

A atmosfera se estende até uma altitude de 9600 quilômetros, contudo, 99% da massa atmosférica está contida dentro de uma altitude de 30 km (LIMA, 2007). A camada sobre a superfície terrestre, onde o homem desenvolve suas atividades é a troposfera, que pode chegar até 12 km de altura acima da crosta terrestre. Em média, a troposfera é composta de 78% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de dióxido de carbono e 0,0345% de outros gases (DERISIO, 1992), dentre estes outros gases estão o néon, hélio, metano, hidrogênio, xenônio e ozônio, clorofluorcarbonos (CFC), além de vapor d'água; a troposfera também contém partículas sólidas, inclusive matéria viva, como pólen e microorganismos (ALMEIDA, 1999). Na troposfera ocorrem diversos fenômenos meteorológicos e de gradiente de temperatura que alteram significativamente a dispersão dos poluentes atmosféricos (ALMEIDA, 1999).

Após a troposfera, a estratosfera se estende de uma altitude de aproximadamente 10 km até 45 km acima da crosta terrestre, a estratosfera é uma zona de grande estabilidade, se comparada a troposfera, são raras as interferências na estabilidade desta camada associadas a condições meteorológicas, esta camada ainda abriga a camada de ozônio, que funciona como escudo protetor para a radiação ultravioleta (ALMEIDA, 1999).

Atualmente, devido a emissões antropogênicas sobre a estratosfera, camada esta onde os aviões comerciais se deslocam, passou-se a se ter maior interesse quanto a poluição atmosférica, também pelo interesse na função da camada de ozônio e a sua degradação devido a atividade antrópica, antes só se considerava a troposfera no que diz respeito ao estudo dos efeitos da poluição atmosférica (ASSUNÇÃO, 1998).

De acordo com Milano e Dalcin (2000, apud LIMA, 2007) a atmosfera recebe contaminantes de processos naturais desde a formação da terra, principalmente através de vulcanismo e incêndios. Contudo, processos naturais na atmosfera e biosfera reduzem ou removem os poluentes através de diluição, precipitação, filtração e reações químicas. A partir do momento que as atividades humanas geram poluentes atmosféricos que em algum momento supera a capacidade da natureza de remover ou reduzir os contaminantes, este processo é comumente observado em nas grandes cidades, onde o consumo excessivo de fontes de energia e materiais se traduzem em poluição atmosférica.

3.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição atmosférica é composta de gases, líquidos ou sólidos presentes na atmosfera em níveis elevados o suficiente para causar dano ao ser humano, animais, plantas e materiais (RAVEN et al., 1995).

A poluição atmosférica é agente causador de diversas doenças no homem, tem efeitos adversos sobre a flora, fauna, águas, solos, causa danos a diversos materiais, reduz a visibilidade, contribui para a formação de chuvas ácidas, aquecimento global, formação de ilhas de calor, destruição da camada de ozônio, entre outros (USEPA, 2016).

Segundo Almeida (1999), a poluição atmosférica compreende uma gama de atividades, fenômenos e substâncias que contribuem para a degradação da qualidade natural da atmosfera.

Assunção (1998) entende que a poluição atmosférica é oriunda principalmente da atividade humana, sendo consequência dado rápido crescimento populacional, industrial e econômico.

A poluição atmosférica é um fenômeno tanto natural quanto antropogênico, que interfere de maneira negativa nos processos físicos, químicos e biológicos da natureza, devido a condições meteorológicas, estes poluentes podem se dispersar na atmosfera com facilidade, manterem-se concentrados na região onde foram gerados ou serem transportados para outras regiões.

A atividade humana nos últimos séculos aumentou significativamente a emissão de poluentes atmosféricos, para mitigar os efeitos indesejáveis da poluição atmosférica sobre o ambiente e o homem, é necessário conhecer as características dos poluentes e suas fontes geradoras. A partir do conhecimento dos poluentes e suas fontes, é possível propor medidas para diminuir a geração ou tratar os poluentes atmosféricos, atenuando assim os efeitos indesejáveis das emissões atmosféricas antropogênicas.

Segundo Assunção (1998 apud ALMEIDA, 1999) poluente atmosférico é qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torna-la poluidora. Já a USEPA (2016), considera que qualquer substância presente no ar que possa causar danos aos seres humanos e ao meio ambiente é um poluente atmosférico.

De acordo com Villanueva (1998) e Almeida (1999), os poluentes atmosféricos são classificados em dois grupos de acordo com sua origem: primário e secundário, e dois grupos de acordo com seu estado físico: material particulado, gases e vapores. Almeida (1999) ainda classifica os poluentes atmosféricos por classe química, entre poluentes orgânicos e inorgânicos.

Classificados de acordo com a origem, os poluentes primários são aqueles que são emitidos diretamente para a atmosfera, dentre eles estão: material particulado, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e hidrocarbonetos. Os poluentes secundários são aqueles formados por reações químicas entre gases e vapores presentes naturalmente na atmosfera e os poluentes primários, como por exemplo aldeídos, sulfatos, ácidos orgânicos, trióxido de enxofre e ozônio.

Conforme Almeida (1999) e Resende (2007), os poluentes atmosféricos podem ter origem tanto em processos naturais, quanto processos antropogênicos.

Como fontes naturais destacam-se as erupções vulcânicas, suspensão de poeiras do solo pelo vento, pólen de plantas, incêndios naturais, decomposição de matéria orgânica, aerossóis marinhos, formação de ozônio através de descargas atmosféricas, dentre outros.

São exemplos de fontes antropogênicas de poluentes atmosféricos os diversos processos industriais, queima de combustíveis fósseis e vegetais, incineração de resíduos sólidos, construções, queimadas artificiais na agricultura, solo nu decorrente de desmatamento, volatilização de produtos químicos etc.

Os principais poluentes atmosféricos ocorrem na forma de gases e vapores ou particulados e tem sido objeto de um importante número de pesquisas científicas e regulamentações devido aos impactos negativos que estes poluentes sobre a fauna, flora, a saúde humana e a matérias (GODISH, 1991, apud ALMEIDA, 1999).

A quantidade e variedade de poluentes atmosféricos é vasta, sendo assim, órgãos que regulam e fiscalizam a emissão de poluentes atmosféricos definiram, de acordo com a maior frequência dos poluentes, maior volume produzido e também dos seus efeitos adversos ao meio ambiente e a saúde.

Atualmente a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) controla os poluentes dióxido de enxofre (SO_2), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2). A USEPA (United States Environmental Protection Agency) adota como os principais poluentes e indicadores da qualidade do ar, os mesmos que a CETESB mais o chumbo (Pb) (RESENDE, 2007).

Nesse contexto, Almeida (1999) divide os poluentes gasosos em cinco grupos, compostos de enxofre, óxidos de carbono, hidrocarbonetos, compostos de nitrogênio e oxidantes fotoquímicos, além do material particulado que Almeida (1999) trata como outro grupo, de acordo com seu estado físico. A seguir são apresentados todos os grupos supracitados.

3.2.1.1 Compostos de enxofre

Óxidos de enxofre (SO_x) e gás sulfídrico (H_2S) são originários tanto de fontes naturais como antropogênicas, os vulcões são a grande fonte natural de compostos de enxofre, processos biológicos também contribuem. A queima de carvão mineral, queima de óleos brutos, queima de resíduos sólidos e o beneficiamento minérios que contém ferro, chumbo, cobre e zinco são fontes antrópicas de poluição atmosférica para os compostos de enxofre. Segundo Goldemberg (1998, apud VILLANUEVA, 1998), 90% de todas as emissões de SO_2 são provenientes de sistemas energéticos.

O principal poluente atmosférico primário da família SO_x é o dióxido de enxofre (SO_2), forma sulfatos e outros produtos com outros gases presentes na atmosfera, gerando poluentes secundários, como o trióxido de enxofre (SO_3), que por sua vez, ao se dissolver em vapor d'água forma outro poluente secundário, o ácido sulfúrico (H_2SO_4) (RESENDE, 2007).

3.2.1.2 Óxidos de carbono

Devido a sua toxicidade aguda, o monóxido de carbono (CO) é considerado o principal poluente atmosférico do grupo dos óxidos de carbono. O dióxido de carbono é um componente natural da atmosfera, é relativamente não tóxico, porém, a emissão de exacerbada deste gás, devido a sua capacidade de reter a energia térmica da atmosfera, contribui para alterações climáticas globais (ALMEIDA, 1999).

O dióxido de carbono (CO_2) ainda forma poluentes secundários, em contato com a água (H_2O), o dióxido de carbono (CO_2) forma ácido carbônico (H_2CO_3), que se dissocia na água formando íons carbonato

(CO_3^{2-}) e hidrogênio (H^+), acidificando a água, e principalmente os oceanos; estima-se que 30% do CO_2 emitido pelo homem vá para os oceanos (RAVEN et al., 1999). A solubilidade do dióxido de carbono é considerada baixa, 17, g/l a 20°C.

O monóxido de carbono (CO) é um gás inodoro e invisível gerado pela queima parcial de carbono em combustíveis, característico da queima de combustíveis por veículos (USEPA, 2016). Já o dióxido de carbono (CO_2) é resultado da combustão completa do carbono de combustíveis, sendo estes tanto fósseis como vegetais, como carvão mineral, carvão vegetal, lenha, etc.

3.2.1.3 Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos representam um grande gama de compostos orgânicos, são constituídos unicamente por hidrogênio (H) e carbono (C). Os hidrocarbonetos se apresentam em várias formas de acordo com as cadeias carbônicas destes compostos, que podem ser simples ou ramificadas, cíclicas, alicíclicas, policíclicas ou associados a compostos cíclicos e também podem ser saturados (ligações simples) ou insaturados (ligação dupla ou tripla) (ALMEIDA, 1999).

De acordo com sua cadeia estrutural, os hidrocarbonetos podem estar presentes na atmosfera nas fases, sólida, líquida e gasosa. Os hidrocarbonetos de cadeia curta por exemplo, são gasosos à temperatura ambiente, como o metano (CH_4), butano (C_4H_{10}) e propano (C_3H_8) (GODISH, 1991, apud ALMEIDA, 1999). O metano (CH_4) também é precursor da formação de ozônio troposférico, e com isso colabora para o efeito estufa (BRASIL, 2016).

Na atmosfera os hidrocarbonetos podem reagir com oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e outras substâncias e formar uma grande variedade de poluentes secundários. Tais poluentes secundários, podendo também serem primários, são aldeídos, ácidos, álcoois, éteres, cetonas e ésteres (ALMEIDA, 1999).

Estes poluentes são oriundos de processos industriais e naturais, tem como principais fontes as emissões veiculares, queima e evaporação de combustíveis, degradação de matéria orgânica, entre outros (BRASIL, 2016).

3.2.1.4 Compostos de nitrogênio

De acordo com Flagan e Seinfeld (1988), o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2) são os principais

poluentes atmosféricos entre os compostos nitrogenados, destes, o NO_2 é o composto mais tóxico e irritante. Outros compostos de nitrogênio também são poluentes atmosféricos, a exemplo da amônia (NH_3) e o óxido nitroso (N_2O).

O monóxido de nitrogênio é principalmente gerado pela reação entre nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) em altas temperaturas, geralmente essas temperaturas são oriundas de combustão controlada em processos industriais, também podem ser provenientes da queima de compostos orgânicos em alguns combustíveis, como óleo e carvão (FLAGAN; SEINFELD, 1988).

O dióxido de nitrogênio (NO_2) pode ser originário de vulcanismo, ações bacterianas e descargas elétricas, além de fontes antropogênicas, através de processos de combustão. As emissões naturais são de maior escala que as antropogênicas, contudo, o NO_2 de fontes antropogênicas costuma ter maior impacto nos centros urbanos, onde está concentrada. O NO_2 também favorece a formação de ozônio troposférico, smog fotoquímico e chuvas ácidas (BRASIL, 2016).

3.2.1.5 Oxidantes fotoquímicos

O mais importante oxidante fotoquímico é o ozônio (O_3), é um gás de coloração azulada, naturalmente encontrado em níveis mais elevados da estratosfera, onde absorve os raios ultravioleta provenientes do sol (ALMEIDA, 1999).

O ozônio (O_3) é um poluente secundário formado através de reações químicas complexas que ocorrem entre dióxido de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis (COV) e o oxigênio (O_2), na presença de radiação solar (BRASIL, 2016).

3.2.1.6 Material Particulado

O material particulado é um termo genérico para uma vasta gama de substâncias químicas existentes na atmosfera na forma de partículas, tanto partículas sólidas quanto líquidas e de diversos tamanhos (ALMEIDA, 1999).

As partículas de interesse para o estudo como poluentes atmosféricos encontram-se entre 0,01 e 100 μm (VILLANUEVA, 1998). Dentro dessa faixa, existem partículas de maior interesse quanto a saúde pública, que são classificadas de acordo com seu diâmetro, devido à relação entre o diâmetro da partícula e a possibilidade de penetração no trato respiratório (BRASIL, 2016).

Segundo Minguillón et al. (2008, apud FREITAS; SOLCI, 2009), de acordo com o diâmetro aerodinâmico médio das partículas, estas são classificadas como PM₁₀, aquelas partículas que possuem diâmetro médio no intervalo de 2,5 a 10 µm, também chamadas de partículas inaláveis, capazes de adentrar pela boca e nariz. As partículas com diâmetro médio inferior a 2,5 µm são denominadas PM_{2,5} ou partículas respiráveis, capazes de penetrarem até os alvéolos pulmonares.

A composição química do material particulado é bastante variável devido a capacidade principalmente das partículas finas de absorção e associação com poluentes secundários (GODISH, 1991, apud ALMEIDA, 1999). Em geral as partículas mais grosseiras são básicas e as mais finas são ácidas, além do carbono elementar, a fração fina normalmente se associa com íons como (SO₄²⁻), (NO₃⁻), (NH₄⁺), (H⁺), compostos de chumbo e compostos orgânicos, além de traços de metais como chumbo, mercúrio, cádmio, vanádio e cromo (ALMEIDA, 1999).

As partículas mais grosseiras são compostas por diversos tipos de partículas, como partículas de solo suspensas, cinzas, fuligem pólen e partículas de origem mineral, sendo comum encontrar partículas de sílica, alumínio, potássio ferro, cálcio, além de carbonatos e compostos orgânicos (ALMEIDA, 1999).

O material particulado pode ter origem natural, através de vulcanismo, incêndios, sprays marinhos, ressuspensão de solo, etc. De origem antrópica, o material particulado é proveniente da combustão de combustíveis fósseis e vegetais em veículos, termoeletricas, residências, construções, estradas não pavimentadas, queimadas na agricultura, desmatamento, etc (USEPA, 2016). Boa parte dos processos industriais também são fontes de material particulado, incluindo indústrias de metais, minerais, derivados de petróleo e produtos químicos, o derretimento primário ferro e aço são as fontes mais significativas de emissão de material particulado na indústria (FLAGAN; SEINFELD, 1988).

De acordo com modo em que as partículas são formadas e suas respectivas características, as partículas são classificadas em poeiras, fumos, fumaça e névoas (VILLANUEVA, 1998; ALMEIDA, 1999):

- **Poeiras:** Partículas sólidas comumente formadas por desagregação mecânica, como moagem, britagem, abrasão e ressuspensão pelo vento. Normalmente são partículas não esféricas, maiores que 1 µm, tais como poeira de cimento, amianto e algodão.
- **Fumos:** Partículas formadas por condensação de gases e sublimação de sólidos, normalmente acompanhada de

reações químicas, geralmente oxidação, como no caso de fumos metálicos como chumbo e alumínio, como também de cloreto de amônia. As partículas no geral são esféricas e de tamanho reduzido.

- **Fumaça:** Partículas sólidas usualmente oriundas da combustão de combustíveis fósseis, asfálticos e orgânicos, no caso de madeira e carvão, uma fração é de minerais (cinzas), são partículas de diâmetro muito reduzido.
- **Névoas:** Partículas líquidas geradas pela condensação ou dispersão de líquidos (atomização), possuem em geral diâmetro médio maior que 5 μm , podem intervir na visibilidade e é associada a corrosão e sujidade em diversas superfícies. Névoas podem ser provenientes de óleo de operações de corte, pulverização de pesticidas e galvanoplastia, por exemplo.

3.2.1.7 Odores

Apesar dos odores não serem normalmente tratados junto dos demais poluentes atmosféricos supracitados, há evidências que determinados odores podem causar alterações fisiológicas, sobretudo sobre o sistema respiratório e cardiovascular (ÁLVARES JR., et al., 2002 apud CARMO JR., 2005).

Já foram documentados sintomas como náuseas, vômitos e dor de cabeça, intensificação da asma, tosse, falta de fôlego, irritação das mucosas, distúrbios do sono, inquietação, depressão, etc (ÁLVARES JR., et al., 2002 apud CARMO JR., 2005).

Contudo, ainda é obscuro estabelecer relação entre a intensidade e tempo de exposição aos odores, com a seriedade dos efeitos observados (ÁLVARES JR., et al., 2002 apud CARMO JR., 2005)

3.2.2 Efeitos da poluição atmosférica

Villanueva (1998) entende que os efeitos da poluição atmosférica são evidenciados por alterações nas condições ambientais consideradas normais ou na potencialização de problemas ambientais já existentes, sendo que estes problemas podem ser de magnitude tanto local, regional como até global.

Em escala global a poluição atmosférica contribui para a deposição de ácidos ou alteração da acidez de águas pluviais (chuva ácida), maior incidência de radiação ultravioleta causado pela deterioração da camada

natural de ozônio e o aumento da temperatura média do planeta através da maior absorção de radiação infravermelha por gases estufa oriundos da atividade humana presentes na atmosfera, como por exemplo dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), o chamado efeito estufa (VILLANUEVA, 1998; ALMEIDA, 1999).

A poluição atmosférica está associada, em diversas escalas, com danos à saúde humana, fauna, flora, solo, água, materiais, paisagens naturais e a economia.

3.2.2.1 Efeitos sobre a saúde humana

Os efeitos da poluição atmosférica sobre a saúde humana têm maior impacto sobre os grupos mais vulneráveis, as crianças, os idosos e as pessoas que já possuem problemas de saúde, os efeitos adversos à saúde dependem das concentrações dos poluentes e do tempo de exposição, em longo prazo, os efeitos são cumulativos e mais persistentes se comparados a exposições de curto prazo (POPE, 2007, apud MARCHWINSKA-WYRWAL, 2011).

