

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE JUSIS BLANCO

**PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA LAVAGEM DE GASES EMITIDOS POR
MOTORES DO CICLO OTTO EM AMBIENTES CONFINADOS E AVALIAÇÃO DA
REDUÇÃO DOS POLUENTES GERADOS PELA COMBUSTÃO**

SANTOS/SP

2015

ALEXANDRE JUSIS BLANCO

**PROJETO DE UM DISPOSITIVO PARA LAVAGEM DE GASES EMITIDOS POR
MOTORES DO CICLO OTTO EM AMBIENTES CONFINADOS E AVALIAÇÃO DA
REDUÇÃO DOS POLUENTES GERADOS PELA COMBUSTÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação da Profa. Dra. Karina Tamião de Campos Roseno e Prof. Dr. Aldo Ramos Santos.

SANTOS/SP

2015

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo,
exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

BLANCO, Alexandre Juis

/ Alexandre
Juis Blanco Santos/SP, 2015.
77 p.

Inclui bibliografia.

Orientador: Dra. Karina Tamião de Campos Roseno.

Coorientador: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos.

Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação). Universidade Santa Cecília.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
Santos, SP, 2015.

Palavras-chave 1. Poluição Atmosférica 2. Lavador de Gases 3. Motor
de Combustão Interna 4. Sustentabilidade 5. Qualidade do Ar I.
Projeto de um dispositivo para lavagem de gases emitidos por motores
do ciclo Otto em ambientes confinados e avaliação da redução dos
poluentes gerados pela combustão. II. Universidade Santa Cecília.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos mecânicos e moradores vizinhos de oficinas mecânicas que sofrem diariamente com a inalação de gases provenientes da combustão de motores durante a manutenção de veículos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente neste ano como mestrando, mas que em todos os momentos é o maior mestre que uma pessoa pode conhecer.

Aos meus orientadores professores, **Dra. Karina, Dr. Aldo, Dra. Miriam Antonio de Abreu e Prof. Neves** pelo suporte educacional, pelas suas correções e incentivos.

Agradeço à **minha família**, que me deu apoio, nas horas difíceis de desânimo e cansaço.

Agradeço **a todos os professores** por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional. Por sua dedicação, não somente pelo ensino mas por seu tempo e dedicação. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados, aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

À Universidade Santa Cecília, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

À Família Teixeira por todo o apoio e carinho durante todos esses anos.

Ao Dr. Marcelo Teixeira por ter me incentivado a cursar o Mestrado em Engenharia Mecânica.

À Dra. Lúcia Teixeira Furlani pelo total apoio na conclusão do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica.

Aos amigos, que sem eles não poderia ter conseguido realizar esse projeto: Renan, Eng. Marcelo, Delson, Augusto e Mauro (Monumento Shopping Car); Ronaldo Conrado e funcionários (Auto Elétrica São Judas), Rezende e funcionários (Stilomatic); Ricardo (Radiadores Cardoso); Sr. Ademar e Rafael (Centro Automotivo Ademar).

Ao Prof. Moino mestre, orientador, coordenador do curso de graduação da Engenharia Mecânica, professor, amigo e exemplo, pelos conselhos, e força.

Ao Prof. Morilla amigo e conselheiro, grande incentivador de pesquisas.

Ao Prof. Deovaldo e Profa. Marlene por seus conselhos.

Ao Prof. Marcos Tadeu por seus ensinamentos em pesquisas e inovações tecnológicas.

Em especial ao **Prof. João Maria de Freitas** por seus conselhos para continuar seguindo pelos caminhos da pesquisa científica e docência.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação. O meu muito obrigado.

Alexandre Jusis Blanco

EPÍGRAFE

*“Aquele que habita no esconderijo do Altíssimo, à
sombra do Onipotente descansará”.*

Salmos 91:1

RESUMO

A inalação involuntária dos gases de escape provenientes de motores de combustão interna causa diversos problemas respiratórios e podem, dependendo da toxicidade, levar ao óbito. Esse problema é ainda mais agravante nas oficinas mecânicas, pois estas realizam testes e manutenções de veículos onde a ventilação existente é insuficiente para remover os gases poluentes emitidos pelos escapamentos. Dentro desse contexto, o objetivo do presente trabalho foi projetar e testar um dispositivo de captação e avaliação dos gases liberados pelos escapamentos de veículos automotores em uma oficina mecânica (ambiente confinado). O equipamento objeto de estudo foi denominado de Dispositivo para Lavagem de Gases do ciclo Otto (DLGO). Os testes com o DLGO foram realizados em um veículo Ford Ka, modelo 1.0, ano 2004. Os gases emitidos pelo escapamento do veículo foram analisados antes e após a instalação do dispositivo construído. O analisador de gases utilizado foi um PC-MULTIGAS da NAPRO Eletrônica que atende às normas NBR's, OIML R99 CLASS I, ISO 3930 e ASM/BAR 97, sendo o aparelho utilizado pela empresa que realiza o programa de Inspeção Veicular do Município de São Paulo, capital do Estado de São Paulo. Os produtos da combustão analisados foram monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC_s) e oxigênio (O₂). Os resultados mostraram que o dispositivo (DLGO) reduz em aproximadamente de 83% a emissão de HC_s, 90% de CO e 95% de CO₂. A simplicidade de construção do equipamento e alta eficácia de seu mecanismo em capturar e reduzir a quantidade de gases poluentes, aliados ao baixo custo do material utilizado na fabricação, conferem ao dispositivo a característica de ser sustentável.

Palavras-chave: Poluição Atmosférica. Lavador de Gases. Motor de Combustão Interna. Sustentabilidade. Qualidade do Ar.