A **Tabela 1** relaciona algum dos efeitos conhecidos dos principais poluentes atmosféricos sobre a saúde humana:

Tabela 1. Poluentes atmosféricos e seus efeitos na a saúde humana

Poluentes	Efeitos na saúde humana
Monóxido de Carbono (CO)	Redução da tolerância a exercícios físicos Deficiências no sistema nervoso Deficiências no desenvolvimento fetal Agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias Morte
Material Particulado	Redução nas funções pulmonares Agravamento de doenças cardiovasculares Irritação na pele e olhos Câncer Pulmonar Enfisema Bronquite crônica Faringite e laringite Sinusite
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Agravamento de doenças respiratórias Redução das funções pulmonares Irritação nos olhos

	Broncoconstrição
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Agravamento de doenças respiratórias pré-existentes Infecções do trato respiratório inferior Agravo dos sintomas da asma Diminuição da imunidade
Ozônio (O ₃)	Deficiência cardio-respiratória Agravamento de doenças respiratórias Irritação nos olhos Enfisema Fibrose e envelhecimento do pulmão e do tecido respiratório
Odores	Alterações respiratórias e cardiovasculares Agravo dos sintomas da asma Irritação das mucosas Enjôo, vômito, náusea, dor de cabeça Distúrbios comportamentais diversos

Fonte: USEPA, 2006, apud RESENDE 2007; ALMEIDA, 1999, apud RESENDE 2007; PINHEIRO & MONTEIRO, 1992, apud RESENDE 2007; CETESB, 2005, apud RESENDE 2007; ASSUNÇÃO, 1997, apud VILLANUEVA, 1998; SANTOS, 2001, apud LIMA, 2007; GAVIRIA et al., 2011; FOLINSBEE, 1992; ÁLVARES JR., et al., 2002 apud CARMO JR., 2005.

Diversos estudos demonstraram forte relação entre os níveis de material particulado, dióxido de enxofre e outros poluentes atmosféricos com mortes prematuras por doenças cardíacas (MARCHWINSKA-WYRWAL, 2011).

A poluição atmosférica possui influência comprovada sobre fetos, entre os efeitos estão: nascimento prematuro, natimortos, crescimento fetal intrauterino retardado, recém-nascidos com baixo peso, fatores associados a mortalidade infantil (RANKIN et al., 2009; RICCIARDI & GUASTADISEGNI, 2003, LIU et al., 2003, apud MARCHWINSKA-WYRWAL, 2011). Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), quando penetram na placenta, causam efeitos carcinogênicos e mutagênicos nos fetos (MARCHWINSKA-WYRWAL, 2011).

Devido a exposição a fontes antropogênicas de material particulado, a expectativa de vida na Europa, diminui em média 8,6 meses, estima-se que são 500 mil mortes por ano aceleradas pela exposição a material particulado em 40 países Europeus estudados (MARCHWINSKA-WYRWAL, 2011).

3.2.2.2 Efeitos sobre o meio ambiente

Dentre os efeitos mais conhecidos mais conhecidos da poluição atmosférica sobre o meio ambiente estão aqueles que possuem escala global, um deles é o efeito estufa.

O efeito estufa é a absorção da radiação infravermelho pelos gases de efeito estufa, ao absorverem esta radiação, os gases aumentam sua temperatura, e conseqüentemente em escala global, provoca o aumento da temperatura da atmosfera. A atmosfera do planeta é quase totalmente permeável à radiação solar, parte da radiação é refletida e volta para o espaço, a maior parte incide sobre a superfície terrestre é absorvida e reemitida para a atmosfera em outro comprimento de onda, o infravermelho (VILLANUEVA, 1998).

O efeito estufa é um efeito natural, que permite a vida na terra da maneira que é conhecida atualmente, o calor específico da atmosfera impede mudanças abruptas de temperatura no planeta. Estima-se que a temperatura média da superfície da terra sem os gases estufa seria de -20°C a -15°C . (GOLDEMBERG, 1996, apud VILLANUEVA, 1998).

A problemática sobre o efeito estufa é o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, por consequência da poluição atmosférica antropogênica, causando aumento da temperatura da atmosfera e, por conseguinte, é associado a diversas alterações no meio ambiente.

Os gases mais prejudiciais para o aumento do efeito estufa estão o dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e gases fluorados. Estima-se que a emissão de gases de efeito estufa pela atividade humana aumentou 35 por cento de 1990 a 2010 e que a concentração de dióxido de carbono na atmosfera chegou em 2015 a 400 ppm de CO_2 , nos últimos 800.000 anos, a concentração média variou entre 200 ppm e 250 ppm com poucos picos chegando a 300 ppm (USEPA, 2016).

Outro efeito da poluição atmosférica sobre o meio ambiente é a redução da camada de ozônio. Alguns compostos que geralmente são muito estáveis na troposfera, se degradam na estratosfera sob luz ultravioleta, liberando cloro ou bromo, que acabam quebrando as ligações do ozônio devido sua reatividade. Dentre as substâncias que degradam a camada de ozônio estão: clorofluorcarbonos (CFC), hidroclorofluorcarbonetos (HCFC), brometo de metila, halogênios, tetracloro de carbono, hidrobromofluorcarbonos, clorobromometano e clorometano (USEPA, 2016).

A redução da camada de ozônio tem consequência na menor proteção do planeta contra a radiação ultravioleta do tipo UVB, que é absorvida pelo ozônio. A radiação UVB é o maior responsável pelo câncer de pele no homem, afeta o crescimento de plantas, limita a produtividade do fitoplâncton, afetando o ecossistema marinho e também atuam na decomposição de materiais (USEPA, 2016).

A poluição atmosférica ainda atua na formação de chuva ácida ou deposição ácida, que é caracterizada pela precipitação de componentes ácidos, como ácido sulfúrico ou ácido nítrico, de poluentes secundários da atmosfera advindos principalmente da queima de combustíveis fósseis (USEPA, 2016).

A deposição pode ser úmida através do carreamento das partículas ácidas por chuva, neve, neblina ou granizo, como também pode ser seca por precipitação direta das partículas (USEPA, 2016). A deposição ácida causa impacto principalmente em lagos e rios, com a mudança de pH destes afetando a vida aquática, causa danos a vegetação e também corrói materiais (VILLANUEVA, 1998).

Na sequência, a **Tabela 2** resume alguns dos efeitos conhecidos dos principais poluentes atmosféricos sobre o meio ambiente:

Tabela 2. Poluentes atmosféricos e seus efeitos para o meio ambiente

Poluentes	Efeitos sobre o meio ambiente
Monóxido de Carbono (CO)	Altamente tóxico para os animais
Material Particulado	Redução de visibilidade Redução da penetração de luz (redução da fotossíntese nas plantas) Poluição do solo Poluição das águas Danos a materiais
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Formação de chuva ácida Redução de visibilidade Danos a plantas Danos a materiais
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Formação de chuva ácida Redução da visibilidade Redução no crescimento das plantas Aquecimento global

	Formação de ozônio a nível do solo
Ozônio (O ₃)	Danos às folhas das plantas Redução da capacidade de armazenamento de nutrientes nas plantas

Fonte: USEPA, 2006, apud RESENDE 2007; ALMEIDA, 1999, apud RESENDE 2007; PINHEIRO & MONTEIRO, 1992, apud RESENDE 2007; CETESB, 2005, apud RESENDE 2007; DERISIO, 1992, apud VILLANUEVA, 1998.

3.2.2.3 Efeitos sobre a economia

Os efeitos da poluição atmosférica são difíceis de quantificar, como supracitado, a poluição atmosférica causa uma série de efeitos adversos sobre a saúde humana e o meio ambiente. Estes efeitos além de abrangerem muitas questões ambientais e possuírem diversas escalas de magnitude, são difíceis de avaliar de maneira direta.

Muitas vezes a poluição atmosférica de fonte antrópica, oriunda de processos industriais, queima de combustíveis e outras fontes, não tem internalizadas às externalidades negativas, ou seja, os custos de mitigar a emissão de poluentes atmosféricos não são pagos pelos geradores da poluição, e acabam sendo pagas de maneira difusa por aqueles que sofrem as consequências da poluição atmosférica.

O tratamento de doenças, substituição de materiais, perda de produtividade dos trabalhadores afetados por enfermidades relativas a poluição atmosférica ou seu afastamento do trabalho, degradação ou perda dos recursos naturais dentre outros, são exemplos de efeitos da poluição atmosférica que possuem altos custos de mitigação, custos estes que são pagos por todos os setores da sociedade propagados através da cadeia produtiva e por investimentos governamentais, com dinheiro do contribuinte, para sobrepujar os efeitos negativos da poluição atmosférica.

Em se tratando das externalidades negativas oriundas da atividade humana no tocante à poluição atmosférica, estima-se que para cada um dólar gasto no controle da poluição atmosférica, evita-se o gasto de 16 dólares em mitigação dos danos causados (DERISIO, 1992, apud LIMA, 2007).

3.3 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Em se tratando do controle da poluição atmosférica, a legislação brasileira estabeleceu as primeiras medidas para o controle e monitoramento de poluentes através da Resolução CONAMA n° 005/1989 (BRASIL, 1989), que dispõe sobre o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar (PRONAR). Esta resolução estipula ainda a criação de um inventário nacional de fontes poluentes do ar, o licenciamento ambiental de atividades poluidoras, a criação de uma rede nacional de monitoramento da qualidade do ar e plano de ações de curto, médio e longo prazos para estas medidas de controle (BRASIL, 1989).

A partir da Resolução CONAMA n° 005/1989 (BRASIL, 1989), foram estabelecidos os limites de qualidade do ar para poluentes atmosféricos pela Resolução CONAMA n° 003/1990 (BRASIL, 1990a), através de padrões primários (concentrações que ultrapassadas poderão afetar a saúde da população) e secundários (concentrações abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso) de qualidade do ar, que estão resumidos na **Tabela 3** a seguir:

Tabela 3. Padrões de qualidade do ar

Parâmetro	Padrão primário		Padrão secundário	
	Média anual	Média diária*	Média anual	Média diária*
Partículas totais em suspensão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	80	240	60	150
Fumaça ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	60	150	40	100
Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50	150	50	150
Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	80	365	40	100
Parâmetro	Média de 8 horas*	Média horária*	Média de 8 horas	Média horária*
Monóxido de carbono ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	10.000	40.000	10.000	40.000
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-	160	-	160

Parâmetro	Média anual	Média horária	Média anual	Média horária
Dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100	320	100	190

Fonte: BRASIL, 1990a. *valores não podem ser excedidos mais de uma vez ao ano.

Quanto os limites máximos de emissão de poluentes por fontes fixas (padrões de emissão), a Resolução CONAMA 008/1990 estabelece limite para os seguintes equipamentos: caldeiras, geradores de vapor, centrais para geração de energia elétrica, fornos, fornalhas, estufas e secadores para geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores, com potência nominal de até 70 MW (BRASIL, 1990b).

Para as fontes fixas que se enquadram nas características supracitadas, a resolução estabelece limites para a emissão de partículas totais, densidade colorimétrica segundo escala de Ringelmann e dióxido de enxofre, variando os limites de acordo com a área em que está a fonte fixa, variando de classe I a classe III, dependendo do uso e ocupação (BRASIL, 1990b).

Já a Resolução CONAMA 382/2006, a mais atual em termos de emissões de fontes fixas, estabeleceu limites específicos de acordo com a tipologia da fonte, incluindo também limites para fontes com potência térmica nominal maior que 70 MW, permitindo ainda que o órgão licenciador estabeleça novos parâmetros caso julgue pertinente (BRASIL, 2006).

São especificados limites para geração de calor com óleo combustível, gás natural, bagaço de cana-de-açúcar, derivados de madeira, turbinas a gás para geração de energia elétrica, refinarias de petróleo, fabricação de celulose, fusão secundária de chumbo, indústria de alumínio primário, fusão de vidro, indústria de cimento Portland, produção de fertilizantes, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e ácido nítrico, indústrias siderúrgicas e usinas de pelotização de minério de ferro (BRASIL, 2006).

No âmbito estadual, no estado de Santa Catarina, a Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009, institui o Código Estadual do Meio Ambiente e trata dos padrões de qualidade e estabelece padrões adicionais aos existentes em âmbito federal (SANTA CATARINA, 2009).

Sobre os padrões de emissão, a lei supracitada define que é proibida a emissão de fumaça por parte de fontes estacionárias com densidade colorimétrica superior ao padrão um da escala de Ringelmann,

salvo por período de 15 minutos diários para aquecimento de fornalha e por três minutos, consecutivos ou não, em cada uma hora (SANTA CATARINA, 2009).

A referida legislação determina que cabe ao Conselho Estadual do Meio Ambiente de Santa Catarina (CONSEMA/SC) regulamentar os padrões de emissão por fontes estacionárias assim como os métodos de análise (SANTA CATARINA, 2009), regulamentação esta que ainda não foi realizada.

3.3.1 Legislação Ambiental em outros países

Quando se trata de legislação ambiental referente a controle de poluição atmosférica, a legislação dos Estados Unidos da América é referência para todo o globo. Em 1970, foi promulgada a lei federal intitulada *The Clean Air Act*, que abrange e regula as emissões atmosféricas de fontes fixas e móveis, a lei autorizava a Agência de proteção Ambiental (EPA – Environmental Protection Agency), a estabelecer os padrões de qualidade nacionais (USEPA, 2016).

A lei definiu metas e prazos de qualidade do ar para serem atingidos em todos os estados americanos já em 1975, com objetivo de proteger a saúde e o bem-estar público dos poluentes atmosféricos, os estados também foram orientados a desenvolver planos de implementação da lei (USEPA, 2016). As alterações na lei, desde então, foram em 1977 e 1990, para redefinição de metas e prazos de qualidade do ar, além da revisão em 1990 da seção 112 que trata das fontes majoritárias de poluição (USEPA, 2016).

Na América latina, a legislação Chile se aproxima da legislação de Santa Catarina quanto ao uso da Escala de Ringelmann. O Artigo nº 14, do Decreto nº 4 do Ministério da Saúde estabelece que, com o objetivo de fiscalizar a emissão de material particulado de fontes estacionárias, o serviço de saúde do ambiente da região metropolitana poderá controlar a emissão de fumaça aplicando a Escala de Ringelmann, sem prejuízo de outros métodos de aferição (CHILE, 1992).

Segundo o decreto, as fontes estacionárias não poderão emitir fumaça com densidade colorimétrica superior ao nº 2 da escala de Ringelmann, salvo por período de 15 minutos por dia, nas operações de partida e por três minutos consecutivos ou não, em qualquer período de uma hora (CHILE, 1992).

Em se tratando do Chile, a situação da poluição atmosférica tem especial complexidade pela localização geográfica da cidade, que é um

vale próximo a Cordilheira dos Andes, que, aliado a outros fatores como o período de seca no inverno e a estabilidade meteorológica, dificultam a dispersão de poluentes atmosféricos.

É comum as autoridades chilenas decretarem emergência ou pré emergência quanto a poluição atmosférica na cidade de Santiago, obrigando a diminuição do número de carros circulando em 20% e a paralisação de 450 indústrias, entre 300 e 499 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de material particulado no ar é considerada pré emergência, acima de 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ é declarada situação de emergência (G1 PR, 2016).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente do Chile, a poluição atmosférica é responsável por cerca de 4 mil mortes prematuras por ano, as autoridades responsabilizam, entre outras fontes, a fumaça gerada em churrascos feitos pelos chilenos para comemorar vitórias da seleção chilena de futebol (G1 PR, 2016).

O ministro do Meio Ambiente, Pablo Badenier, em entrevista, relatou que as estações de monitoramento da qualidade do ar registraram altos picos de material particulado entre dez horas da noite e três da manhã, e atribui isto a churrascos e a calefação a lenha (G1 PR, 2016). O Subsecretário do Meio Ambiente Marcelo Mena declarou ainda que cada emergência ou pré emergência de poluição atmosférica dos últimos três anos foi em dias subsequentes a jogos de futebol da seleção chilena (G1 PR, 2016).

3.4 CARVÃO VEGETAL

A produção de carvão vegetal no Brasil corresponde a 1/3 da produção mundial, sendo que grande parte da produção é utilizada na siderurgia (MEIRA et al., 2005; PINHEIRO, 2006; SANTOS; HATAKEYAMA, 2012, apud BRAND et al., 2015). Em 2005, 43,3% do consumo de carvão no Brasil esteve diretamente relacionado a indústria siderúrgica (BRASIL, 2006 apud UHLIG, 2008), neste mesmo ano, foi registrado no total a comercialização de 5,5 milhões de toneladas de carvão vegetal (IBGE, 2006 apud UHLIG, 2008), o consumo brasileiro de carvão vegetal pelo setor residencial representa 8% do total (ARANTES; CINTRA, 2009, apud DIAS JÚNIOR et al., 2015).

Na região sul do Brasil, o uso siderúrgico do carvão vegetal é pouco significativo, contudo, em se tratando de uso doméstico, destaca-se sua aplicação no preparo de churrasco, alimento de grande importância cultural no Brasil, principalmente nos estados do Sul do país (BRAND et al., 2015).

Brand et al analisaram a qualidade do carvão vegetal vendido na região sul de Santa Catarina através de 12 marcas de carvão encontradas nos estabelecimentos comerciais da região. Dentre as amostras, foram identificadas diferentes espécies vegetais utilizadas para produção do carvão, que foram: Eucalipto, Acácia Negra, Essências florestais diversas, Misto de essências exóticas e nativas, Carvão especial limpo e granulado e Eucalipto com Bracatinga plantada, sendo as mais utilizadas são o Eucalipto e a Acácia Negra (BRAND, et al., 2015). A **Tabela 4** a seguir resume as propriedades das amostras de carvão analisadas:

Tabela 4. Propriedades do carvão vegetal comercializado no sul de Santa Catarina

	Média	Desvio Padrão
Densidade aparente (g/cm ³)	0,403	0,073
Umidade (%)	7,35	0,93
Poder calorífico superior (kcal/kg)	6449	1488
Teor de material volátil (%)	32,85	6,22
Teor de carbono fixo (%)	65,17	5,62
Teor de cinzas (%)	1,96	1,07

Elaboração: Autor. Fonte: BRAND et al., 2015.

Outros elementos que podem estar presentes na composição do carvão vegetal, de acordo com Figueredo et al. (2014) são: alumínio, arsênio, boro, cálcio, cromo, cobre, ferro, potássio, magnésio, manganês, sódio, níquel, fósforo, chumbo, enxofre e zinco, todos com baixos teores. O carvão vegetal apresenta também teor de monóxido de carbono significativo (FIGUEREDO et al., 2014), oriundo da carbonização da madeira para produção do carvão.

Dentre as marcas analisadas, as maiores densidades foram observadas no carvão produzido a partir de acácia negra e eucalipto, e as menores, no carvão de essências florestais diversas (BRAND et al., 2015).

O menor teor de umidade encontrado foi na acácia negra e o maior em essências florestais diversas, sendo que a média apresentou altos valores de umidade, se comparados com o valor estabelecido pelo Selo Premium, que estabelece padrões de qualidade de referência para o carvão vegetal de uso doméstico, promulgado pela Resolução nº10 SAA, de 11

de julho de 2003, no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2003). O valor estipulado para a umidade para o referido selo é abaixo de 5% (SÃO PAULO, 2003).

Quanto ao poder calorífico, as amostras mostraram grande variação, poder calorífico baixo indica que a carbonização da madeira foi mal realizada durante a produção do carvão (BRAND et al., 2015). Nesse sentido nenhuma espécie se destacou, visto que o eucalipto apresentou em uma amostra o maior poder calorífico dentre todas (7944 kcal/kg) e em outra amostra de eucalipto, a segundo menor valor encontrado (4458 kcal/kg) (BRAND et al., 2015).

Os valores médios do teor de carbono fixo, teor de material volátil e teor de cinzas das amostras, ficaram abaixo do valor de referência do Selo Premium do estado de São Paulo, que estabelece para teor de carbono fixo superior a 75%, teor de material volátil inferior a 23,5% e teor de cinzas inferior a 1,5% (SÃO PAULO, 2003; BRAND et al., 2015).

Para estes parâmetros, houve grande variação na composição de todas as amostras, em especial, quanto ao teor de material volátil, a acácia negra apresentou maiores porcentagens as espécies diversas, maior porcentagem, situação que se inverte quanto ao carbono fixo, maior porcentagem nas espécies diversas e menor porcentagem na acácia negra (BRAND et al., 2015).

Estes resultados evidenciam que o carvão comercializado no sul de Santa Catarina é de baixa qualidade para uso doméstico, por possuir alto teor de umidade, material volátil e cinzas, além de baixo poder calorífico superior e carbono fixo (BRAND et al., 2015).

Dias Júnior et al. (2015) avaliou a influência da granulometria na combustão do carvão vegetal, utilizando carvão produzido no estado de São Paulo com eucalipto. As características do carvão utilizado encontram-se na Tabela 5 a seguir:

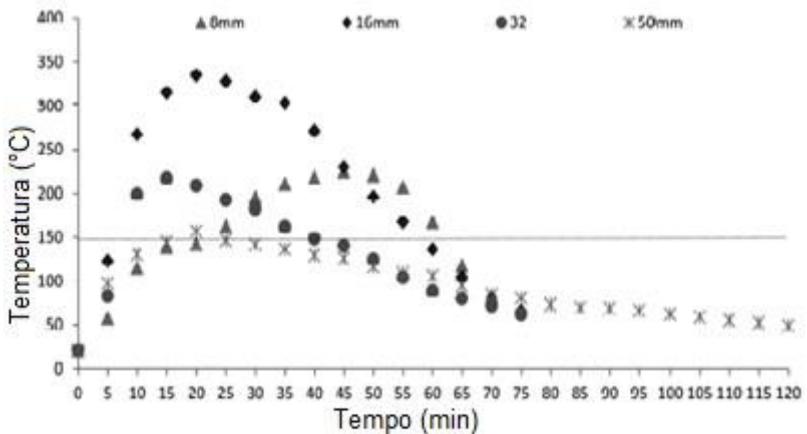
Tabela 5. Propriedades do carvão vegetal de Dias Júnior et al., (2015)

Densidade aparente (g/cm ³)	0,32
Umidade (%)	3,93
Poder calorífico superior (kcal/kg)	7805
Teor de material volátil (%)	16,9
Teor de carbono fixo (%)	81,9
Teor de cinzas (%)	1,2

Fonte: DIAS JÚNIOR, 2015.

Utilizando o carvão com as características supracitadas, Dias Júnior et al., (2015) testou quatro granulometrias diferentes de carvão, com diâmetros de 8 mm, 16 mm, 32 mm e 50 mm, verificando assim, que o carvão com granulometria de 16 mm de diâmetro atingiu as maiores temperaturas, como mostra a **Figura 1**:

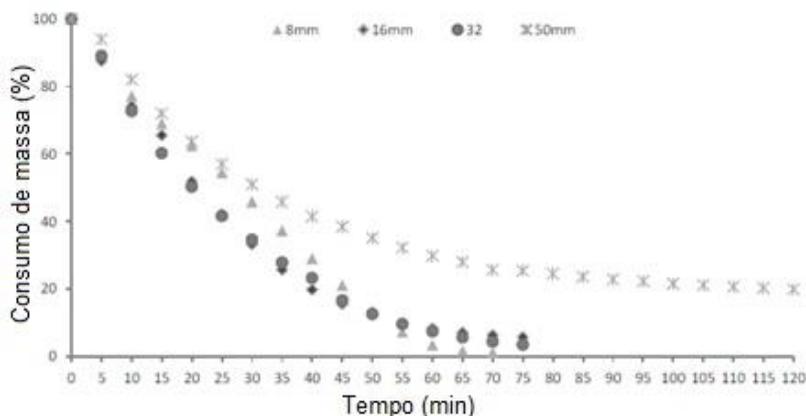
Figura 1. Variação da temperatura em função do tempo durante o teste do carvão



Fonte: DIAS JÚNIOR et al., 2015.

A menor temperatura alcançada pelo carvão de 50 mm de diâmetro pode estar relacionada a menor área superficial específica, dificultando o contato do comburente com toda a massa de carvão. Dias Júnior, (2015) relaciona o diâmetro do carvão com a menor superfície de contato entre os pedaços de carvão, dificultando a transferência de energia e não permitindo a formação de um “bloco contínuo” de carvão, o que é esperado para blocos menores de carvão. A Figura 2 mostra o consumo de massa do carvão de acordo com o tempo e seu diâmetro:

Figura 2. Consumo acumulado de massa em função do tempo durante teste do carvão



Fonte: DIAS JÚNIOR et al., 2015.

Avaliando o consumo de massa durante a combustão do carvão, percebe-se que o carvão de 50 mm de diâmetro tem um consumo de massa menor e mais uniforme durante o tempo, contudo, a liberação de energia também é menor, de acordo com a **Figura 2**, onde o carvão de diâmetro 16 mm atingiu a maior temperatura, enquanto o carvão de 50 mm de diâmetro alcançou a menor temperatura.

Entretanto, cabe destacar que o consumo do carvão no teste utilizado, que segue a metodologia de Quirino e Brito (1991, apud DIAS JÚNIOR, 2015), não condiz com a situação verificada em uma churrasqueira convencional, onde o acendimento do carvão é um processo lento e gradual, até que a maior parte do carvão esteja em combustão.

Para o consumo residencial de carvão vegetal, normalmente são disponibilizados para o consumidor, sacos de carvão de 3 kg a 5 kg a unidade, sendo, portanto, a quantidade geralmente utilizada na preparação de um churrasco, podendo variar de acordo com a quantidade de carne preparada e com o tempo de duração do churrasco.

CHURRASQUEIRA

No Brasil há a presença de churrasqueiras em grande número de residências, normalmente as churrasqueiras são confeccionadas em alvenaria, dispostas em áreas de lazer, sacadas de apartamentos, varandas e até mesmo dentro das residências, na cozinha ou em espaços chamados de “espaço gourmet”. Outras opções de churrasqueira que são bastante difundidas, entre elas estão churrasqueiras pré-fabricadas em concreto ou em metal. Existem ainda outras opções que não levam carvão vegetal, como churrasqueiras a gás ou elétricas, porém estas normalmente são opções que os consumidores escolhem quando não há viabilidade de se construir uma churrasqueira de alvenaria tradicional. A figura ilustra uma churrasqueira convencional em alvenaria.

Figura 3. Churrasqueira em alvenaria



Fonte: <http://www.casaconstruida.com.br/construcao/projetos/churrasqueira-de-tijolo>

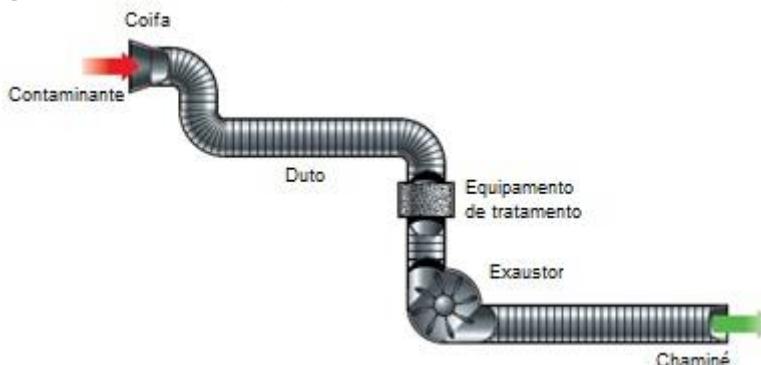
Levando em conta as características do modelo de churrasqueira mais difundido no Brasil, avalia-se a aplicabilidade dos conceitos de ventilação para a exaustão dos gases produzidos.

3.5 VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA

Os sistemas de exaustão locais são desenvolvidos para capturar e remover efluentes gasosos, capturando-o através de um campo de fluxo de ar, antes que estes escapem para o ambiente ou o ambiente de trabalho, qualquer orifício com sucção, independente da configuração física, é incluído como sistema de exaustão local (ACGIH, 1998).

Em maioria, os sistemas de ventilação local exaustora são compostos por captor, condutos, exaustor, sistema de tratamento e chaminé, como ilustrado na Figura 4 a seguir:

Figura 4. Sistema de ventilação local exaustora



Fonte: Health and Safety Authority, 2014.

Dentre as características necessárias para o bom funcionamento de um sistema de ventilação local exaustora está a vedação do sistema. Um sistema bem vedado serve para evitar perdas na parte da pressão negativa, onde o efluente é succionado, assim prejudicando a eficiência de captação de poluentes do sistema, como também evitar o vazamento do efluente, para locais indesejados, na parte onde há pressão positiva no sistema (HEALTH AND SAFETY AUTHORITY).

O material em que é feito o sistema também deve levar em consideração as características do efluente gasoso, quando o efluente é inflamável, o material não pode ser capaz de gerar uma fonte de ignição, assim como necessita de resistência a abrasão, pelo atrito com poeiras, ou resistência a corrosão por diferentes substâncias químicas. (HEALTH AND SAFETY AUTHORITY).

Os efluentes gasosos, como gases, vapores e fumos, além de poeira fina, de 20 microns ou menos de diâmetro, incluindo as partículas inaláveis, não apresentam efeitos inerciais significativos, ou seja, irão se mover junto com ar em que estão misturados (ACGIH, 1998).

As coifas e outros equipamentos utilizados para a captura dos efluentes gasosos podem ter uma ampla gama de configurações, contudo, no geral, são agrupadas em dois tipos, exteriores e enclausurastes, o tipo utilizado dependem essencialmente das características do processo que produz o efluente gasoso e do tipo de contaminante gerado (ACGIH, 1998).

Equipamentos de coleta enclausurantes são aquelas que isolam o contaminante do meio externo completamente ou parcialmente, em seu próprio processo de geração (ACGIH, 1998). Como por exemplo, uma cabine de pintura, como mostra a Figura 5 a seguir:

Figura 5. Cabine de pintura



Fonte: <http://oficinaalinhacar.com.br/galeria/platinum/>

Já as coifas ou equipamentos de coleta exteriores são adjacentes a uma fonte de emissão de poluentes atmosféricos, porém sem envolvê-la (ACGIH, 1998). A Figura 6 ilustra o emprego de equipamentos de coleta exteriores a fonte geradora.

Figura 6. Coifas em uma planta industrial



Fonte: <http://www.superiormetalworks.com/installations>

Em ambos os casos, o fluxo de ar entrante pelo captor criado pelo exaustor deve ser suficientemente alto para que o contaminante chegue até o captor (ACGIH, 1998). Movimentos de ar alheios ao fluxo criado pelo exaustor podem perturbar o fluxo de coleta induzido, exigindo assim maiores taxas de fluxo de ar para superar os efeitos perturbadores, nesse sentido, a eliminação de fontes de movimento de ar externos auxiliam na redução de custos associados a necessidade de maiores vazões de ar (ACGIH, 1998).

Dentre os movimentos de ar intervenientes na coleta dos poluentes estão correntes de ar ambiente, de processos quentes, movimentação de máquinas, movimentação do material, resfriamento ou aquecimento rápidos de equipamentos, formato e localização do captor, interferência do operador entre o fluxo e o captor (ACGIH, 1998).

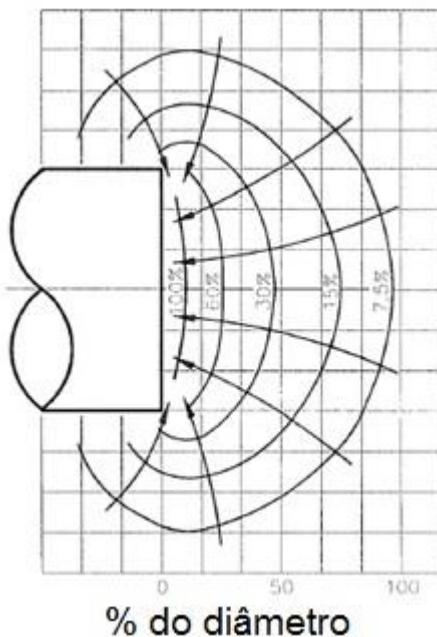
Alguns parâmetros são essenciais para o funcionamento dos captores, dentre eles está a velocidade de captura, que é a velocidade de

ar mínima em todos os pontos da abertura ou face do captor, capaz de vencer correntes de ar opostas e capturar os contaminantes do ar para dentro do captor (ACGIH, 1998). Outro parâmetro importante é a velocidade no duto que transporta os efluentes gasosos coletados, quando este efluente possui materiais sólidos, deve-se garantir que a velocidade no duto seja igual ou superior a mínima velocidade necessária para mover as partículas juntamente com o fluxo de ar (ACGIH, 1998).

A velocidade de captura é determinada através da vazão de exaustão dividido pela área de abertura do captor. A definição da velocidade necessária para captura dependerá de características do poluente, como estado físico, composição química, volume gerado, temperatura, distância da fonte ao captor, toxicidade, além das características geométricas do captor (ACGIH, 1998).

A velocidade de captura definida para cada situação é responsável por criar um gradiente de velocidade no entorno do captor, dependendo das características do poluente, ao entrar na região deste gradiente, o poluente deverá ser coletado.

Figura 7. Gradiente de velocidade em um captor



Fonte: ACGIH, 1998.

A seguir, são apresentadas faixas de velocidade de captura indicadas de acordo com os tipos de poluentes.

Tabela 6. Velocidades de captura e condições de dispersão

Condição de dispersão do contaminante	Exemplos	Velocidade de Captura (m/s)
Liberado sem velocidade, em ambiente sem corrente de ar	Tanques de evaporação, desengorduramento	0,25 a 0,50
Liberado em baixa velocidade, em ambiente com baixa velocidade de corrente de ar	Cabines de pulverização, enchimentos de recipientes, soldagens, chapeamento	0,50 a 1,00
Gerado em ambiente com alta velocidade de corrente de ar	Spray de pintura em cabines rasas, trituradores, enchimento de barris	1,0 a 2,50
Liberado em alta velocidade, em zona de alta velocidade de corrente de ar	Esmerilhamento, jateamento abrasivo	2,50 a 10,00

Fonte: ACGIH, 1998.

A ACGIH (1998) define velocidades de captura para dezenas de casos específicos de acordo com o tipo de captor e o tipo de efluente gasoso. Além de outros parâmetros, existem ainda fórmulas específicas para tipos diferentes de coifas, relacionadas a distância em que serão posicionadas da fonte do poluente, ou ainda, para processos quentes, cálculos genéricos para coifas circulares ou retangulares, longe ou próxima da fonte geradora (ACGIH, 1998), contudo a churrasqueira não se enquadra com os casos estudados na bibliografia a respeito da ventilação local exaustora aplicada a processos industriais.

Em relação a uma churrasqueira residencial convencional, a melhor aproximação para a aplicação da ventilação industrial é no caso de pequena distância entre a fonte e a captação, sendo que a distância entre captor e fonte não deve exceder aproximadamente o diâmetro da fonte poluidora, ou aproximadamente um metro (ACGIH, 1998). A

determinação da vazão de ar necessária para o captor é dada pelas fórmulas:

Coifa circular:

$$Q_t = 4,7 * (Dt)^{2,33} * \Delta t^{0,41} \quad (1)$$

Onde:

Q_t = vazão de ar (cfm)

D_t = diâmetro do captor (ft)

Delta t = diferença de temperatura da fonte e do ambiente (F)

Coifa retangular:

$$Q_t = 6,2 * (b)^{1,33} * \Delta t^{0,42} * L \quad (2)$$

Onde:

Q_t = vazão de ar (cfm)

b = largura do captor (ft)

L = comprimento do captor (ft)

Delta t = diferença de temperatura da fonte e do ambiente (F)

Contudo, mesmo a fórmula levando em consideração a temperatura da fonte quente e as dimensões do captor, outras variáveis não são levadas em consideração, como a vazão gerada de gases e a necessidade ou não de diluição do efluente gasoso.