ABSTRACT

The involuntary inhalation of exhaust gases from internal combustion engines cause several respiratory problems and can, depending on the toxicity, lead to death. This problem is even more aggravating in mechanical workshops, as they perform tests and maintenance of vehicles where the existing ventilation is insufficient to remove gaseous pollutants emitted by tailpipes. Within this context, the objective of this study was to design and test a device of capture and handling of gases released by exhausts of motor vehicles in a garage (confined environment). The equipment object of study was called gas washing device of the Otto cycle (GWDO). The tests with the GWDO were carried out in a vehicle Ford Ka 1.0, 2004 year model. The gases emitted by the exhaust of the vehicle were analyzed before and after device installation built. Gas Analyzer used was a PC-MULTIGAS of NAPRO electronics that is based on the NBR's, OIML R99 non CLASS I, ISO 3930 and ASM/97 BAR, being the unit used by the company that performs vehicle inspection program of the city of São Paulo, capital of the State of São Paulo in Brazil. Combustion products analyzed were carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), hydrocarbons (HCs) and oxygen (O₂). The results showed that the device (GWDO) reduces approximately 83% the emission of HCs, 90% of CO and 95% CO₂. The simplicity of equipment construction and high effectiveness of its mechanism to capture and reduce the amount of pollutant gases, allied to the low cost of material used in manufacturing, give the device the characteristic of being sustainable.

Keywords: Air Pollution. Washing Gases. Internal Combustion Engine. Sustainability. Air Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução do consumo no segmento rodoviário no estado de São Paulo.....	26
Figura 2- Gráfico do aumento anual da frota de veículos no estado de São Paulo.....	26
Figura 3 - Gráfico da evolução do indicador de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) por veículo no estado de São Paulo.....	27
Figura 4 - Contribuição das categorias de veículos na emissão de poluentes no Estado de São Paulo em 2013.....	28
Figura 5 - Contribuição dos veículos do ciclo Otto na emissão de Poluentes no Estado de São Paulo em 2013.....	28
Figura 7 - Emissões do monóxido de carbono (CO) por tipo de combustível.....	32
Figura 8 – Emissões do monóxido de carbono (CO) por categoria de veículo.....	33
Figura 9 - Representação esquemática da separação por membrana.....	36
Figura 10 - Assentamentos de partículas na circunscrição da gota.....	38
Figura 11 - Lavador sem enchimento.....	40
Figura 12 - Lavador com enchimento.....	41
Figura 13 - Lavadores tipo torre.....	42
Figura 14 - Lavador com leito fluidizado.....	43
Figura 15 - Lavador Roto Clone tipo N.....	44
Figura 16 - Lavador rotativo vertical.....	45
Figura 17 - Lavador Roto Clone.....	46
Figura 18 - Lavador de fluxo ciclônico úmido.....	47
Figura 19 - Lavador por borbulhamento.....	48
Figura 20 - Esquema de funcionamento do um lavador por borbulhamento (Doyle).....	49
Figura 21 - Analisador de Gases PC Multigás NAPRO.....	51
Figura 22 - Scanner automotivo Tecnomotor TM.....	52
Figura 23 - Sonda de coleta de gases tipo gatilho NAPRO.....	52
Figura 24 - Sonda do Analisador de Gases conectado diretamente no veículo.....	53
Figura 25 - Esquema da primeira montagem com o monitoramento dos gases conectando A sonda diretamente no veículo.....	54
Figura 26 - Máquina hidráulica para curvar tubos.....	55
Figura 27 - A) Reservatório do DLGO, feito de bombona reutilizada. B) Detalhe do bocal de entrada do reservatório.....	56
Figura 28 - Abraçadeira de conexão para tubos de escapamento.....	57

Figura 29 - Anemômetro digital AM-4201 Lutron	57
Figura 30 - Cronômetro digital.....	58
Figura 31 - Tubulação dobrada em ângulo de 90° para melhor aporte do contato entre o dispositivo e o escapamento veicular.....	59
Figura 32 - Croqui do dispositivo DLGO.....	60
Figura 33 - Interface do programa scanner Tecnomotor monitorando o motor durante os experimentos.....	61
Figura 34 - Esquema de montagem da segunda experiência com monitoramento dos gases conectando a sonda na saída do dispositivo DLGO.....	61
Figura 35 - Sonda do Analisador de Gases, instalado na descarga do DLGO.....	62
Figura 36 - Reprodução da tela de interface do analisador mostrando A) antes e B) após a instalação do DLGO.....	64
Figura 37 - Redução do HCs (Hidrocarbonetos - Combustível não queimado), CO e CO ₂ antes e depois da instalação do DLGO.....	67
Figura 38 - A) Reprodução da tela da interface do analisador com tempo 10 minutos e B) tempo de 20 minutos, após a instalação do DLGO.....	69
Figura 39 - A) Reprodução da tela da interface do analisador com tempo 30 minutos e B) tempo de 40 minutos, após a instalação do DLGO.....	69
Figura 40 - A) Reprodução da tela da interface do analisador com tempo 50 minutos e B) tempo de 60 minutos, após a instalação do DLGO.....	70
Figura 41 - Emissão de HCs com o dispositivo funcionando a intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.....	70
Figura 42 -. Emissão de CO com o dispositivo funcionando a intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.....	71
Figura 43 -. Emissão de CO ₂ com o dispositivo funcionando a intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites Máximos de Emissão de Poluentes para Veículos Automotores Leves de Passageiros.....	22
Tabela 2 - Veículos Leves Comerciais (ensaio de medição de gases) em referência aos veículos com massa menor que 1700 Kg.....	23
Tabela 3 - Estimativa do consumo de Gasolina no estado de São Paulo.....	27
Tabela 4 - Fontes de Poluição Atmosférica no Estado de São Paulo.....	30
Tabela 5 - Tempo médio de funcionamento do motor para manutenção em oficinas mecânicas.....	64
Tabela 6 - Medição dos gases antes e depois do uso do DLGO em rotações próximas a 2500 rpm.....	65
Tabela 7 - Tempo de Saturação da água com o dispositivo funcionando em intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.....	67
Tabela 8 - Porcentagem de redução de gases comparando sem o DLGO e com o DLGO, funcionando em diferentes intervalos de tempo.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AAF	<i>American Air Filtre</i> (Filtro de Ar Americano)
ASM/BAR	<i>American Society for Metals / Bureau of Automotive Repair</i>
AFR	<i>Air Fuel Ratio</i> (Relação de Combustível do Ar)
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONTROLAR	Controle do ar
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DETRAN-SP	Departamento Estadual de Trânsito
DLGO	Dispositivo de Lavagem de Gases do Ciclo Otto
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> (Recirculação dos gases de exaustão)
GEE	Gases do Efeito Estufa
GNV	Gás Natural Veicular
HBCO	Carboxihemoglobina
HC _s	Hidrocarbonetos
H ₂ S	Ácido Sulfídrico
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
ISSO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial
MP 2,5 µm	Partículas inaláveis finas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm
MP	Material Particulado
MMA	Ministério do Meio Ambiente

NAPRO	Núcleo Análise Profissional
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NMHC	Hidrocarboneto não Metano
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
O ₂	Oxigênio
OIML	Organização Internacional de Metrologia Legal
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
ppm	Partes por Milhão
Re	Número de Reynolds
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RCHO	Aldeídos
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade dos engenheiros automotivos)
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SINDIREPA-SP	Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos do Estado de São Paulo
TOE	Tonelada de Óleo Equivalente
THC	Hidrocarbonetos Totais
UNISANTA	Universidade Santa Cecília
Vo	Velocidade de Impactação Inercial.
Dp	Diâmetro da partícula
Db	Diâmetro da gota de água
x	Distância entre as correntes de fluxo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1. Generalidades.....	18
1.2. Objetivos.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Emissões de Motores de Combustão Interna.....	21
2.1.1. A Qualidade do Ar e as Emissões Veiculares.....	25
2.1.2. Monóxido de Carbono (CO).....	31
2.1.3. Hidrocarbonetos (HC _s).....	33
2.1.4. Dióxido de Carbono (CO ₂).....	34
2.2. Técnicas de Controle de Poluição do Ar.....	34
2.2.1. Absorção.....	34
2.2.2. Adsorção.....	35
2.2.3. Condensação.....	35
2.2.4. Separação por Membrana.....	36
2.3. Coleta de Partículas na Separação Úmida.....	37
2.3.1. Impactação Inercial de Partículas por Via Úmida.....	37
2.3.2. Assentamento por Inércia.....	38
2.4. Lavador de Gases de Via Úmida.....	38
2.4.1. Lavador sem Enchimento.....	40
2.4.2. Lavador com Enchimento.....	41
2.4.3. Lavador de Torre.....	42
2.4.4. Lavador com Leito Fluidizado	43

2.4.5. Lavador Roto Clone N.....	44
2.4.6. Lavador Rotativo Vertical.....	45
2.4.7. Lavador Roto Clone.....	46
2.4.8. Lavador de fluxo ciclônico úmido	47
2.4.9. Lavador por Borbulhamento.....	48
2.5. Considerações Finais.....	49
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
3.1. Primeiro experimento sem o dispositivo DLGO.....	50
3.1.1. Equipamentos e instrumentos.....	50
3.1.1.1. Analisador de Gases.....	51
3.1.1.2. Scanner automotivo.....	52
3.1.1.3. Sonda para coleta de gases ciclo Otto.....	52
3.1.2. Método do Experimento sem o DLGO.....	53
3.2. Segundo experimento com o DLGO.....	55
3.2.1. Equipamentos e instrumentos.....	55
3.2.1.1. Tubulação do dispositivo DLGO.....	55
3.2.1.2. Máquina Hidráulica para curvar tubos.....	55
3.2.1.3. Reservatório de água do DLGO.....	56
3.2.1.4. Abraçadeira de fixação da tubulação do DLGO.....	57
3.2.1.5. Anemômetro digital	57
3.2.1.6. Cronômetro digital.....	58
3.2.2. Método do Experimento com o DLGO.....	58
3.3. Terceiro Experimento com o DLGO e análise da saturação da água.....	63

3.3.1. Equipamentos e instrumentos.....	63
3.3.2. Saturação da água com o DLGO.....	63
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1. Primeiro experimento sem o DLGO.....	65
4.2. Segundo experimento com o DLGO.....	65
4.3. Terceiro experimento do DLGO e análise da saturação da água.....	67
4.3.1. Porcentagem de redução de poluentes da saturação do DLGO.....	68
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	72
5.1. Conclusões	72
5.2. Sugestões.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

A poluição é parte integrante da sociedade industrial, isto é, uma das consequências da geração de energia útil pelo processo de combustão (BRUNETTI, 2012).

O controle da poluição do ar, ou atmosférica, é de suma importância, pois os gases tóxicos liberados ao meio ambiente podem causar danos à saúde dos seres humanos provocando doenças como a bronquite, rinite, pneumonia, alterações no sistema imunológico e até mesmo câncer. Diversos receptores, além dos seres humanos são afetados pela poluição do ar, dentre eles animais, plantas, materiais naturais e sintéticos, ecossistemas aquáticos e, também, as propriedades atmosféricas como visibilidade, taxa de formação de neblina e de precipitação, radiação solar e temperatura (MELLO *apud* ROSENO, 2008).

Num momento em que a preservação do meio ambiente é uma das questões mais discutidas globalmente e devido às facilidades e avanços que o advento dos motores de combustão interna tem proporcionado as pessoas de forma direta ou indiretamente, seja em veículos, motores estacionários, geradores e equipamentos, pouco se tem levado em consideração o momento da manutenção ou testes dos mesmos. A manutenção dos motores normalmente se dá em espaços sem renovação de ar ou com limitação de ventilação (espaços confinados); podendo causar entre outras coisas, envenenamento por alguns gases, dentre eles o monóxido de carbono (CO). Este gás, um dos subprodutos da reação química por combustão incompleta, pode se acumular rapidamente, mesmo em áreas que parecem ser bem ventiladas, sendo capaz de gerar concentrações perigosas, a ponto de conduzir ao óbito, como afirmam CAIAZZO *et al.* (2013).

O IBAMA (2014) observa que além dessa problemática acerca da inalação involuntária dos gases de escape, os veículos automotores são grandes fontes emissoras de poluentes para a atmosfera e que demandam, a partir do melhor conhecimento sobre as mesmas, a adoção de múltiplas medidas de controle. Dos poluentes emitidos pelo escape dos automóveis, Brunetti (2012) destaca os seguintes: monóxido de carbono (CO), dióxido

de carbono (CO_2), hidrocarbonetos (HC_s), aldeídos, compostos de enxofre (SO_2 e H_2S), óxidos de nitrogênio (NO_x) e partículas diversas (poeiras, fumos, fuligem, etc.).