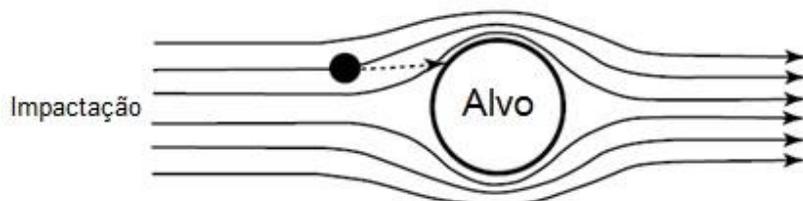
Além disso, no caso da churrasqueira, existe um enclausuramento parcial da fonte poluidora, que também não é levado em consideração no cálculo, desta maneira a real vazão necessária para a coleta do efluente gasoso na churrasqueira não pode ser dimensionada deste modo com precisão. O volume de gases de combustão gerados poderia ser estimado por estequiometria, contudo, a composição do carvão vegetal segundo a bibliografia consultada não especifica completamente a composição química do carvão, como visto na Tabela 4. Propriedades do carvão vegetal comercializado no sul de Santa Catarina.

3.6 Mecanismos de coleta de material particulado

Para a remoção de material particulado do fluxo gasoso, alguns mecanismos são empregados, dentre os mais comuns estão aqueles relativos ao contato do material particulado com alguma superfície, que pode ser uma gotícula de água, a fibra de um tecido, ou outro material. Os principais mecanismos empregados para remoção de material particulado de um fluxo gasoso são:

Impactação inercial: colisão de partículas, geralmente maiores que $1\ \mu\text{m}$ de diâmetro, contra um obstáculo seco ou úmido, devido a inércia da partícula, a tendência desta é seguir em linha reta, enquanto o gás flui contornando o obstáculo (LISBOA; SCHIRMER, 2007), como ilustra a **Figura 8**.

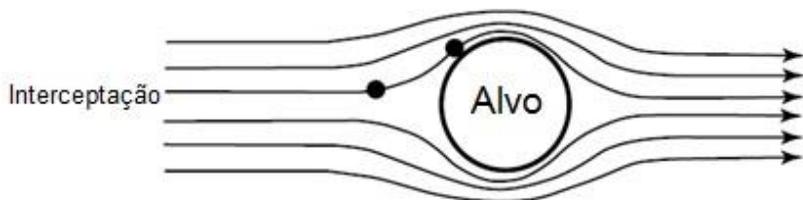
Figura 8. Impactação inercial



Fonte: SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001.

Interceptação: mecanismo onde partículas de $0,1\ \mu\text{m}$ a $1\ \mu\text{m}$ de diâmetro ao passarem muito próximas a superfície de outra partícula, acabam colidindo, devido sua inércia não permitir que a partícula siga o fluxo gasoso, é um mecanismo menos eficiente de coleta se comparado a impactação inercial (SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001), como ilustrado na **Figura 9**:

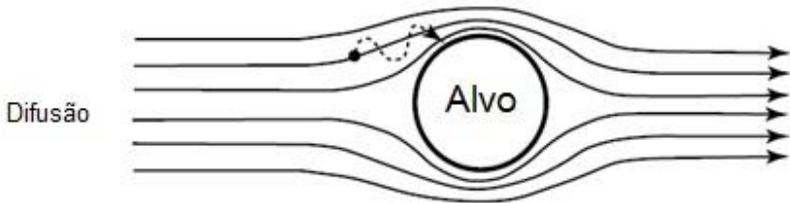
Figura 9. Interceptação



Fonte: SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001.

Difusão: ocorre em partículas submicrômicas, por resultado do movimento Browniano, as colisões destas partículas com as partículas do gás são randômicas, quando próximas da superfície do obstáculo maior a probabilidade de impacto, como em alguns filtros de tecido, já em lavadores de gases por exemplo, o impacto destas partículas com gotículas de água é mais improvável (SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001), como ilustrado na **Figura 10**:

Figura 10. Intercepção



Fonte: SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001.

Força eletrostática: partículas que adquirem carga elétrica e são expostas a um campo elétrico movem-se em direção a região de polaridade oposta à sua, fugindo da linha de fluxo do gás (SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001).

Força centrífuga: A força centrífuga age nas partículas que estão em trajetória circular, fazendo-a sair tangencialmente a linha de fluxo e colidir com um obstáculo (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Força gravitacional: a força da gravidade age sobre as partículas, especialmente as com diâmetro maior que 20 μm , fazendo elas sedimentarem (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Estes princípios são aplicados a diferentes tipos de sistemas de tratamento de efluentes gasosos, que são divididos entre coletores secos e coletores úmidos.

3.7 EQUIPAMENTOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES GASOSOS

Para o controle da poluição atmosférica, atuando diretamente no tratamento dos efluentes gasosos, os equipamentos utilizados são separados em dois grupos, os chamados coletores secos e os coletores úmidos

3.7.1 Coletores secos

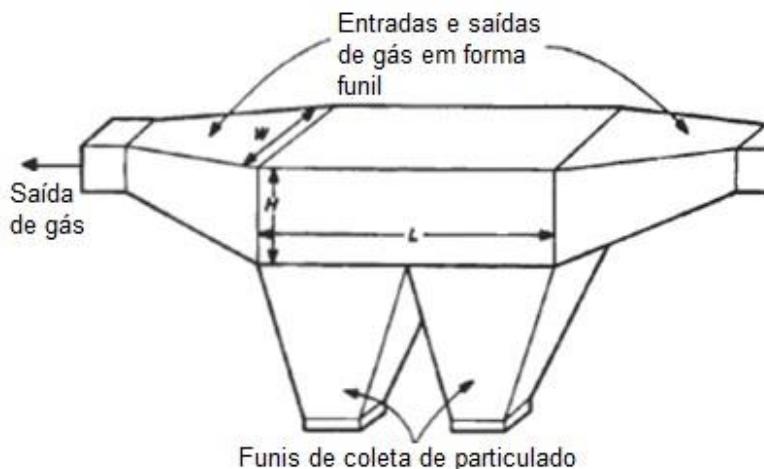
Os coletores secos utilizam principalmente da ação da gravidade e da interceptação das partículas por uma superfície para a remoção de material particulado do efluente gasoso.

3.7.1.1 Coletores mecânicos inerciais e gravitacionais

Os coletores inerciais e gravitacionais são equipamentos que funcionam a partir da sedimentação gravitacional do material particulado, exemplos deste tipo de equipamento são a câmara de sedimentação gravitacional e o balão gravimétrico.

A câmara de sedimentação gravitacional possui dimensão suficiente para reduzir a velocidade da corrente gasosa em seu interior, de forma que as partículas em suspensão tenham tempo para sedimentar (LISBOA; SCHIRMER, 2007). A Figura 11 ilustra o funcionamento de um coletor gravitacional.

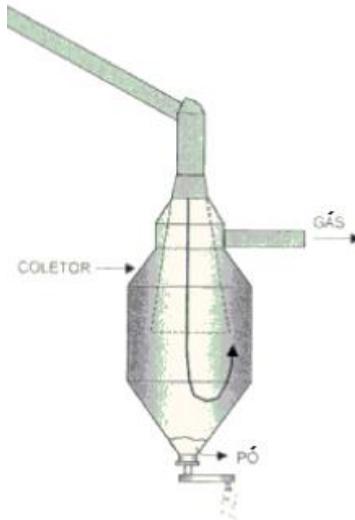
Figura 11. Câmara de sedimentação gravitacional



Fonte: CHEREMISINOFF, 2002.

No caso do balão gravimétrico, o fluxo gasoso é forçado para baixo e ao entrar no balão, por ter a área de confinamento do gás expandida, perde velocidade e as partículas ficam depositadas no fundo do balão (CHAVES, 2013), como mostra a **Figura 12**.

Figura 12. Esquema de funcionamento do balão gravimétrico



Fonte: DE OLIVEIRA e MARTINS, (2012), apud CHAVES (2013).

Todavia, o uso destes equipamentos é mais frequente é como pré-coletor, devido sua baixa eficiência na remoção de partículas menores que $40\ \mu\text{m}$, estes equipamentos possuem como vantagem a construção simples, a coleta a seco e a baixa perda de carga (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

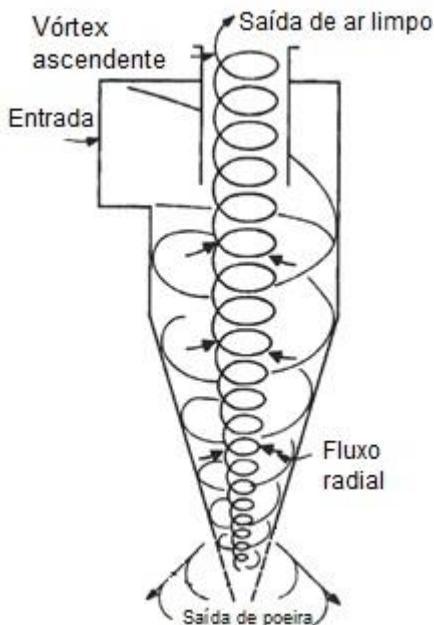
3.7.1.2 Coletores mecânicos centrífugos

Exemplo de coletores centrífugos são o ciclone e o multiciclone, este último, uma associação em paralelo de ciclones. Os ciclones são constituídos por uma câmara com corpo cônico-cilíndrico, a corrente gasosa entra tangencialmente em alta velocidade no equipamento, formando uma espiral descendente externa e uma espiral ascendente interna, a força centrípeta impulsiona as partículas contidas no gás para a parede do equipamento e, desta maneira, a componente vertical da força

e a gravidade forçam as partículas para o fundo do ciclone (GALVÃO FILHO, apud CHAVES, 2013).

A Figura 13 ilustra o funcionamento do ciclone:

Figura 13. Esquema de funcionamento do ciclone



Fonte: CHEREMISINOFF (2002).

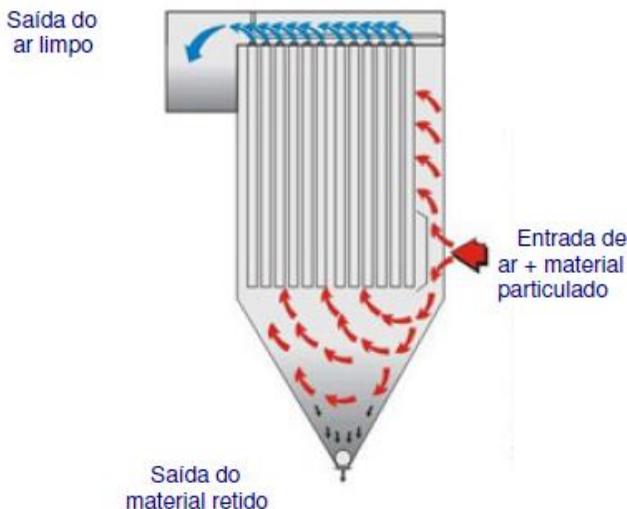
Assim como os coletores gravitacionais, o ciclone é utilizado principalmente como pré-coletor, visto a sua eficiência ser maior para partículas maiores de $10\ \mu\text{m}$, ele também possui baixo custo de construção e manutenção, exige espaços menores que coletores gravitacionais, não tem restrições de temperatura e pressão, contudo, pode entupir com partículas adesivas ou higroscópicas e sofre de abrasão para determinadas partículas, além da perda de carga do equipamento ser maior que a dos coletores gravitacionais (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

3.7.1.3 Filtros de tecido

Os filtros de tecido atuam na separação das partículas sólidas do gás através da colisão das partículas na superfície do filtro, que permite a passagem do gás através de seus poros, mas retém a grande maioria das partículas sólidas (LISBOA; SCHIRMER, 2007). Inicialmente as partículas aderem na superfície do tecido, à medida que a camada de partículas aumenta, se tornando o meio de coleta, fazendo com que, em certos intervalos de tempo, seja necessária a remoção das partículas coletadas para evitar a colmatagem do filtro (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Dentre os filtros de tecido mais utilizados destaca-se o filtro de manga, que tem formato tubular e alongado, sendo classificado de acordo com o mecanismo de limpeza, que pode ser por sacudimento mecânico, ar reverso ou jato pulsante de ar comprimido. A **Figura 14** ilustra o funcionamento do filtro manga:

Figura 14. Esquema de funcionamento do filtro manga



Fonte: LISBOA; SCHIRMER, (2007).

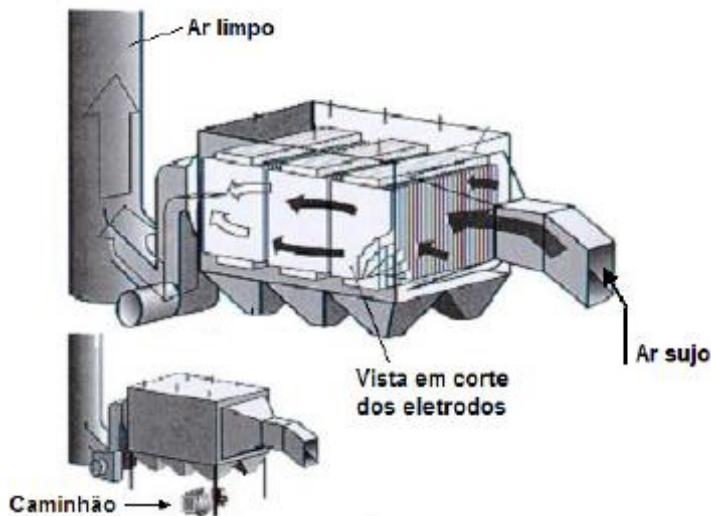
Os filtros de tecido apresentam alta eficiência de coleta de material particulado, chegando a mais de 99,9%, operam sem maiores restrições com diversas vazões de efluente gasoso e diversas concentrações de material particulado, possibilitam fácil recuperação do material, operação e manutenção são relativamente simples, os custos de operação e a perda de carga são moderados, além de ter vida útil de até 20 anos (LISBOA;

SCHIRMER, 2007). Contudo, a temperatura máxima depende do material da manga, o material mais resistente atualmente utilizado é o teflon, que suporta em uso contínuo até 260 °C, pode requerer grandes espaços e não pode ser usado onde haja condensação de umidade do ar (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

3.7.1.4 Precipitador eletrostático

O precipitador eletrostático utiliza eletricidade para a formação de íons gasosos através da descarga de corona de alta voltagem no eletrodo de descarga, os íons gasosos ou elétrons ao bombardearem partículas sólidas ou líquidas, as carregam eletricamente e assim, o campo elétrico existente entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta, atrai as partículas carregadas para o eletrodo com polaridade oposta ao da partícula. (LISBOA; SCHIRMER, 2007). A **Figura 15** ilustra o funcionamento de um precipitador eletrostático.

Figura 15. Esquema de funcionamento do precipitador eletrostático



Fonte: CETESB, (1987), apud LISBOA; SCHIRMER, (2007).

Como vantagens, o precipitador eletrostático apresenta eficiência de coleta de material particulado que pode exceder 99,9%, sem limite inferior teórico para o tamanho da partícula coletada, baixa perda de carga, baixo custo operacional, operam em temperaturas de até 650 °C,

longa vida útil, chegando a mais de 20 anos, atende altas vazões de gases e pode operar continuamente por longos períodos sem manutenção (LISBOA; SCHIRMER, 2007). No entanto, o precipitador eletrostático requer alto investimento inicial, apresenta risco de explosão com gases ou partículas combustíveis, exige grandes espaços para ser instalado, cuidados especiais para evitar acidentes com alta voltagem, além de deficiência na coleta de alguns materiais com resistividade muito alta ou muito baixa. (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

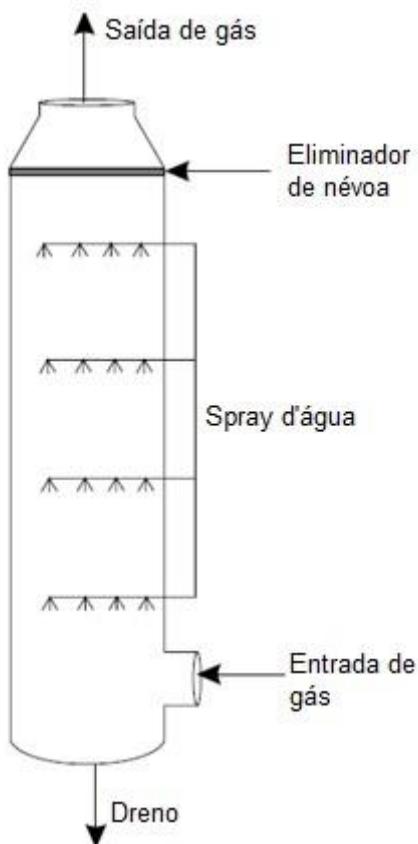
3.7.2 Coletores úmidos

Existem diversos modelos de coletores úmidos, ou lavadores, eles são eficientes na remoção de partículas, utilizam geralmente água para lavar os gases e remover as partículas direto do fluxo de gás, os lavadores também propiciam a remoção simultânea ao material particulado e de gases poluentes solúveis (FLAGAN; SEINFELD, 1988). A seguir são especificados os tipos mais comuns de lavadores de gases utilizados no controle de material particulado.

3.7.2.1 Torre de spray

O lavador de spray consiste em uma câmara por onde o gás a ser lavado passa em contracorrente do sentido do líquido atomizado dentro da câmara, o gás segue para a chaminé na parte superior do lavador e o líquido desce por gravidade até ser coletado no fundo do lavador (FLAGAN; SEINFELD, 1988). A **Figura 16** ilustra o funcionamento de um lavador de spray.

Figura 16. Esquema de funcionamento do lavador de spray



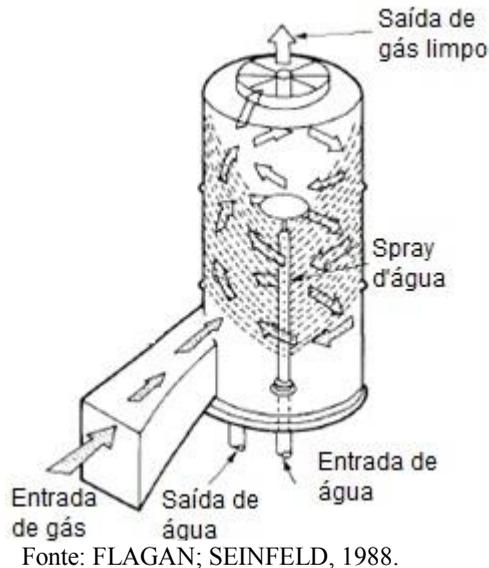
Fonte: SCHNELLE JUNIOR; BROWN, 2001.