Para saturar o ar interno de um ambiente, não é necessário vários motores estejam funcionando e expelindo gases. Brunetti (2012) observou que apenas um motor em funcionamento, já é o suficiente para gerar a quantidade necessária fatal para o ser humano. A inalação de uma concentração de 400 ppm de CO por 1 a 2 horas provoca dores de cabeça na parte frontal, capazes de induzir desde uma simples tontura até desmaios de uma pessoa, em apenas uma hora inalando 1600 ppm, causa náuseas nos primeiros vinte minutos e provoca morte em 1 hora (GAMA GASES, 2007).

Exaurindo ou tratando os gases de exaustão no momento de sua saída da tubulação de escapamento, as condições de trabalho podem ser mais seguras no segmento de manutenção e reparação automotiva, que hoje, realiza a manutenção e testes de motores em diversas condições de funcionamento, normalmente em ambientes de baixa ou nenhuma ventilação. Uma possível solução seria realizar os trabalhos somente em áreas planas ou aumentar a ventilação se a área for pequena. Segundo Gomes (2006), o natural seria aumentar a ventilação para a renovação do ar, possibilitando a diluição dos gases de exaustão, diminuindo sua toxicidade. No entanto, há casos em que isso não é possível. Além disso, a necessidade de se recorrer a exaustores e ventiladores para diluir os gases é uma alternativa significativa para a melhora das condições de trabalho no local. No entanto, o problema da poluição ainda persiste, pois, os gases são descartados diretamente na atmosfera.

1.2. Objetivos

Dentro deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo o projeto e a construção de um dispositivo simples, sustentável, portátil, que visa reduzir os efeitos nocivos das emissões de veículos automotores geradas em espaços confinados, tendo como base de funcionamento, os lavadores de gases, utilizados em larga escala nas indústrias.

Os objetivos específicos foram divididos em três etapas:

- a) A primeira etapa foi constituída de testes para determinar as quantidades de poluentes que são emitidos para o espaço confinado (oficina mecânica).
- b) Na segunda etapa, com o desenvolvimento do Dispositivo de Lavagem do Ciclo Otto (DLGO), determinar experimentalmente sua eficiência.
- c) Em uma terceira etapa de testes experimentais com o auxílio de um analisador de gases, estudar a saturação da água do dispositivo e a sua eficácia durante o tempo necessário para manutenção do veículo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Emissões de Motores de Combustão Interna

Os veículos que são propulsionados por motores de combustão interna contribuem para a contínua deterioração da qualidade do ar, especialmente nos grandes centros urbanos, o que segundo Roseno (2008) se deve a rápida industrialização e o desenvolvimento de tecnologias avançadas, assim como o enorme crescimento da população. Veículos a diesel, gasolina ou álcool produzem gases, vapores e material particulado que são emitidos para a atmosfera. A emissão de gases e material particulado pelo tubo de escapamento dos veículos é devida às reações químicas associadas ao processo de combustão que ocorre dentro do motor.

De acordo com Brunetti (2012), “emissões” é um termo utilizado para designar os produtos considerados nocivos para o homem e meio ambiente. Devido às leis ambientais e aos incentivos para redução dos poluentes, os limites máximos de emissões, variam de acordo com o veículo (leve ou pesado), ano, modelo e combustível utilizado, como exemplificam as tabelas 1 e 2. As emissões variam também com a relação à razão ar/combustível do processo de combustão, com a velocidade do motor, com a geometria da câmara de combustão e com a existência de equipamento de controle da emissão (catalisador).

Tabela 1 - Limites Máximos de Emissão de Poluentes para Veículos Automotores Leves de Passageiros.

POLUENTES	LIMITES	
	Fase L-5 ⁽⁷⁾	Fase L-6 ⁽¹⁾
	Desde 1º/1/2009	A partir de 1º/1/2014
Monóxido de carbono (CO em g/km)	2,0	1,30
Hidrocarbonetos (HC em g/Km)	0,30 ⁽²⁾	0,30 ⁽²⁾
Hidrocarbonetos não metanos (NMHC em g/Km)	0,05	0,05
Óxidos de nitrogênio (NOx em g/Km)	0,12 ⁽³⁾ ou 0,25 ⁽⁴⁾	0,08
Material particulado ⁽⁴⁾ (MP em g/Km)	0,05	0,025
Aldeídos ⁽³⁾ (CHO g/Km)	0,02	0,02
Emissão evaporativa (g/ensaio)	2,0	1,5 ⁽⁶⁾ ou 2,0 ^{(5) (6)}
Emissão de gás no cárter	nula	nula

- (1) Fase L-6: Em 2014 iniciou-se a 6ª fase de controle de emissões de poluentes para veículos leves que se aplica aos modelos de veículos leves 2015, estendendo para todos de veículos do ciclo Otto;
- (2) Aplicável somente a veículos movidos a GNV;
- (3) Aplicável somente a veículos movidos a gasolina e etanol;
- (4) Aplicável somente a veículos movidos a óleo diesel;
- (5) Aplicável aos ensaios realizados em câmara selada de volume variável;
- (6) Aplicado a todos veículos a partir de 1º/1/2012.
- (7) Fase L-5: Nesta fase deu-se a redução de 31% das emissões de hidrocarbonetos não metano para os veículos leves do ciclo Otto e de 48% e 42% para as emissões de NOx para os veículos leves do ciclo Otto.

Fonte: Adaptada de IBAMA (2014).

Tabela 2 - Ensaio de medição de gases para Veículos Leves Comerciais em referência a veículos com massa menor que 1700 Kg.