3.7.2.2 Lavador ciclônico

O lavador ciclônico reúne as características de um ciclone e uma torre de spray (CORBITT, 1990), o gás é introduzido radialmente em uma câmara cilíndrica, onde é pulverizado o líquido de lavagem de modo que

as gotas do líquido alcancem as paredes da câmara antes da saída do gás (FLAGAN; SEINFELD, 1988). A **Figura 17** ilustra o funcionamento do lavador ciclônico.

Figura 17. Esquema de funcionamento do lavador ciclônico

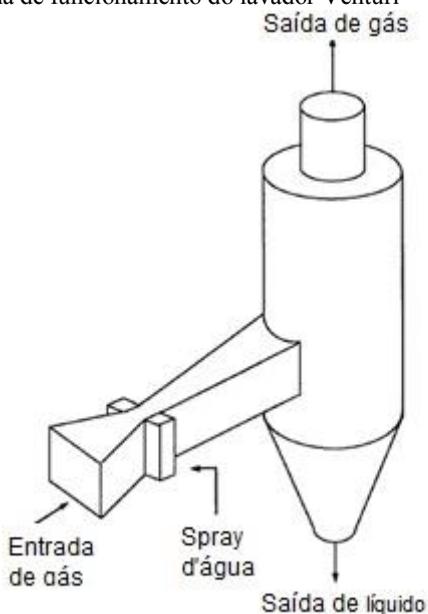


3.7.2.3 Lavador Venturi

Os lavadores Venturi são um dos mais comuns equipamentos de remoção de material particulado devido a sua simplicidade e a relativa alta eficiência na remoção de partículas na faixa de $0,5 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$ de diâmetro (CORBITT, 1990).

O gás em alta velocidade passa pelo tubo Venturi, onde é adicionado um líquido em baixa pressão, geralmente água, podendo ser adicionado tanto no estrangulamento do tubo Venturi, como antes do estrangulamento, na seção convergente, em ambos os casos, o líquido de lavagem é atomizado pela turbulência na garganta, propiciando o choque entre o material particulado, posteriormente um separador é utilizado para remover a fase líquida (CORBITT, 1990). A **Figura 18**, ilustra a concepção de um lavador Venturi:

Figura 18. Esquema de funcionamento do lavador Venturi



Fonte: CORBITT, 1990.

Os lavadores de gases de modo geral, podem atingir altas eficiências, serem aplicados em gases a altas temperaturas, coletam partículas adesivas, não possuem restrições quanto a umidade do efluente a ser tratado, podem tratar além de partículas, alguns gases (LISBOA; SCHIRMER, 2007). Todavia, apresentam altas perdas de carga, implicando em sistemas de ventilação mais potentes e custos operacionais mais altos, podem gerar uma pluma visível, proveniente da condensação de umidade, necessitam uso de materiais resistentes a corrosão e geram efluentes líquidos.

3.8 Sistema de tratamento de gases de churrasqueira aplicado no Brasil

No Brasil, foi aplicado sistema de lavadores de gases do tipo Venturi para tratamento de material particulado de uma churrascaria em Curitiba, no estado do Paraná, associado a um sistema piloto de tratamento biológico de emissões atmosféricas que utiliza microalgas para remoção de dióxido de carbono e odores do efluente gasoso (MIKAMI, 2011; PASCOALOTTO, 2014).

O estudo de Mikami (2011) não levou em consideração o material particulado gerado na churrascaria, apenas o consumo de dióxido de carbono e a redução de odores provenientes dos efluentes gasosos. Visto que, apesar do estabelecimento atender a legislação ambiental quanto a emissão de efluentes gasosos, os odores gerados eram alvo constante da vizinhança, que reclamava dos fortes odores que persistiam durante quase o dia inteiro (G1 PR, 2012).

A Figura 19 ilustra o sistema de tratamento aplicado na churrascaria.

Figura 19. Reatores de microalgas para tratamento de odores da fumaça de churrascaria



Fonte: MIKAMI, 2011.

Ainda de acordo com Mikami (2011), a eficiência do tratamento com microalgas foi avaliada a depuração do odor realizando teste com cinco pessoas por dia, durante cinco dias, totalizando 25 amostras, realizando este procedimento na primeira e segunda bateladas e o mesmo procedimento, agora com 50 amostras na terceira batelada. A percepção do odor foi considerada apenas como perceptível ou não perceptível, não houve avaliação de intensidade, mesmo que um odor muito fraco, se

comparado ao odor pré tratamento, era considerado como resultado positivo (MIKAMI, 2011). Deste modo, os resultados obtidos para remoção de odores, 72% das amostras da primeira e da segunda bateladas não apresentaram odores, a terceira batelada apresentou 68% das amostras sem a identificação de odores (MIKAMI, 2011).

3.9 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE MATERIAL PARTICULADO

O monitoramento das emissões atmosféricas de material particulado é essencial no controle da poluição atmosférica, o monitoramento contínuo iniciou nos anos 60 na Alemanha, e se tornou exigência federal na década seguinte (USEPA, 2000). Nessa mesma década, a USEPA estabeleceu o uso dos *transmissometers* (equipamento que mede a fração de luz que atravessa um meio material) para o monitoramento contínuo da opacidade das emissões atmosféricas, fornecendo informações qualitativas do efluente (USEPA, 2000).

Dentre os vários métodos analíticos aprovados, ou em fase de testes pela USEPA, empregados para medição de material particulado, muitos utilizam algum destes cinco princípios:

Dispersão de luz: A luz é tanto absorvida quanto dispersa por partículas em seu caminho, a dispersão ocorre devido a reflexão e refração da luz pela partícula, a quantidade de luz dispersa é relacionada proporcionalmente a quantidade de partículas no caminho da luz.

Atenuação beta: Os raios beta podem ser absorvidos ou refletidos pelas partículas e a atenuação na intensidade dos raios beta é proporcional a quantidade de partículas presentes no gás.

Efeito Triboelétrico: A transferência de carga entre as partículas eletricamente carregadas em contato com a sonda é relacionada proporcionalmente a quantidade de partículas presentes no gás.

Extinção de Luz: A perda de intensidade da luz ao atravessar um meio é mensurada e relacionada proporcionalmente a quantidade de partículas presentes no gás através da comparação com a intensidade de referência para o cálculo da transmitância, que também pode ser convertida em opacidade.

Cintilação óptica: Assim como a extinção da luz, a cintilação óptica mede a quantidade de luz recebida, porém relacionando a modulação de frequência da luz devido ao movimento das partículas com a quantidade de partículas no gás.

Na medição qualitativa do efluente atmosférico, a escala de Ringelmann relaciona a densidade das colunas de fumaça com diferentes

tons de cinza, variando entre o branco e o preto através de cinco escalas, permitindo assim que as fumaças sejam comparadas, através da comparação visual. (USBM, 1967).

Esta escala foi introduzida aparentemente por William Kent em um artigo publicado no Engineering News, em 1897 (USBM, 1967). Kent propôs em 1899 que esta medida fosse aceita como padrão de densidade de fumaça para os testes em geradores de energia elétrica a combustão que estavam sendo formulados pela Sociedade americana de engenheiros mecânicos (USBM, 1967). Em 1910 a escala havia sido oficialmente reconhecida pelo legislativo de Massachusetts como regulamentação de emissão de fumaça para a cidade de Boston (USBM, 1967).

A escala de Ringelmann proporciona bons resultados se utilizado por um observador bem treinado (USBM, 1967). Todavia, deve ser ressaltado que os dados empíricos obtidos possuem limitações e estão sujeitos ao julgamento do observador, a opacidade aparente da fumaça depende da concentração de material particulado no efluente, do tamanho das partículas, as condições de iluminação natural e a cor das partículas e de outros gases presentes (USBM, 1967). Nesse contexto, o carbono não queimado é um dos principais responsáveis pela coloração negra em um efluente gasoso oriundo de carvão ou derivados de petróleo, sendo um indicativo da eficiência da combustão (USBM, 1967).

A USEPA relaciona ainda a escala de Ringelmann com transmitância de luz e a opacidade da pluma, esta relação é explicitada na Tabela 7:

Tabela 7. Relação entre escala de Ringelmann, opacidade e transmitância de luz

Escala de Ringelmann	Opacidade	Transmitância
1	20%	80%
2	40%	60%
3	60%	40%
4	80%	20%
5	100%	0%

Fonte: USEPA, 1993.

Além da escala de Ringelmann, outros métodos visuais são reconhecidos, como o Método 9, da USEPA, que é aplicado a fontes estacionárias para determinação da opacidade da pluma de efluentes, valendo-se da média de 24 leituras consecutivas em intervalos de 15

segundos, levando em conta também a presença de vapor d'água, ângulo de visão, fonte de luz, entre outros (USEPA, 1974). Além disso, é exigida a certificação do observador, com treinamento realizado com 50 plumas, sendo 25 brancas e 25 negras, apresentadas aleatoriamente, para a aprovação do observador, este não pode exceder 7,5% de erro na opacidade média das plumas, e 15% de erro em uma leitura única (USEPA, 1974).

Outro método de medição de material particulado em fontes fixas é a amostragem isocinética, que consiste em coletar uma amostra de gás garantindo que a velocidade do fluxo de gás na entrada do equipamento seja a mesma do fluxo de gás que se pretende analisar (CETESB, 1995).

Assim, o material particulado é retirado isocineticamente da fonte e recolhido em um filtro de fibra de vidro, mantido a uma temperatura que varia de 120 ± 14 °C (ou outras aprovadas para determinada aplicação), a massa das partículas é determinada gravimetricamente após a remoção de água combinada (USEPA, 1977). Desta maneira a amostragem isocinética fornece um resultado fidedigno e quantitativo do material particulado presente no fluxo de gasoso.

As normas da USEPA para realização da amostragem isocinética, assim como as respectivas normas aplicadas no Brasil estão identificadas na **Tabela 8**:

Tabela 8. Normas para realização de amostragem isocinética

	USEPA	ABNT	CETESB
Pontos de amostragem	Method 1	NBR 10700	L9.221
Velocidade e vazão dos gases	Method 2	NBR 11966	L9.222
Massa molecular seca do gás	Method 3	NBR 10702	L9.223
Umidade do gás	Method 4	NBR 11967	L9.224
Concentração de MP	Method 5	NBR 12019	L9.225

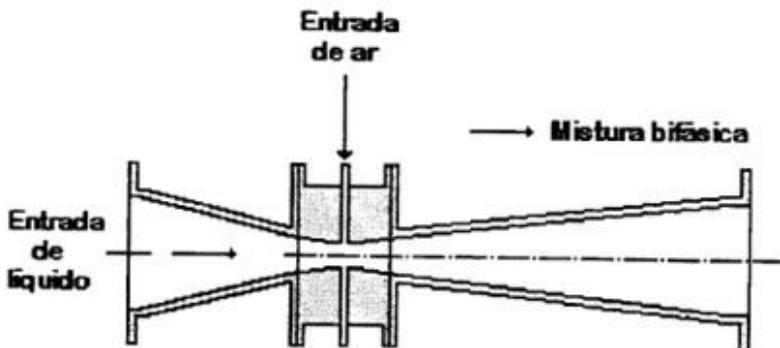
Fonte: ABNT; CETESB; USEPA.

3.10 Tubo Venturi

O nome tubo Venturi é em homenagem ao italiano Giovanni Battista Venturi, descobridor do efeito Venturi. O tubo Venturi é constituído por um bocal, seguido de uma seção cônica convergente que termina em uma garganta apertada, produzindo aumento de velocidade e diminuição da pressão do fluido, seguido de uma porção divergente do tubo, onde a velocidade é novamente transformada em pressão, com uma certa perda de carga (DAUGHERTY et al., 1985, apud BAYLAR et al., 2010).

O Venturi é um dispositivo comumente aplicado para medição de vazão ou aeração. Como aerador o Venturi age, quando há um diferencial de pressão entre a entrada e a saída do tubo Venturi, pela sucção de ar e realização de sua mistura no líquido em forma de pequenas bolhas (GONÇALVES, 1999; BAYLAR et al., 2010). Essas pequenas bolhas criam uma grande área de superfície de contato, que juntamente com a alta pressão dentro do sistema, facilita a solubilização do oxigênio no líquido (BAYLAR et al., 2010). A Figura 20 mostra o esquema de um tubo Venturi.

Figura 20. Tubo Venturi



Fonte: GONÇALVES, 1999.

Diversos processos industriais utilizam aeração de um líquido através de bolhas de ar, a aeração com tubo Venturi é um exemplo de tecnologia empregada para esta finalidade (BAYLAR et al., 2010). A aeração realizada com emprego do tubo Venturi pode ser utilizado em diversos processos, como no tratamento de água potável, degradação de nutrientes e matéria orgânica de efluentes, mitigação de odores em águas residuárias, processos de flotação, diminuição de ruído em estações de

tratamento de água, entre outros (BAGATUR, 2005, apud BAYLAR et al., 2010).

Na maior parte dos processos químicos multifásicos, as taxas globais de reação são com frequência limitadas pelos fenômenos de transferência de massa entre as fases envolvidas (TEIXEIRA, 1999). A dificuldade de promover o contato entre fases de propriedades físicas distintas ou solubilidades baixas, motivaram pesquisas de equipamentos capazes de maximizar a área de transferência de massa entre as fases, com consumo energético mínimo. No final da década de sessenta dispositivos que utilizam o efeito Venturi passaram a ser empregados para transferência de massa. Dentre as vantagens destes dispositivos estão a flexibilidade operacional, baixos custos operacionais, de manutenção e de investimento inicial, além da eficiência na mistura.

De acordo com Teixeira (1999), equipamentos que utilizavam o efeito Venturi se tornaram difundidos em aplicações de engenharia química e bioquímica, em função das taxas de transferência de massa alcançadas, possibilitando uma nova concepção de sistemas de reação, os reatores em loop (*jet loop* ou *Venturi loop reactors*). Os dispositivos que utilizam o efeito Venturi são dispostos nestes equipamentos em série com um tanque pulmão de baixo tempo de residência, funcionando ainda como um separador líquido-gás, onde a fase líquida é recirculada para o dispositivo que utiliza o efeito Venturi para succionar o gás.

O efeito Venturi, princípio de funcionamento do tubo Venturi, é elucidado pelo Princípio de Bernoulli, representado na equação:

$$\frac{P1}{\gamma} + Z1 + \frac{V1^2}{2g} = \frac{P2}{\gamma} + z2 + \frac{V2^2}{2g} + hp \quad (3)$$

Onde:

P1 e P2: pressões,

Y: massa específica,

Z1 e Z2: altura,

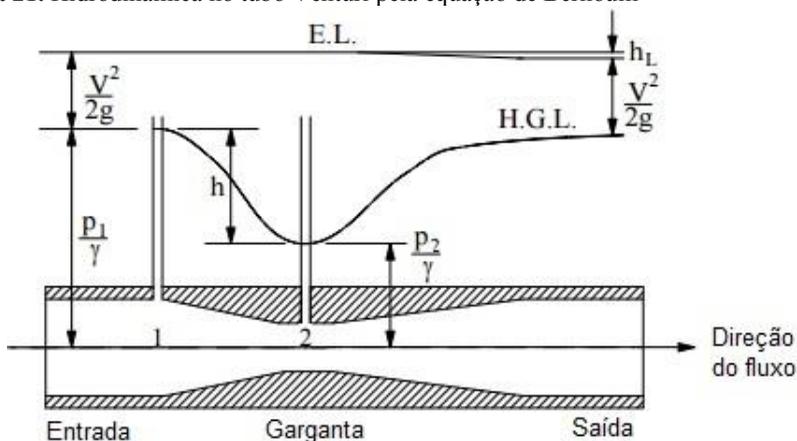
V1 e V2: velocidades,

g: gravidade,

hp: perda de carga.

A **Figura 21** ilustra a equação de Bernoulli aplicada ao tubo Venturi.

Figura 21. Hidrodinâmica no tubo Venturi pela equação de Bernoulli



Fonte: BAYLAR et al., 2009a.

Como observado na figura acima, seguindo o princípio da continuidade e de acordo com a equação 1, para que a mesma vazão de fluido atravessasse a seção mais estreita, sua velocidade no ponto 2 deve ser maior que a velocidade no ponto 1, e seguindo o princípio de Bernoulli, quando isso ocorre, necessariamente o aumento da velocidade deve ser compensado pela diminuição da pressão, possibilitando assim o funcionamento do tubo Venturi.

Em se tratando da aplicação do Venturi, os estudos realizados são direcionados a aplicação do Venturi com o objetivo de aeração, estudando principalmente a capacidade de transferência de massa e relações geométricas quanto a eficiência de sucção. Sendo a transferência de massa, no caso, absorção de oxigênio por um fluido, normalmente água, o principal parâmetro estudado para o dimensionamento de sistemas que utilizam o efeito Venturi.

O dimensionamento dos equipamentos de aeração utilizando Venturi envolvem muitas variáveis dinâmicas, cinéticas e de transporte, dentre todas, a de maior importância é o coeficiente global de transferência de massa ($k\lambda a$), fundamental para redução ou ampliação de escala nos sistemas dimensionados (TEIXEIRA, 1999). Para a

determinação do $k_L a$, o método químico do sulfito é o mais utilizado, ele consiste em mensurar a oxidação dos íons sulfito pelo oxigênio absorvido na solução, oxigênio proveniente do equipamento utilizado para a aeração, tais como colunas de borbulhamento, colunas de absorção recheadas, tanques agitados, colunas de pratos perfurados e reatores em loop (TEIXEIRA, 1999).

Nesse sentido, há carência de informações a respeito da aplicabilidade destes dispositivos para remoção de material particulado do ar que é succionado pelo por um dispositivo que utiliza o efeito Venturi.