POLUENTES	LIMITES		
	Fase L-4 ⁽¹⁾	Fase L-5 ⁽⁸⁾	Fase L-6 ⁽²⁾
	Desde 1º/1/2005	Desde 1º/1/2009	A partir de 1º/1/2012
Monóxido de carbono (CO em g/km)	2,0	2,0	1,30
Hidrocarbonetos (HC em g/Km)	0,30 ⁽³⁾	0,30 ⁽⁷⁾	0,30 ⁽²⁾
Hidrocarbonetos não metanos (NMHC em g/Km)	0,16	0,05	0,05
Óxidos de nitrogênio (NOx em g/Km)	0,25 ⁽⁴⁾ ou 0,60 ⁽⁵⁾	0,12 ⁽⁴⁾ ou 0,25 ⁽⁵⁾	0,08
Material particulado ⁽⁵⁾ (MP em g/Km)	0,08	0,05	0,025
Aldeídos ⁽⁴⁾ (CHO g/Km)	0,03	0,02	0,02
Emissão evaporativa ⁽⁴⁾ (g/ensaio)	2,0	2,0	1,5 ⁽⁷⁾ ou 2,0 ⁽⁶⁾
Emissão de gás no cárter	Nula	Nula	Nula

- (1) Fase L- 4: Tendo como referência a Resolução CONAMA Nº 315 de 2002, a prioridade nesta fase que teve início no ano de 2005 é a redução das emissões de HC e NOx, (substâncias precursoras de Ozônio). Para o atendimento desta fase, se deu o desenvolvimento de motores com novas tecnologias como a otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos de injeção, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica;
- (2) Fase L- 6: Em 2014 iniciou-se a 6ª fase de controle de emissões de poluentes para veículos leves que se aplica aos novos modelos 2015, estendendo para todos os modelos de veículos leves e novos lançamentos de veículos do ciclo Otto;
- (3) Aplicável somente a veículos movidos a GNV;
- (4) Aplicável somente a veículos movidos a gasolina e etanol;
- (5) Aplicável somente a Veículos movidos a óleo diesel;
- (6) Aplicável aos ensaios realizados em câmara selada de volume variável;
- (7) Aplicado a todos veículos a partir de 1º/1/2012.
- (8) Fase L-5: Nesta fase deu-se a redução de 31% das emissões de hidrocarbonetos não metano para os veículos leves do ciclo Otto e de 48% e 42% para as emissões de NOx para os veículos leves do ciclo Otto.

Fonte: Adaptada de IBAMA (2014).

Um veículo tem as emissões classificadas em diretas ou indiretas. As emissões diretas ocorrem pela queima do combustível dentro da câmara de combustão e as indiretas que são de natureza evaporativa do combustível, aparecendo durante o uso e o repouso do veículo. De acordo com IBAMA (2013) as influências nas emissões são dadas por muitos fatores, dentre os quais se destacam: A tecnologia do motor, porte e tipo de uso do veículo, idade do veículo, projeto e materiais do sistema de alimentação de combustível, tipo e qualidade do combustível (pressão de vapor), condições de manutenção e condução, além de fatores meteorológicos pressão e temperatura ambientes.

Brunetti (2012) e Bosch (2005) relatam que as emissões provenientes de um motor de combustão interna (ciclo Otto) decorrem da queima incompleta, não ideal, dos combustíveis pelo motor, compreendendo uma série de substâncias como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarbonetos (HC_s), aldeídos (RCHO), compostos de enxofre (SO₂ e H₂S), óxidos de nitrogênio (NO_x) e material particulado (MP).

As emissões evaporativas são constituídas pelos hidrocarbonetos (HC_s) que evaporam do sistema de alimentação de combustível do veículo. Segundo IBAMA (2014) são provenientes de emissões diurnas que são geradas com o veículo em repouso, devido às mudanças de temperatura ambiente ao longo do passar do dia, perdas em movimento que são as emissões de vapores de combustível que ocorrem enquanto o automóvel está em circulação pelo sistema de alimentação (tanque, mangueiras, canister, motor, retorno), aumento da pressão e da temperatura do combustível durante o funcionamento do automóvel e emissões, evaporativas propriamente ditas do veículo em repouso com o motor quente. De acordo com Bosch (2005), apesar do veículo estar parado ainda ocorrem as emissões pois o mesmo está aquecido devido à circulação interna e ao calor residual desprendido do motor ao combustível de retorno, que não é mais necessário ao processo.

2.1.1. A Qualidade do Ar e as Emissões Veiculares

Como afirmado anteriormente, os automóveis e as indústrias são os maiores responsáveis pela emissão de gases poluentes. A emissão de gases e material particulado pelo tubo do escapamento dos veículos são subprodutos das reações químicas associadas ao processo de combustão que ocorre no motor (Soldá, 2007). Segundo Guarieiro *et al.* (2011) os principais poluentes lançados na atmosfera pelos veículos são provenientes do processo de combustão incompleta, quando o combustível injetado no cilindro não encontra a quantidade necessária de ar para sua queima.

Os gases de exaustão dos automóveis são formados não somente pelos produtos, da combustão completa (CO_2 e H_2O), mas devido à regulação do motor ou da qualidade do combustível e aditivos acrescentados, são gerados CO produzido pela queima incompleta do combustível, hidrocarbonetos não reagido, material particulado e NO_x , que é obtido pela oxidação de compostos de nitrogênio (ROSENO, 2008).

O consumo anual de combustível em especial a gasolina do tipo C comum está disponibilizado pela Agência Nacional de Petróleo ANP (2014) para o estado de São Paulo, mostrando um aumento acentuado (figura 1). O crescimento do consumo de combustível se deve ao avanço da frota circulante no estado de São Paulo (figura 2). No ano de 2014 a CETESB realizou um inventário com base em dados do Anuário Estatístico de Energéticos ANP (2014), no município do estado de São Paulo, apresentado a estimativa do consumo de gasolina, mostrando um consumo em 2013 de 10,5 bilhões de litros de gasolina (tabela 3). A evolução do indicador de emissões de CO_2 no período de 2008 a 2013 mostra uma tendência de aumento nessas emissões, principalmente em função do uso da gasolina ao longo de 2013 ficando próximas a 2,8 toneladas de CO_2 por ano por veículo. Pode-se destacar que as emissões de CO_2 para o ciclo Otto estão na casa das centenas de milhares de toneladas emitidas por ano como mostrado na figura 3. Já as emissões de MP, SO_2 e RCHO estão na casa dos milhares de toneladas. Mesmo com esta diferença os níveis de CO ambientais não representam um motivo de grande preocupação em termos de saúde pública, conforme Relatório de Qualidade do Ar de 2013 da (CETESB, 2014).