Quanto as vantagens de utilizar o tubo Venturi para aeração de água, em comparação a outras tecnologias empregadas para a mesma finalidade, Baylar et al. (2009a) cita:

- Fácil de adaptar em sistemas novos ou já construídos,
- Comumente é feito de plástico e resistente a produtos químicos,
- Não requer energia externa para funcionar,
- Não possui partes móveis, o que diminui a probabilidade de falhas e aumenta a vida útil do equipamento,
- Requer pouca atenção na operação
- Requer pouca manutenção
- Baixo custo, comparado a outros equipamentos que desempenham a mesma função e com capacidade de aeração semelhante

Conhecidas as vantagens, diversos autores estudaram a transferência de oxigênio utilizando Venturi acoplados em reatores, dentre esses estão JACKSON & COLLINS (1964), VOLMULLER e VALBURG (1973), NAGEL (1970), HIRNER e BLENKE (1977) e ZEHNER (1975), nesses sistemas, a energia cinética do jato em alta velocidade foi utilizada para aumentar a área interfacial entre as fases líquidas e gasosas (GONÇALVES, 1999). Outro autor que estudou aeração com dispositivos Venturi, ZLOKARNIK, em 1980, conseguiu eficiência de absorção de oxigênio de 3,8 kgO_2/kWh , resultado bastante expressivo se comparado com 0,8 kgO_2/kWh obtido em reatores convencionais (RADHAKRISHNAN & MITRA, 1984, apud GONÇALVES, 1999).

Gonçalves (1999) estudou a aplicabilidade dos dispositivos Venturi para aeração de líquidos, visto a necessidade de aeração em

diversos industriais químicos, bioquímicos e de tratamento de águas residuárias. Agitadores mecânicos convencionais possuíam elevado custo energético, devido à baixa eficiência de transferência de oxigênio (GONÇALVES, 1999).

Quanto a aeração, Fontenelle e Almeida (2014) estudaram a viabilidade técnica do uso do Venturi na geração de microbolhas para flotação por ar dissolvido. Utilizando duas bombas multiestágio diferentes e aerando um tanque dimensionado para proporções de aeração reais para realização de flotação, Fontenelle e Almeida (2014) conseguiram bolhas diferentes alternando as bombas, com uma bomba multifásica de rotor aberto e pressão máxima de 15 bar, conseguiu-se saturar o tanque de ar e com bolhas pequenas, que levaram 90 segundos para desprender totalmente de uma amostra.

Com outra bomba, multiestágio centrífuga de rotor fechado, as bolhas visualmente foram maiores e levaram 40 segundos para se desprenderem da amostra, não foram utilizadas técnicas específicas de medição do diâmetro das bolhas produzidas (FONTENELLE; ALMEIDA, 2014)

Já Gonçalves (1999) realizou seus experimentos de transferência de oxigênio utilizando dispositivo Venturi com e sem peças cisalhantes após o Venturi. A adição de peças cisalhantes propiciou aumento significativo no coeficiente volumétrico de transferência de massa, visto que ocorreu a redução do diâmetro das bolhas de ar, e conseqüentemente o aumento da área específica de interface ar/líquido, favorecendo a transferência de massa (GONÇALVES, 1999). Verificou-se ainda que o coeficiente volumétrico de transferência de massa aumenta com a elevação da temperatura, comportamento também observado por Ramalho (1983, apud GONÇALVES, 1999).

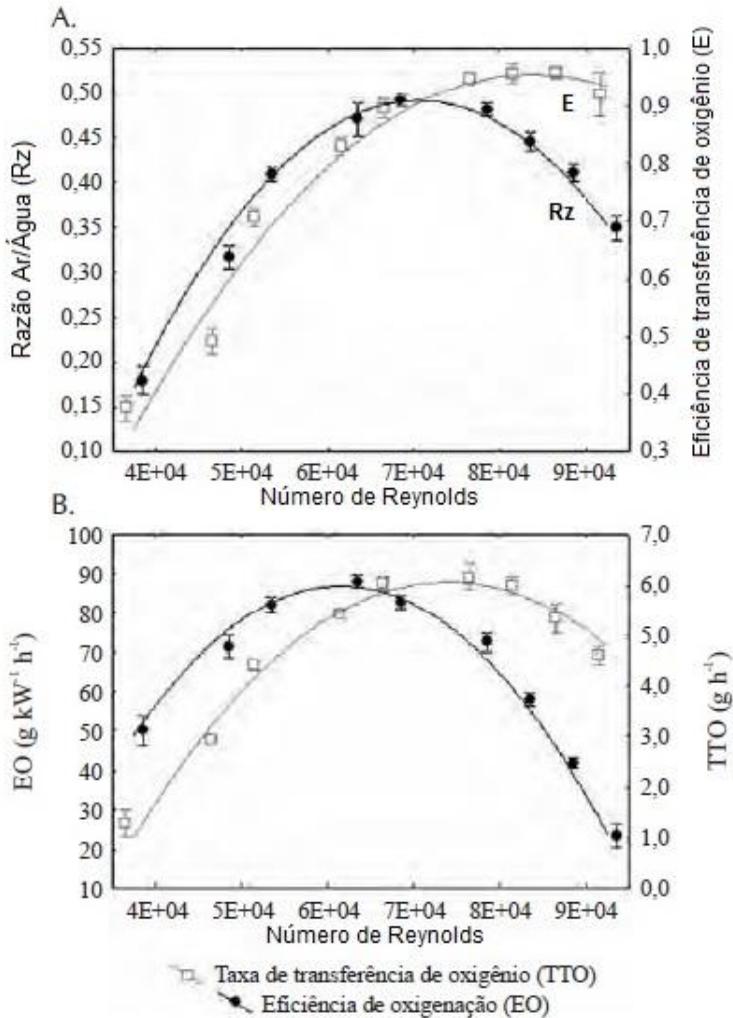
Piccin et al. (2010) estudaram a otimização do dispositivo Venturi aplicado na aeração de águas subterrâneas com vistas a oxidação/floculação do ferro para tratamento da água, com a adição de hipoclorito de sódio. Nas condições ótimas encontradas, chegou-se a eficiência de remoção de ferro na faixa de 95%, reduzindo a concentração de ferro solúvel a valores inferiores a 0,3 mg/l (PICCIN et al., 2010).

Para a otimização do sistema de aeração, foi utilizada água com oxigênio dissolvido próximo a zero adicionando-se bissulfito de sódio, foram avaliadas a eficiência de transferência de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio e eficiência de oxigenação, além da razão entre vazão de água e vazão de ar succionado, todos relacionados com o número de Reynolds da água no estrangulamento do dispositivo Venturi (PICCIN et al., 2010). Todas as proporções geométricas do Venturi utilizado foram

fornecidas para fim comparativo de aplicação do mesmo experimento em escalas diferentes. (PICCIN et al., 2010).

Os resultados do mapeamento hidrodinâmico foram realizados quanto ao número de Reynolds. Piccin et al. (2010) mensuraram a razão entre vazão de ar e água (R_z), eficiência de transferência de oxigênio (E), Eficiência de oxigenação (EO) e Taxa de Transferência de Oxigênio (TTO), sempre em relação ao número de Reynolds. Os resultados podem ser observados no Figura 22 abaixo:

Figura 22. Mapeamento hidrodinâmico em relação ao número de Reynolds no estrangulamento: (A.) razão entre vazão de ar e água (R_z) e eficiência de transferência de oxigênio (E); (B.) Eficiência de oxigenação (EO) e taxa de transferência de oxigênio (TTO).



Fonte: PICCIN et al., 2010.

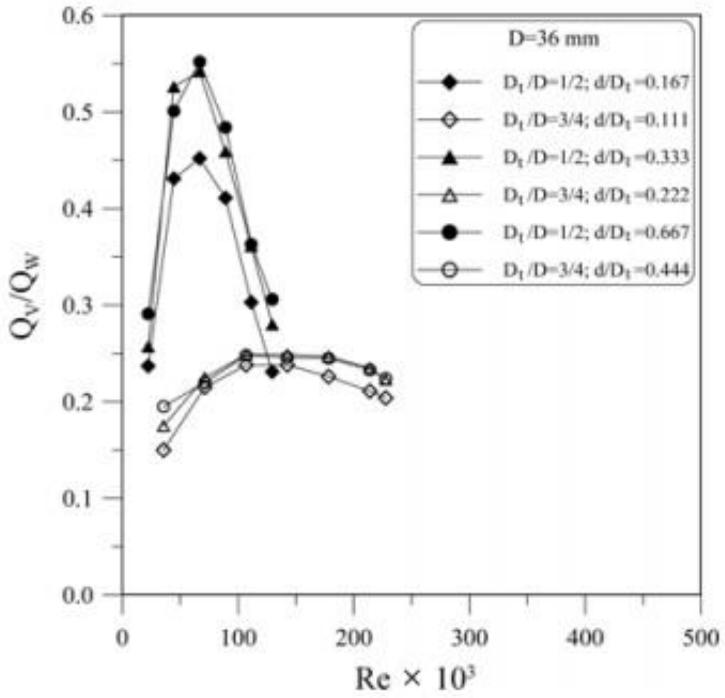
Através do gráfico, observou-se que os melhores resultados foram obtidos quando o número de Reynolds variou entre $6,5 \times 10^4$ e $8,0 \times 10^4$ tanto na questão hidrodinâmica, quanto na eficiência de oxigenação e taxa de transferência de oxigênio.

Já Baylar et al., (2010) estudou a relação entre os diâmetros de entrada e saída dos tubos Venturi (D), com o diâmetro do estrangulamento (D_i), além da relação do diâmetro do orifício de sucção (d), com o

diâmetro do estrangulamento (D_t), em vistas a encontrar as relações geométricas do tubo Venturi que o tornam mais eficientes na relação vazão de ar (Q_v) e vazão de água (Q_w). Foram utilizados três diâmetros pra a entrada e saída do Venturi, 36 mm, 42 mm e 54 mm, o ângulo do cone de entrada e do cone de saída possuíam ângulos de 21° e 7° respectivamente (BAYLAR et al., 2010). Quanto diâmetro do estrangulamento em relação ao diâmetro de entrada e saída, foram utilizadas as relações D_t/D de 0,50 e 0,75 (BAYLAR et al., 2010). Foram utilizados dois orifícios de entrada de ar em cada tudo testado, os orifícios variaram entre os diâmetros (d) 3 mm, 6mm e 12 mm. (BAYLAR et al., 2010).

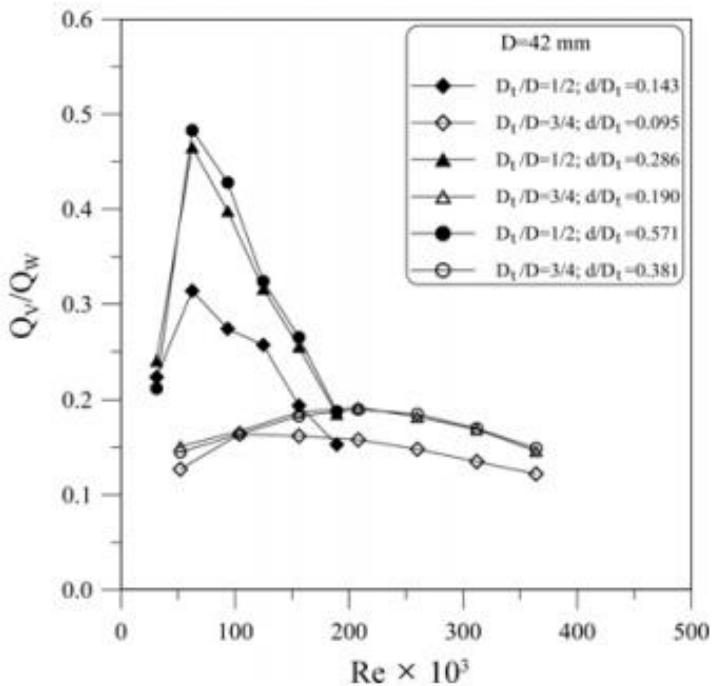
A **Figura 23**, **Figura 24** e **Figura 25** mostram os resultados obtido por Baylar et al. (2010).

Figura 23. Variação de Q_v/Q_w em relação ao número de Reynolds para diferentes relações D_t/D e d/D_t ($D=36$ mm)



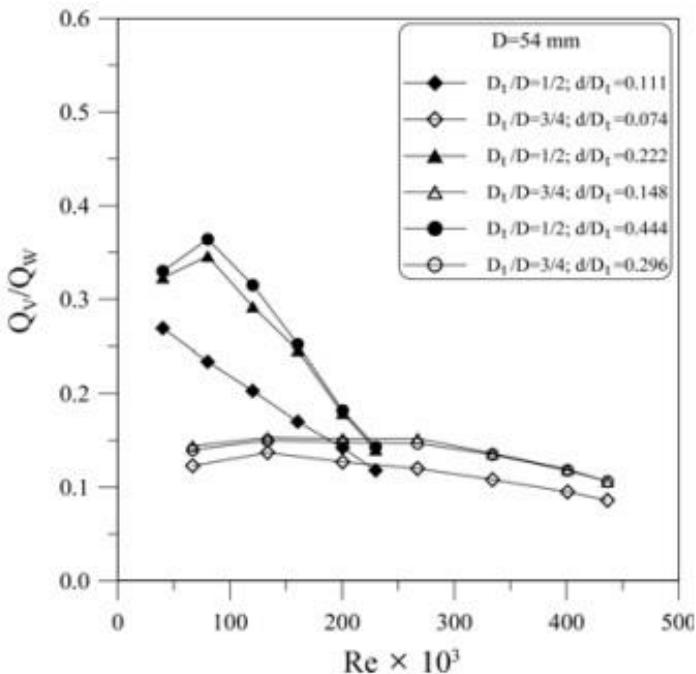
Fonte: Baylar et al., 2010.

Figura 24. Variação de Q_v/Q_w em relação ao número de Reynolds para diferentes relações D_t/D e d/D_t ($D=42$ mm)



Fonte: Baylar et al., 2010.

Figura 25. Variação de Q_v/Q_w em relação ao número de Reynolds para diferentes relações D_t/D e d/D_t ($D=54$ mm)

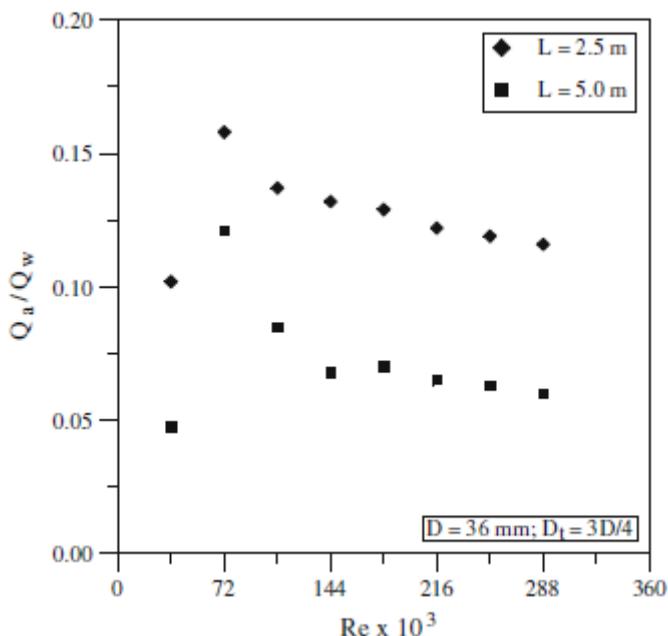


Fonte: Baylar et al., 2010.

A partir dos resultados obtidos por Baylar et al. (2010) é possível destacar que a relação Q_v/Q_w aumenta com o crescimento do número de Reynolds até certo ponto e depois diminui conforme o Reynolds continua aumentando, a relação d/D_t também mostrou-se significativa sobre a relação Q_v/Q_w , a relação de vazão de ar com vazão de água aumentou com o aumento do diâmetro do orifício de entrada de ar (d), até se tornar estável com o aumento de d/D_t . Os resultados mostram ainda que para uma faixa restrita de número de Reynolds, os tubos Venturi com relação $D_t/D = 1/2$ tiveram resultados bastante superiores na relação Q_v/Q_w se comparados aos tubos com $D_t/D = 3/4$, contudo, quando o número de Reynolds aumenta para valores superiores a 150.000, os tubos Venturi com $D_t/D = 3/4$, passaram a ser mais eficientes na relação Q_v/Q_w devido à perda de carga.

Baylar et al., (2005, apud BAYLAR, ET AL., 2009b) investigou também a influência do comprimento da tubulação subsequente ao tubo Venturi, e constatou que a variação do comprimento da tubulação influencia na relação Q_a/Q_w , como mostra a **Figura 26**:

Figura 26. Relação Q_a/Q_w por número de Reynolds em dois comprimentos de tubulação diferentes



Fonte: Baylar et al., 2009b.

Segundo Baylar et. al. (2005, apud BAYLAR, et al., 2009b), a diminuição da relação Q_a/Q_w observada com o aumento do comprimento da tubulação é explicado pela diminuição da diferença de pressão entre a entrada e a saída do tubo Venturi com o aumento da tubulação, e consequente aumento da perda de carga.

Estes estudos fornecem importantes informações quanto ao dimensionamento de um sistema que utiliza o tubo Venturi para succionar gases, podendo dispensar inclusive qualquer mecanismo de compressão externa. Todavia, a eficiência desta tecnologia empregada ao tratamento de gases ainda precisa ser estudada.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentadas as etapas do projeto do lavador de gases para o tratamento dos efluentes gasosos oriundos da queima de carvão vegetal e gorduras animais em uma churrasqueira de dimensões e características próprias das comumente utilizadas em residências unifamiliares brasileiras. É pequena a quantidade de carvão consumida nestas residências, contudo, a falta de condições adequadas na dispersão dos poluentes através de pequenas e baixas chaminés muitas vezes torna-se um impeditivo, tanto para a saúde dos usuários e das pessoas que vivem próximo desta fonte de poluição, quanto pela sensação de incômodo do material particulado emitido.

O lavador de gases proposto surgiu da reflexão de que as tecnologias já consagradas na bibliografia para tratamento de efluentes gasosos aplicáveis ao tipo de efluente em questão, como os lavadores de gases, possuem uma característica em comum que é a utilização de um exaustor para fornecer a pressão necessária para que os efluentes gasosos coletados vençam as perdas de cargas impostas pelas tubulações e pelos sistemas de tratamento.

Além do fato da inexistência de sistemas de lavagem de gases aplicados a pequenas fontes de poluição como uma churrasqueira residencial, uma das dificuldades primordiais pelo público que viria a utilizar a churrasqueira com sistema tradicional de lavador de gases seria pelos altos ruídos produzidos por exaustores centrífugos do porte necessário para a pressão exigida, tornando incômodo ficar muito tempo próximo ao equipamento. Outra dificuldade seria relativa ao custo total do equipamento ser atrativo ou não aos usuários, além das dificuldades operacionais e de manutenção.

4.1 PRINCÍPIOS DO LAVADOR DE GASES DESENVOLVIDO

O equipamento foi dimensionado em caráter experimental tendo como base o tubo de Venturi, que, através da passagem do fluido de lavagem pelo seu estrangulamento, gerará pressão negativa capaz de succionar os efluentes gasosos para dentro do sistema, eliminando assim, a necessidade de um exaustor que atenda a pressão necessária para o funcionamento de outros tipos de lavadores de gases existentes que poderiam ser aplicados no tratamento do efluente gerado.

Espera-se que o escoamento turbulento do fluido de lavagem dentro do sistema, juntamente com o borbulhamento no reservatório sejam suficientes para viabilizar a transferência dos poluentes do ar para

o líquido de lavagem através da impactação direta dos poluentes no líquido.

4.2 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO

Quanto a verificação da eficiência do processo, entende-se que, para um lavador de gases, principalmente em relação ao material particulado, seria ideal a utilização de amostragem isocinética dos gases que sairiam naturalmente pela chaminé de uma churrasqueira por convecção, em comparação a amostragem realizada na saída dos gases lavados, estabelecendo assim comparação direta entre a concentração partículas totais em suspensão no gás não lavado e no gás lavado.

A realização de análise isocinética dos gases do experimento não foi viável para este experimento, pela inexistência dos equipamentos necessários na cidade de Florianópolis-SC, onde o experimento foi realizado, como também pela distância e os custos envolvidos na realização do experimento em outra localidade.

Desta maneira, optou-se por avaliar a eficiência do tratamento dos gases através de método observacional utilizando a escala de Ringelmann, relacionando a escala de cinzas com a maior ou menor concentração de material particulado.

Outro indicativo do funcionamento do equipamento para remoção dos poluentes utilizado foi a percepção olfativa dos odores característicos do churrasco, que misturam o cheiro da fumaça de carvão, devido ao material particulado emitido, como também pelos compostos orgânicos voláteis, oriundos principalmente da vaporização de gorduras das carnes.

Além disso, a lavagem de gases gera como subproduto um efluente líquido. A fim de avaliar o funcionamento do equipamento, foram quantificados os parâmetros pH, turbidez, cor aparente, COD, DQO e condutividade do efluente líquido gerado. A alteração dos parâmetros de qualidade do efluente indicará de maneira indireta se houve transferência dos poluentes gasosos para o líquido de lavagem.

4.3 EXAUSTÃO DOS GASES LAVADOS

Vista a baixa solubilidade em água de dióxido de carbono e monóxido de carbono, estes não serão monitorados quanto a diferença em suas concentrações nos gases lavados e não lavados.

Porém, entende-se que este é fator importante a ser levado em consideração caso haja interesse em instalar uma churrasqueira com este

tipo de lavador de gases em um ambiente fechado, necessitando assim a exaustão dos gases lavados para fora do ambiente.

Sendo assim a utilização deste equipamento sem um sistema de exaustão dos gases lavados seria indicada em locais com boa ventilação de ar ambiente, como imaginou-se inicialmente que o tratamento dos gases de churrasqueira viabilizaria a utilização desta em sacadas de apartamentos que não poderiam ter churrasqueira pela falta de sistema de exaustão próprio para isso no edifício.

4.4 CONCEITOS DE VENTILAÇÃO LOCAL EXAUSTORA APLICADOS NO EXPERIMENTO

Quanto a ventilação local exaustora, foram verificados os conceitos e parâmetros utilizados tanto na ventilação industrial como na ventilação de cozinhas. Devido a diferenças significativas entre as soluções descritas na bibliografia, que consideram os tipos de captores e os tipos de poluentes, chegando a valores de velocidade de captura empíricos, chegou-se à conclusão que nenhuma das soluções de ventilação local exaustora já firmadas na bibliografia consultada representa a situação encontrada em uma churrasqueira característica do objeto deste estudo.

Na ventilação de cozinhas, são utilizadas coifas com distancias grandes dos pontos onde são gerados os poluentes, geralmente com maior preocupação quanto a remoção de vapores de gorduras, além de outros parâmetros de diluição do ar ambiente e as características convectivas dos gases gerados que influenciam na velocidade de captura aplicada nas coifas. Desta maneira, são indicados valores de velocidade de captura na coifa elevados, a fim de garantir que, mesmo que o poluente esteja distante da coifa, o gradiente de velocidade criado pela velocidade aplicada na entrada da coifa seja suficiente para conduzir os poluentes para dentro da coifa.

Já na ventilação industrial, o caso que mais se aproxima de uma churrasqueira identificado foi na aplicação de coifas em fontes quentes de efluente gasoso. São considerados casos genéricos de coifas circulares ou retangulares, onde as variáveis para determinação da vazão de exaustão são as dimensões do captor e a distância deste para a fonte do poluente.

Contudo, estes casos não levam em consideração captores com enclausuramento parcial, que no caso da churrasqueira utilizada neste estudo, possui coifa retangular, com enclausuramento através de três lados fechados e uma abertura frontal, os casos com enclausuramento parcial tratados na bibliografia verificada são relativos a sistemas de

captura poluentes com baixas temperaturas, também dificultando a correlação com churrasqueiras.

Considerando que uma churrasqueira convencional, que não utiliza sistema mecânico de exaustão, tem seus efluentes gasosos naturalmente direcionados para chaminé da churrasqueira por convecção, entende-se que as velocidades de captura descritas na bibliografia para casos não totalmente análogos a este não seriam diretamente aplicáveis.

Sendo assim, especificamente neste tipo de churrasqueira, a vazão de coleta poderia ser reduzida para próximo da vazão gerada de efluente, diferente da ventilação industrial onde é determinada uma velocidade de captura aplicada na coifa. Deste modo a vazão de captura necessária seria diminuído. Para tanto, haveria a necessidade de estudo da vazão máxima de efluente gasoso gerada em uma churrasqueira, com uma quantidade padrão de carvão utilizado. Nesse sentido, a amostragem isocinética possibilitaria a identificação da vazão de efluente gasoso gerado.

Outras considerações sobre o desenvolvimento do lavador de gases serão trazidas à medida que o experimento for caracterizado de acordo com a ordem cronológica de seu desenvolvimento.

4.5 PRIMEIRO EXPERIMENTO COM O LAVADOR DE GASES PROPOSTO

Inicialmente criou-se um sistema em pequena escala para colocar em testar na prática os princípios propostos para o lavador de gases com base em auto aspiração pelo tubo Venturi.

O sistema consistiu em uma bomba d'água de 1/4 CV, ligada a um reservatório confeccionado com uma bombona d'água de 20 litros, de maneira que a bomba recircularia o líquido de lavagem, no caso água tratada para consumo humano, passando por um tubo Venturi de diâmetro nominal de 1/2", utilizado em fertirrigação e devolvendo a água com o ar succionado para dentro do reservatório.

Foi utilizada uma garrafa d'água de 5 litros, acoplada em sua tampa a entrada lateral do tubo Venturi, onde os fluidos externos são succionados, com um pequeno orifício na lateral da garrafa simulando o enclausuramento parcial existente em uma churrasqueira convencional.

Foi criada fumaça a partir de uma pequena quantidade de papel em combustão para observar a sucção do efluente gasoso e testar o sistema como um todo, em busca de identificar possíveis melhorias e problemas técnicos. O sistema criado é ilustrado na figura a seguir:

Figura 27. Protótipo de lavador de gases autoaspirante com tubo Venturi



Fonte: Autor.

O primeiro teste foi realizado sem que a tubulação de descarga de volta para o reservatório estivesse afogada, posteriormente, com o intuito de garantir maior tempo de contato com do efluente succionado com a água de lavagem, estendeu-se a tubulação para afogá-la, também para melhor observar a quantidade de ar succionado que borbulharia no reservatório.

Observou-se que alguns instantes após a bomba ser ligada, o ruído emitido pela sucção no tubo Venturi aumentava de intensidade. Ao tapar a entrada de ar com o dedo, extinguindo o borbulhamento de ar no reservatório e logo após desobstruindo a entrada de ar novamente, observava-se este mesmo efeito, sentia-se utilizando o dedo que a sucção estava mais forte e o ruído menor, porém em pouco tempo, a sucção voltava a enfraquecer e o ruído aumentava.

Percebeu-se então que esta situação era em decorrência da sucção de bolhas de ar pela bomba, diminuindo a eficiência de sucção pelo menor volume de água transportado pelo duto, que dividia espaço com o ar, e também pela cavitação dentro da tubulação.

Visto esta dificuldade operacional, definiu-se que a solução imediata para resolver o problema seria a utilização de um reservatório com capacidade para volume maior de líquido de lavagem, de maneira a

atender o tempo necessário observado por Fontelle e Almenida (2014), onde concluíram que o ar introduzido no líquido pelo tubo Venturi em seu experimento, levou de 40 segundos a 90 segundos para o ar se desprender completamente do líquido.

Desta maneira, com o tempo de residência do líquido de lavagem maior que o tempo de permanência das bolhas na coluna d'água, o problema de sucção de bolhas de ar pela bomba seria sanado.

Outra questão importante observada foi que a água de lavagem teve sua temperatura aumentada, não pelo ar succionado com pequena quantidade de fumaça do teste, mas pelo próprio aquecimento da bomba.

A temperatura da água é importante parâmetro para o funcionamento do sistema, como será abordado em maiores detalhes no item sobre o segundo experimento, a eficiência de sucção depende do número de Reynolds no estrangulamento do tubo Venturi e uma das variáveis do número de Reynolds é a viscosidade dinâmica da água, que depende de sua temperatura. Com isso, eficiência de sucção varia com a temperatura da água de lavagem. Além disso, no caso da água de lavagem em temperaturas mais elevadas, a diminuição da pressão no estrangulamento do Venturi pode fazer com que a água vaporize dentro da tubulação, causando cavitação e perda da eficiência de sucção.

4.6 SEGUNDO EXPERIMENTO COM O LAVADOR DE GASES PROPOSTO

O primeiro experimento trouxe maiores informações sobre o funcionamento do sistema proposto e as dificuldades esperadas, elaborou-se um sistema aplicando em uma churrasqueira pré-fabricada em chapas metálicas.

Foi utilizado para o lavador de gases um tubo Venturi de uma polegada de diâmetro nominal, com diâmetro interno medido de 19,5 mm e com diâmetro do estrangulamento sendo a metade do diâmetro interno, 9,75 mm, a fim de aumentar a escala do experimento de acordo com a bomba d'água disponível. A figura a seguir mostra o tubo Venturi:

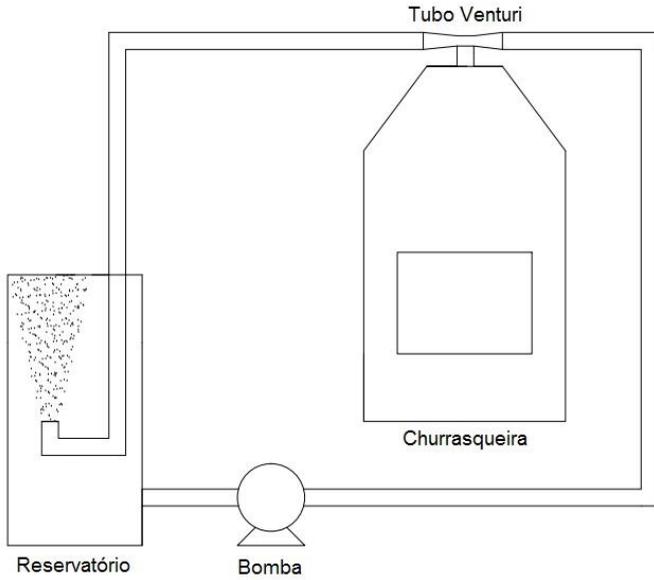
Figura 28. Tubo Venturi utilizado



Fonte: Autor

Utilizou-se uma bomba de 1/2 cv, a tubulação usada foi de diâmetro nominal de 25 mm. A churrasqueira possui coifa de 50 cm de largura por 45 cm de profundidade, com o bocal da churrasqueira sendo de 43,5 cm de largura por 30 cm de altura, o duto da chaminé possui 20 cm de diâmetro, e do fundo da churrasqueira até a coifa, de onde os gases são gerados até a captação, são 50 cm de distância. A Figura 29 mostra o esquema do lavador de gases proposto.

Figura 29. Esquema do lavador de gases proposto



A Figura 30 a seguir mostra a churrasqueira com o sistema de lavagem de gases.

Figura 30. Churrasqueira com o sistema de lavagem de gases



Fonte: Autor.

A churrasqueira teve sua chaminé adaptada utilizando suas próprias peças, o chapéu chinês que veio no kit foi utilizado para vedar o topo da chaminé, onde foi feito um orifício para acoplar o tubo Venturi. Um dos pedaços de dutos foi utilizado para direcionar a fumaça excedente, visto que o lavador de gases tratará apenas uma parcela da fumaça gerada, em escala real o sistema deveria ser capaz de captar todo o efluente gerado. Além disso, a saída lateral permite que seja avaliada a coloração da fumaça em relação a escala de Ringelmann, também comparada em simultâneo ao ar tratado saído do reservatório. A saída lateral apesar do duto exterior ter 20 cm de diâmetro, possui apenas 10 cm, para que o fluxo de efluente gasoso não seja preferencialmente conduzido para a lateral e assim possa ter parte da vazão coletada no topo da tubulação pelo lavador de gases.

O reservatório foi confeccionado com duas lixeiras de plástico, de 65 litros cada, ligadas por tubulação de PVC com sifão, que serve para

evitar o curto circuito no reservatório, ou seja, evitar que as bolhas fiquem pouco tempo em um reservatório e passem para o outro.

O volume total de água de lavagem utilizado no reservatório foi de 110 litros, garantindo assim o tempo de residência necessário para o desprendimento das bolhas de ar, de acordo com Fontelle e Almenida (2014). Considerando que a vazão medida do sistema foi de 0,96 l/s e o reservatório possui capacidade de 110 litros, a razão entre volume e vazão resulta no tempo de detenção de 114,6 segundos.

Figura 31. Reservatório de água de lavagem



Fonte: Autor.

A vazão de efluente gasoso coletado foi estimada através da medição da vazão água de lavagem, que foi medida por cubagem com uma bombona de 20 litros, o tempo médio de três medições para enchimento da bombona, pela descarga do sistema de lavagem, foi de 20,77 segundos, resultando em uma vazão de 0,96 l/s.

Relacionando a vazão do sistema com a dimensão do estrangulamento do Venturi, é possível calcular o número de Reynolds no estrangulamento e assim relacionar número de Reynolds com as dimensões do tubo Venturi e comparar com os gráficos de eficiência de sucção do tubo Venturi dos estudos realizados por Baylar et al. (2009a), que podem ser observados na **Figura 23**, **Figura 24** e **Figura 25**.

O teste do lavador de gases foi realizado utilizando 4 kg de carvão de acácia negra, devido a granulometria do carvão utilizado tendo em maioria grandes pedaços, considerou-se que o tempo de teste seria de 70 minutos, como pode ser observado na **Figura 2**, o consumo acumulado de massa de carvão de granulometria maior, torna-se mínimo após aproximadamente 70 minutos, gerando também menos fumaça.

Inicialmente o consumo de carvão sendo maior, também é maior a geração de fumaça, assim como as labaredas no início da combustão colaboram para maior emissão de fumaça, quando se comparado ao carvão em brasa.

Figura 32. Lavador de gases durante o teste



Fonte: Autor.

A temperatura da água de lavagem foi monitorada com termômetro durante o teste, a fim de propiciar o cálculo do número de Reynolds no estrangulamento do tubo Venturi utilizando a temperatura de equilíbrio, sabido que a bomba contribui para esquentar a água, assim como o contato do efluente gasoso em alta temperatura com a água. A temperatura da

água de lavagem estabilizou em 30°C, 3°C a mais que a temperatura inicial, a exposição ao sol durante toda a manhã juntamente com o reservatório preto contribuiu para deixar a água a esta temperatura no momento do teste.

Utilizando a viscosidade dinâmica da água e a densidade em 30 °C, a velocidade da água pelo estrangulamento e área do estrangulamento, chegou-se a um número de Reynolds de aproximadamente 161.347. Na **Figura 23**, o tubo Venturi que mais se aproxima dos estudados por Baylar et al. (2009a) é o Venturi $Dt/D = 1/2$ e $d/Dt = 0,333$, desta maneira, pela relação entre vazão succionada e vazão de água, a vazão de efluente gasoso succionada para dentro do lavador ficou no entorno de 0,24 l/s.

Durante o teste foram assadas linguças suínas, com objetivo de avaliar o lavador de gases quanto aos compostos orgânicos voláteis oriundos da queima de gordura que pinga sobre o carvão, mesmo que esperado que este poluente não fosse removido, por não ser solúvel em água.

Foram observadas a chaminé lateral da churrasqueira e o tubo por onde saia o ar lavado durante o teste, utilizando o cartão com a escala de Ringelmann, além da percepção olfativa sobre o efluente gasoso sem tratamento e o efluente com tratamento. Após 70 minutos de teste, a bomba foi desligada, coletada amostra do efluente resultante e levada para laboratório para análise. Todas as análises realizadas seguiram os métodos preconizados pela APHA (1998).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi realizado um experimento e imediatamente após os 70 minutos de funcionamento, foi observado no efluente de lavagem material cinzento sobrenadante, provavelmente trata-se de partículas grosseiras de material particulado ou aglomerado de partículas menores, que foram succionados pelo tubo Venturi e ao entrar em contato com a água de lavagem, foram removidos do efluente gasoso. A Figura 33 mostra o material sobrenadante observado.

Figura 33. Material sobrenadante no efluente do lavador de gases



Fonte: Autor.

Visualmente, também se observou que havia uma película de gordura flutuante sobre o efluente do lavador de gases. Além disso, no posterior manuseio da tubulação afogada no reservatório, verificou-se que os canos de PVC ficaram engordurados, assim como as paredes do reservatório.

Inicialmente, não era esperado que o lavador de gases removesse gordura, devido a gordura não ser solúvel em água, todavia, o tempo de deslocamento do líquido de lavagem com o efluente gasoso dentro da tubulação de recirculação, aliado ao borbulhamento destes dentro do reservatório, propiciou o resfriamento e a condensação dos vapores de gordura, assim os removendo do efluente gasoso. A **Figura 34** mostra a mancha de gordura sobre a água de lavagem.