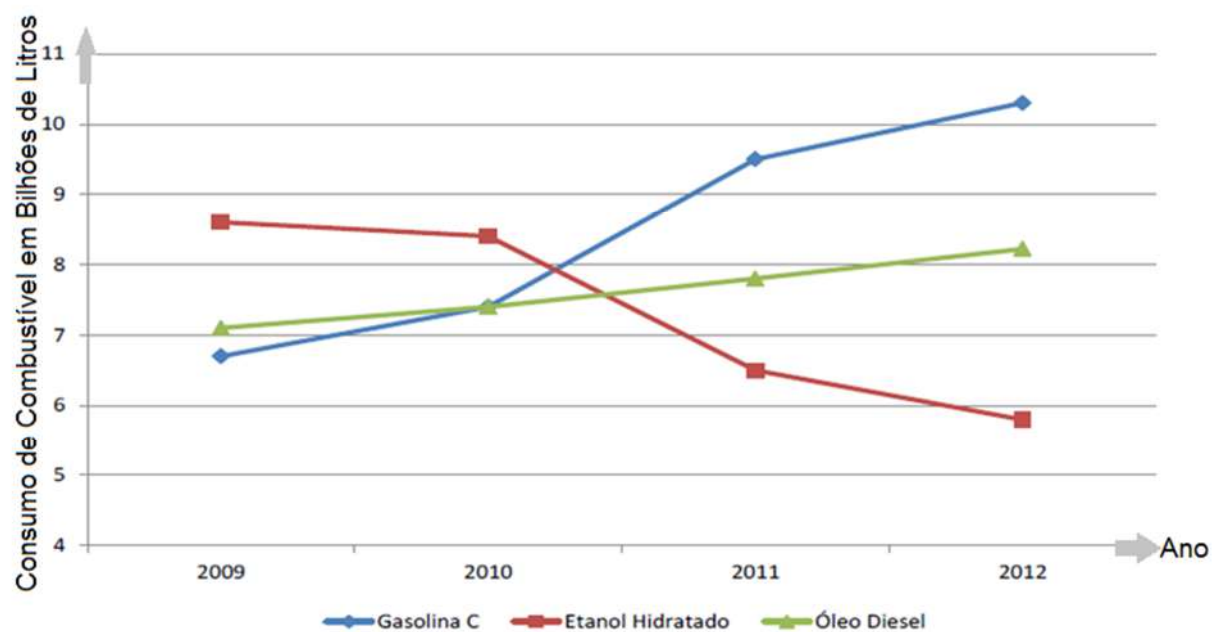


Figura 1 - Evolução do consumo no segmento rodoviário no estado de São Paulo.

Fonte: Adaptado CETESB (2014).