Figura 34. Mancha de gordura sobre a água de lavagem



Fonte: Autor.

Durante o teste, não foi notado odor intenso na saída de ar do reservatório de líquido de lavagem, visto que os odores característicos do churrasco estão ligados ao material particulado que designa a coloração da fumaça emitida e dos compostos orgânicos voláteis, neste caso, principalmente da vaporização de gordura animal, notou-se que também houve remoção de odores.

Posteriormente, ao inalar ar do recipiente onde foi coletada amostra do efluente para análise laboratorial, também se percebeu o cheiro característico de fumaça e carne de um churrasco, reforçando a indicação que o lavador de gases ao atuar sobre o material particulado e os vapores de gordura, também removeu odores.

No laboratório de qualidade da água do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, foram avaliados os parâmetros pH, turbidez, cor aparente, COD, condutividade e DQO, os resultados da água antes e depois da lavagem dos gases estão na **Tabela 9**.

Tabela 9. Resultados das análises da água de lavagem e do efluente gerado

	Água de lavagem	Efluente final
pH	6,72	6,48
Turbidez (NTU)	1,6	3,06
Cor aparente (uC)	7	31
COD (mg/l)	4,639	4,689
Condutividade (μ S/cm)	67	76,2
DQO (mg/l)	10,94	26,59

Fonte: Autor.

Como observado na **Tabela 9**, o pH da solução se tornou mais ácido. Mesmo que pouco solúvel em água, o dióxido de carbono resultante da combustão do carbono do carvão vegetal, ao ser dissolvido na água de lavagem, forma ácido carbônico (H_2CO_3), que acaba dissociando e liberando íons H^+ e conseqüentemente baixando o pH da água.

Além disso, os íons H^+ em solução aquosa conduzem eletricidade, o aumento na condutividade do efluente final sustenta que houve aumento da concentração deste íon no líquido de lavagem.

Já a turbidez e a cor aparente do efluente, além do material sobrenadante observado, indicam que houve transferência do material particulado do efluente gasoso para a água de lavagem.

A DQO do efluente também aumentou sensivelmente, apontado que o material responsável pelo aumento de cor aparente e turbidez tem característica inorgânica, compatível com a composição do carvão vegetal, que possui teor de carbono fixo de mais de 60%, mesmo quando carvão de má qualidade.

O Carbono Orgânico Dissolvido medido não apresentou diferença fora da precisão do aparelho de medição, visto que a parte orgânica do efluente gasoso em questão está ligado ao vapor de gorduras animais, que foi condensado e não se misturou na água, é razoável que a fração dissolvida de carbono orgânico não tenha apresentado alteração.

Vista as características do efluente líquido gerado, este pode ser descartado em rede de coleta de esgoto sanitário, que segue para sistema de tratamento, ou em solução individual de tratamento de efluentes sanitários.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Apesar da eficiência do processo de tratamento dos efluentes gasosos produzidos na churrasqueira não ter sido avaliada de maneira direta, através de análise isocinética e identificação das concentrações de material particulado com e sem tratamento, a avaliação indireta através de análise do efluente líquido resultante da lavagem de gases sugere que há remoção significativa de material particulado do efluente gasoso.

Além disso, a percepção visual do efluente evidenciou que as gorduras animais também foram removidas no processo de lavagem de gases.

A remoção de material particulado e de gorduras, aliada a percepção olfativa durante o processo de lavagem, assim como o odor do efluente final, indicam que o lavador de gases atua significativamente na remoção de odores.

Levando em consideração que a vazão de sucção estimada para o experimento foi de 0,24 l/s e o experimento durou 70 minutos, a vazão total de efluente gasoso lavado foi em torno de 1008 litros. Como o volume de água de lavagem no reservatório era de 110 litros, cada litro de água lavou 9,16 litros de efluente gasoso. O pequeno volume de efluente gasoso em relação ao volume de água de lavagem asseguram que as alterações nos parâmetros de qualidade da água em decorrência do tratamento foram significativas.

A eficiência de sucção do tubo Venturi poderia ser otimizada com a mesma bomba utilizada, visto que o número de Reynolds no estrangulamento ficou bem acima da faixa ótima de funcionamento, que garantiria maior eficiência de sucção, com vazão ar acima de 50% na relação ar succionado por vazão de água no tubo Venturi. Desta maneira, o sistema poderia ser montado com um tubo Venturi maior que o utilizado, ainda diminuindo a perda de carga no sistema e aumentando a vazão recirculada.

Quanto ao volume do reservatório que foi dimensionado para evitar a sucção de bolhas pela bomba d'água, é recomendada a elaboração de uma alternativa ao tempo de residência para eliminação das bolhas, assim diminuindo o tamanho do reservatório e consequentemente o volume de água de lavagem necessário.

Recomenda-se para utilização deste lavador de gases, especial atenção no dimensionamento hidráulico do sistema para garantir o funcionamento do Venturi na melhor faixa de eficiência, ou seja número de Reynolds no estrangulamento entre 65.000 e 80.000 (PICCIN et al., 2010) e 45.000 a 90.000 (BAYLAR et al., 2010). Todavia, a eficiência

está intimamente ligada com as dimensões do tubo Venturi utilizado e deve ser avaliada em cada caso.

Para maior conhecimento da eficiência do lavador de gases, recomenda-se a análise isocinética do efluente gasoso para aferição das concentrações de material particulado oriundos da queima de carvão vegetal na churrasqueira, com e sem o tratamento, possibilitando avaliar a eficiência de remoção de material particulado.

Assim como para o material particulado, é válida a amostragem dos efluentes não tratados e tratados para avaliação das concentrações de compostos orgânicos voláteis oriundos da vaporização de gorduras animais, identificando a eficiência de remoção destes compostos que além de conferirem odor para o efluente, possuem compostos cancerígenos.

A partir da análise isocinética, é recomendado também a aferição das vazões máximas de gases produzidos durante o funcionamento da churrasqueira, a fim de identificar a vazão de sucção necessária para que o lavador de gases colete e trate todo o efluente gasoso gerado.

Contudo, a convecção dos gases em altas temperaturas que são naturalmente coletados pela coifa da churrasqueira sem auxílio de exaustor, além do enclausuramento parcial da churrasqueira, indicam que seria possível diminuir consideravelmente a vazão de sucção do lavador de gases proposto a valores próximos da vazão produzida na combustão.

Sendo assim, verificando as vazões de gases produzidas na churrasqueira, seria possível estimar a viabilidade do lavador de gases no tratamento total ou parcial dos efluentes gasosos gerados.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A., John; P.E, Clark. Solving Kitchen ventilation Problems. **Ashrae Journal**, Atlanta (ga), p.20-24, jul. 2009.

ALMEIDA, Ivo Torres de. **A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto**. 1999. 186 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS (ACGIH). **Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice**. 23. ed. Cincinnati: American Conference Of Governmental Industrial Hygienists Inc, 1998.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. Water Environmental Federation, 20. ed. Washington, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10700**. Planejamento de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias. Rio de Janeiro, RJ, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11966**. Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da velocidade e vazão. Rio de Janeiro, RJ, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10702**. Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da massa molecular base seca. Rio de Janeiro, RJ, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11967**. Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação da umidade – Método do ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12019**. Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias – Determinação de material particulado. Rio de Janeiro, RJ, 1990.

ASSUNÇÃO, J. V. Poluição atmosférica. In: CASTELLANO, E. G., ed. Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias. São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1998. P. 271-308.

BARCELLOS, Daniel Camara. **Caraterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

BARROSO, Rodrigo Camargo. **Redução do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal por concentração gravítica a seco**. 2007. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

BAYLAR, Ahmet et al. Effect of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate. **Ksce Journal Of Civil Engineering**. [s.l.], p. 489-492. jul. 2010.

BAYLAR, Ahmet et al. Numerical Modeling of Venturi Flows for Determining Air Injection Rates Using Fluent V6.2. **Mathematical And Computational Applications**. [s.l.], p. 97-108. ago. 2009a.

BAYLAR, A.; Ozkan, F. **Applications of Venturi principles to water aeration systems**. Environmental Fluid Mechanics, v.6, p.341-357, 2006.

BAYLAR, A.; UNSAL, M.; OZKAN, F. Hydraulic structures in water aeration processes. Water, Air and Soil Pollution, v.203, p.1-14, 2009b.

BHATIA, A.. **Fundamentals of Kitchen Ventilation**. Fairfax (VA), 2012.

BIANCHINI, Marcos. **Medições do material particulado em chaminé e das partículas totais em suspensão no ar ambiente: O caso da empresa Colorminas**. 2002. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BRAND, Martha Andreia et al. QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL PARA O CONSUMO DOMÉSTICO COMERCIALIZADO NA REGIÃO SERRANA SUL DE SANTA CATARINA1. **Rev. Árvore**, Viçosa. v. 39, n. 6, p. 1165-1173, Dezembro 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Carvão Vegetal**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/apresentacoes?p_p_auth=YIBHkAay&p_p_id=20&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&_20_struts_action=/document_library/view_file_entry&_20_redirect=http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores?p_p_id=3&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&_3_groupId=0&_3_keywords=carv%C3%A3o+vegetal&_3_struts_action=%2Fsearch%2Fsearch&_3_redirect=%2Fweb%2Fguest%2Fpublicacoes-e-indicadores&_20_fileEntryId=894090>. Acesso em: 01 jul. 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. **Diário Oficial [da] República do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 22 ago. 1990a.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Resolução nº 005, de 28 de junho de 1990. Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar “PRONAR”. **Diário Oficial [da] República do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 22 ago. 1990a.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Resolução nº 008, de 6 de dezembro de 1990. Estabelece, em nível nacional, limites máximos de emissão de poluentes do ar (padrões de emissão) para processos de combustão externa em fontes novas fixas de poluição com potências nominais totais até 70 MW (setenta megawatts) e superiores. **Diário Oficial [da] República do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 1990b

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Resolução nº 382, de 2 de janeiro de 2007. Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. **Diário Oficial [da] República do Brasil**. Poder Executivo, Brasília, DF, 2006.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Poluentes Atmosféricos**. 2016. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos>>. Acesso em: 27 jul. 2016.

CARMO JR, G. N. R. **Otimização e Avaliação de Metodologias Olfatométricas Voltadas ao Saneamento Ambiental**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2005.

CETESB, **Relatório da Qualidade do ar no Estado de São Paulo**, 2005. São Paulo. CETESB 2006, 140p.

CHAVES, Enrico Lara. **Gestão Ambiental do gás do alto forno e avaliação dos sistemas de controle atmosféricos de siderúrgica, viabilizando um sistema de geração de energia elétrica**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

CHEREMISINOFF, Nicholas P.. **Handbook of Air Pollution Prevention and Control**. Woburn: Butterworth Heinemann, 2002.

CHILE. Decreto nº 4, de 13 de fevereiro de 1992. Estabelece norma de emision de material particulado a fuentes estacionarias puntuales y grupales. **Decreto 4**. Santiago, Disponível em: <<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=7303>>. Acesso em: 13 out. 2016.

COMBUSTION OF CHARCOAL FOR BARBECUE1. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1127-1133.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.221**: Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação dos pontos de amostragem: procedimento. São Paulo, Sp, 1990.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.222**: Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação da velocidade e vazão dos gases: método de ensaio. São Paulo, Sp, 1992.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.223**: Dutos e chaminés de fontes estacionarias - determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso: método de ensaio. São Paulo, Sp, 1992.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.224:** Dutos e chaminés estacionárias - determinação da umidade dos efluentes: método de ensaio. São Paulo, Sp, 1993.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **L9.225:** Dutos e chaminés de fontes estacionárias - determinação de material particulado: método de ensaio. São Paulo, Sp, 1995.

CORBITT, Robert A.. **Standard Handbook of Enviromental Engineering**. 2. ed. New York: Mcgraw-hill, 1990.

DIAS JUNIOR, Ananias Francisco; BRITO, José Otávio; ANDRADE, Carlos Rogério. GRANULOMETRIC INFLUENCE ON THE

DERISIO, J. C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. São Paulo, CETESB. 1992.

EIA. ANNUAL ENERGY REVIEW 2005. **Washington: Energy Information Administration**, 2006. 396 p.

FLAGAN, Richard C.; SEINFELD, John H. **Fundamentals of Air Pollution Engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 1988.

FIGUEREDO, Natália Aragão et al. Caracterização química e mineralógica de carvões vegetais coletados em diferentes ambientes. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 6, p. 993-1001, Dec. 2014.

FOLINSBEE, Lawrence J.. Human Health Effects of Air Pollution. **Environmental Health Perspectives**, [s.l.], v. 100, p.45-56, abr. 1992. JSTOR. <http://dx.doi.org/10.2307/3431520>.

FONTENELLE, Marcellus; ALMEIDA, Jean Carlos Meine de. Estudo da viabilidade técnica de uso do Venturi no processo de geração de microbolhas no sistema FAD. **Unoesc & Ciência - Acet**, Joaçaba, v. 5, n. 2, p.159-168, dez, 2014.

FREITAS, Adriana de Marques; SOLCI, Maria Cristina. Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. **Quím. Nova**, São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1750-1754, 2009.

G1 PR (Brasil). **Pesquisadores desenvolvem forma de eliminar fumaça do churrasco.** 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/pr/parana/noticia/2012/09/pesquisadores-desenvolvem-forma-de-eliminar-fumaca-do-churrasco.html>>. Acesso em: 07 out. 2016.

GAMA, Marcella Santos de Carvalho. **Estudo de um Sistema de Limpeza de Gases usando um Lavador Venturi de Seção Circular.** 2008. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

GAVIRIA G, Carlos F; BENAVIDES C, Paula C; TANGARIFE, Carolina A. Contaminación por material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). **Rev. Fac. Nac. Salud Pública**, Medellín, v. 29, n. 3, p. 241-250, Sept. 2011

GONÇALVES, M. A. B. **Estudo de transferência de oxigênio em reatores Air-Lift utilizando Venturi e peças cisalhantes.** Campinas: UNICAMP, 1999. 144p. Tese Doutorado

Health and Safety Authority. **Local Exhaust Ventilation.** Dublin, 2014

LIMA, Euclides Antônio Pereira de. **Um estudo sobre a qualidade do ar de Uberlândia: Material particulado em suspensão.** 2007. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

LISBOA, Henrique de Melo; SCHIRMER, Waldir Nagel. **Controle da Poluição Atmosférica: Metodologia de Controle da Poluição Atmosférica.** Apostila, 2007. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/313542774/71589130-metodologia-de-controle-a-poluicao-capitulo-7-pdf>>. Acesso em: 05 out. 2016.

MARCHWINSKA-WYRWAL, E. et al. Impact of Air Pollution on Public Health. In: KHALLAF, Mohamed K.. **The Impact of Air Pollution on Health, Economy, Environment and Agricultural Sources.** Warsaw: Intech, 2011. p. 444.

MIKAMI, R. W. **Avaliação da eficiência de um sistema biológico para tratamento de emissões atmosféricas**. 2011. 62 p. TCC (Grauação) - Curso de Tecnologia em Processos Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

PASCOALOTTO, Geanfranco. **Automação de projeto piloto de sistema biológico de tratamento de emissões atmosféricas**. 2014. 84 f. TCC (Grauação) - Curso de Tecnologia em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PICCIN, Jeferson S. et al. Otimização de sistema de autoaspiração de ar tipo Venturi para tratamento de água ferruginosa. **Rev. bras. eng. agríc. Ambient.**, Campina Grande, v. 14, n. 5, p. 531-537, Maio 2010.

RAVEN, J. A., FALKOWSKI, P. G. (1999), **Oceanic sinks for atmospheric CO₂**. *Plant, Cell & Environment*, 22: 741-755. doi: 10.1046/j.1365-3040.1999.00419.x

RAVEN, P. H.; BERG, L. R.; JOHNSON, G. B. **Enviroment**. Fort Worth, Saunders College Publishing, 1995.

RESENDE, Fernando. **Poluição atmosférica por emissão de material particulado: avaliação e controle nos canteiros de obras de edifícios**. 2007. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SANTA CATARINA (Estado). Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. **Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009**. Florianópolis, SC. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/20_12_2013_14.30.40.b479cb7a256a963c9e0bbf87bd860d38.pdf>. Acesso em: 08 out. 2016.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo. Resolução nº10 SAA, de 11 de julho de 2003. São Paulo: 2003.

SÃO PAULO. CETESB. **Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e metodologias analíticas de amostragem**. 2009. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp->

content/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2016.

SCHNELLE JUNIOR, Karl B.; BROWN, Charles A.. **Air Pollution Control Technology Handbook**. Boca Raton: Crc Press, 2001.

SOUZA, Natalia Dias de et al. Estudo de Caso de uma Planta de Carbonização: Avaliação de Características e Qualidade do Carvão Vegetal Visando Uso Siderúrgico. **Floresta Ambient**, Seropédica, v. 23, n. 2, p. 270-277, Junho 2016.

TEIXEIRA, M. B. F. **Hidrodinâmica e transferência de massa em ejetores líquido-gás com escoamento descendente**. Campinas: UNICAMP, 1999. 146p. Dissertação Mestrado

UHLIG, Alexandre. **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimação do consumo**. 2008. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (on line) disponível em: <http://www.epa.gov>. Acessos diversos em julho de 2016.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Current Knowledge of Particulate Matter (PM) Continuous Emission Monitoring**. Wahington, 2000.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 1**. Sample and Velocity Traverses for Stationary Sources. Washington, 1977.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 2**. Determination of Stack Gas Velocity and Volumetric Flow Rate (Type S Pitot Tube). Washington, 1977.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 3**. Gas Analysis for the Determination of Dry Molecular Weight. Washington, 1977.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 4.** Determination of Moisture Content in Stack Gases. Washington, 1977.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 5.** Determination of Particulate Matter Emission from Stationary Sources. Washington, 1977.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 9.** Visual Determination of the Opacity of Emissions From Stationary Sources. Washington, 1974.

UNITED STATES BUREAU OF MINES. **Ringelmann Smoke Chart.** Washington, 1967.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Visible Emission Field Manual EPA Methods 9 and 22.** Washington, 1993.

VILLANUEVA, Luz Zodoraida Dondero. **Redução do Impacto da Poluição do Ar em Usinas Termelétricas.** 1998. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.