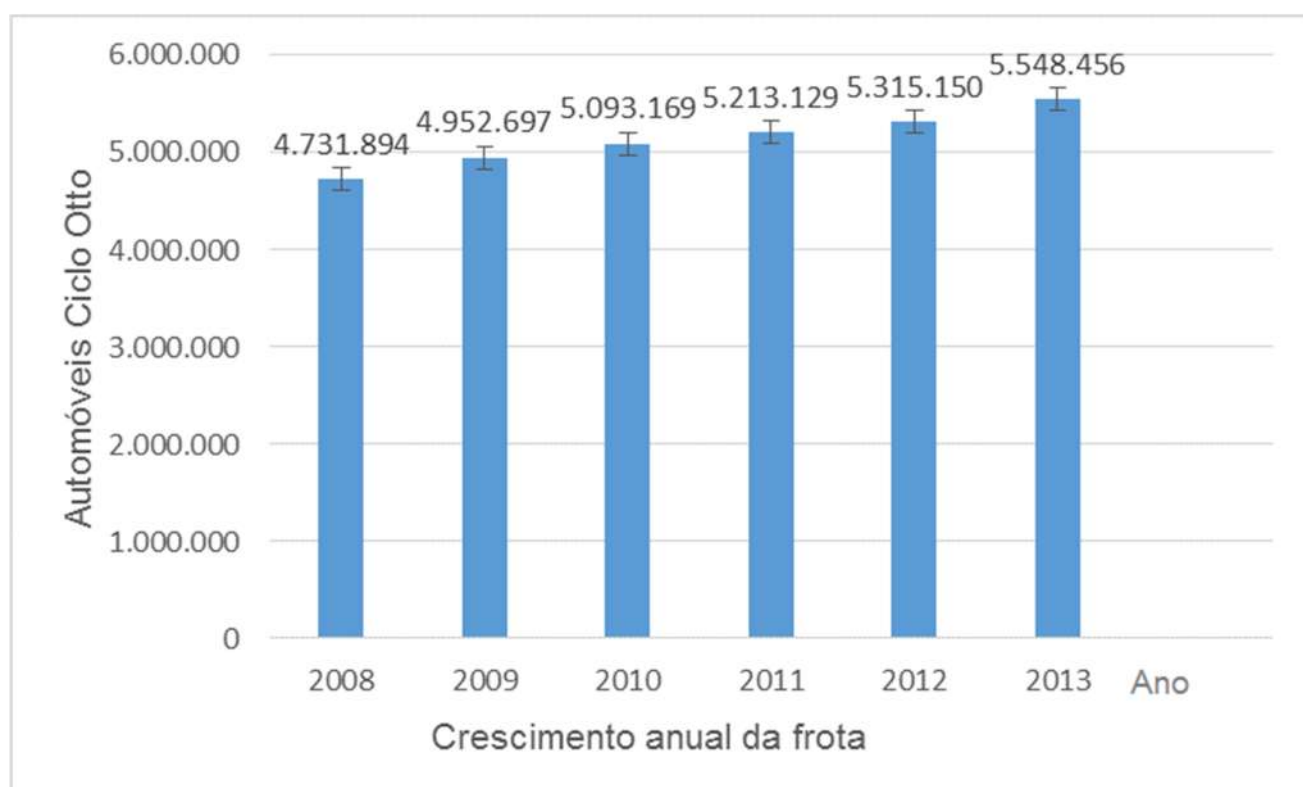


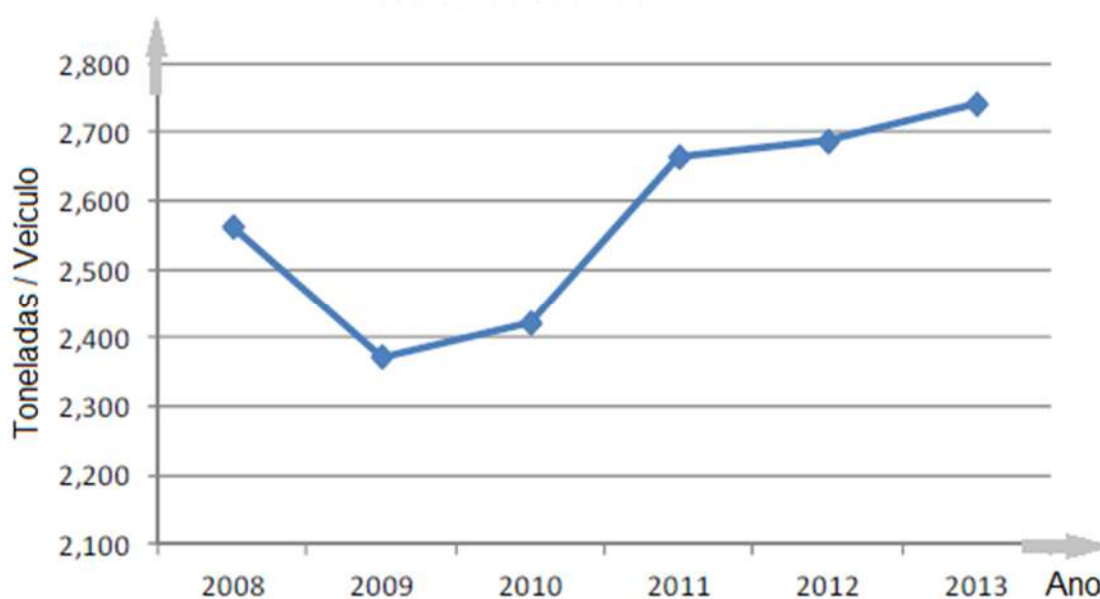
Figura 2- Gráfico do aumento anual da frota de veículos no estado de São Paulo.

Fonte: Adaptado Fonte: DETRAN-SP/ SEADE (2014).

Tabela 3 - Estimativa do consumo de Gasolina no estado de São Paulo.

Combustível	Consumo anual em bilhões de litros					
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Gasolina C	7,02	6,7	7,4	9,5	10,3	10,5

Fonte: Adaptado ANP (2014).

**Figura 3** – Gráfico da evolução do indicador de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) por veículo no estado de São Paulo.

Fonte: Adaptado CETESB (2014).

A contribuição da porcentagem na emissão de poluentes é demonstrada graficamente por categoria de veículo sendo: automóveis, veículos leves e motocicletas do ciclo Otto e ônibus, caminhões do ciclo Diesel, como mostrado na Figura 4. Pode-se destacar a grande contribuição dos veículos do ciclo Otto nas emissões de CO₂, tanto automóveis como veículos leves, (figura 5). A grande quantidade de veículos nessas categorias, como a intensidade de uso do veículo, acentuam ainda mais a emissão de poluentes.

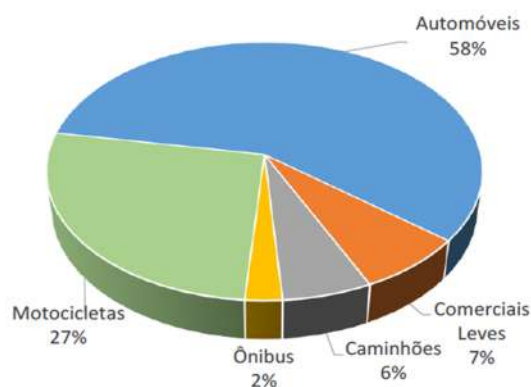


Figura 4 - Contribuição das categorias de veículos na emissão de poluentes no Estado de São Paulo em 2013.

Fonte: Adaptado CETESB (2014).

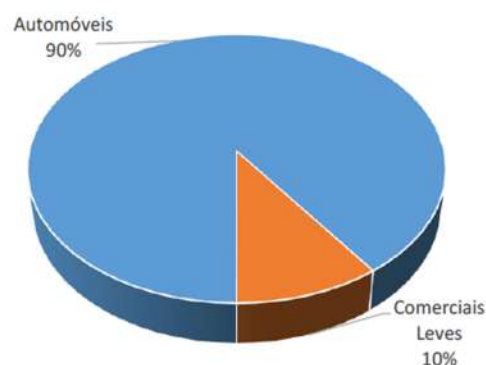


Figura 5 - Contribuição dos veículos do ciclo Otto na emissão de Poluentes no Estado de São Paulo em 2013.

Fonte: Adaptado CETESB (2014).

A contribuição relativa de cada categoria de veículos, na emissão de poluentes CO, NO_x e MP no estado de São Paulo, preponderante por parte dos automóveis no ano de 2013 é mostrada na figura 6.

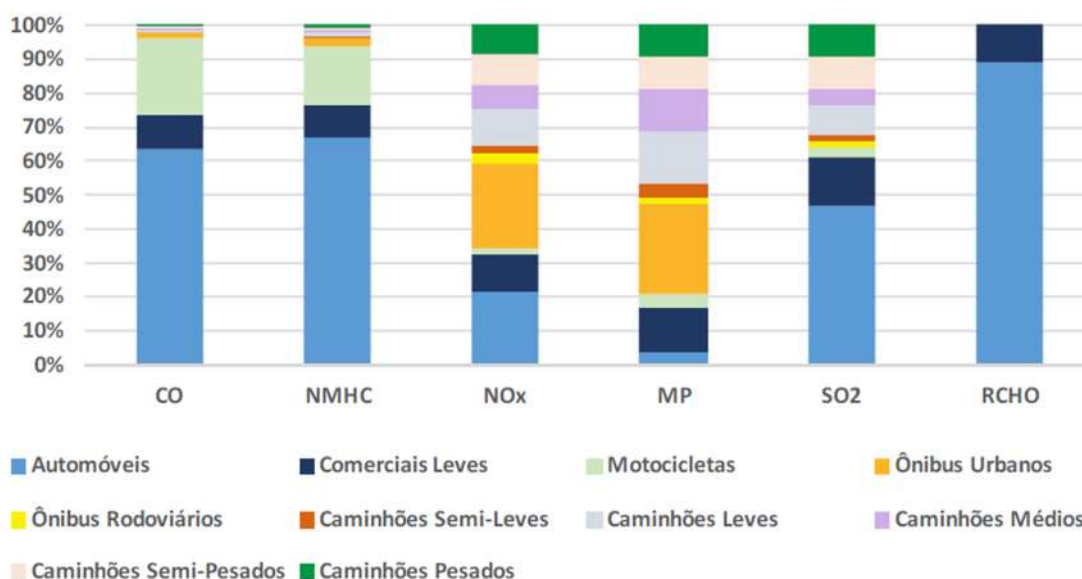


Figura 6 - Contribuição relativa de cada categoria de veículos na emissão de poluentes no estado de São Paulo em 2013.

Fonte: Adaptado CETESB (2014).

Segundo o Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo RMSP (2013), houve apenas uma ultrapassagem do padrão estadual anual de material particulado (MP) em 2013 e nenhuma do padrão diário. Partículas inaláveis finas, com tamanho menor $2,5 \mu\text{m}$ apresentaram ultrapassagens do padrão estadual diário e anual. Para o dióxido de nitrogênio (NO_2), poluente monitorado pela CETESB, e precursor do ozônio, foi observada uma ultrapassagem do padrão estadual diário e uma do padrão anual no mesmo ano. Para o ozônio, o padrão estadual de 8h foi ultrapassado em 13 dias na RMSP em 2013. Essa constatação reforça a necessidade de controle dos precursores de ozônio. No caso do SO_2 , a emissão está relacionada a presença de enxofre nos combustíveis fósseis (gasolina e diesel). A contribuição está dividida em torno de 50% entre as categorias de leves e pesados. Segundo Relatório do IBAMA (2014) as fontes móveis de poluição atmosférica mais preocupantes são em especial os veículos automotores como mostra a tabela 4. Além dos gases supracitados, têm-se os ácidos orgânicos, álcoois, aldeídos (RCHO) e material particulado (MP). Os já citados CO, CO_2 e o HC, são os gases de grande relevância, por serem responsáveis por malefícios à saúde humana.

Tabela 4 - Fontes de Poluição Atmosférica no Estado de São Paulo.

Fonte	Condutor de Poluente	Poluentes
Fontes Móveis	Veículos automotores	Material Particulado, Monóxido de Carbono, Dióxido de Carbono, Óxido de Enxofre, Óxido de Nitrogênio, Aldeídos, Hidrocarbonetos e Ácidos Orgânicos

Fonte: Adaptado IBAMA (2014).

Relatam Caiazzo *et al.* (2013) que, elevadas concentrações destas substâncias na atmosfera, sua deposição no solo, nos vegetais e nos materiais são responsáveis por danos à saúde e bem-estar da população; prejudicando a produção agrícola, as florestas, a fauna e os materiais. As problemáticas estão na alteração da acidez das águas da chuva (chuva ácida), aumento do efeito estufa, redução da camada de ozônio, redução da visibilidade, entre outras; sendo a mais preocupante os acidentes e óbitos recorrentes da prolongada exposição a esses gases, que dependendo da concentração são asfixiantes.

Os gases asfixiantes são definidos como aqueles que retiram oxigênio do ambiente. A retirada de oxigênio ocorre tanto pela diminuição da fração de oxigênio do ar inspirado, como por qualquer outro mecanismo que impeça a captação e distribuição de oxigênio pelo sistema cardiovascular. Assim, são considerados asfixiantes tanto o dióxido de carbono, que diminui a fração de oxigênio do ambiente, quanto o monóxido de carbono, cuja ligação com a hemoglobina diminui a oferta de oxigênio aos tecidos (SOUZA, 2004).

A inalação destes gases reflete no elevado número de hospitalizações e óbitos registrados anualmente, que, de acordo com o levantamento realizado por Silva *et al.* (2013), podem chegar ao número assustador de dois milhões de mortes prematuras por ano.

Os grupos mais susceptíveis aos efeitos do monóxido de carbono são as crianças, os idosos, pessoas com doenças cardíacas, respiratórias ou anemia, policiais rodoviários, agentes de trânsito e trabalhadores de ambientes confinados como oficinas mecânicas e garagens. Estes últimos estão ainda muito mais expostos, pois trabalham diariamente em contato com a exaustão dos veículos automotivos, ao realizarem testes de manutenções, ajustes e diagnósticos, durante os quais o motor precisa estar em funcionamento.

Os efeitos da poluição do ar se caracterizam tanto pela alteração de condições consideradas normais, como pelo aumento de problemas já existentes. Os efeitos podem ocorrer em nível local, regional e global, pois, de uma forma geral, origina desequilíbrios em todos os ecossistemas. As condições meteorológicas têm influência decisiva na qualidade do ar, sendo importante ter informações sobre a velocidade e a direção do vento no local monitorado. O nível de concentração no ar é medido pela quantificação das substâncias poluidoras presentes no mesmo, que por sua vez é indicada em função do número de partículas por milhão de partes de mistura (ppm) ou do peso das partículas por unidade de volume de ar, por exemplo, em miligramas por metro cúbico (mg/m^3).

2.1.2. Monóxido de Carbono (CO)

Brunetti (2012) afirma que, em condições de mistura rica (excesso de combustível), o monóxido de carbono (CO) é o produto da combustão incompleta da mistura, e, portanto, a emissão de CO é fortemente dependente da razão ar-combustível, do nível de homogeneização da mistura, do tipo do combustível utilizado (figura 7) e da categoria que o veículo se enquadra (figura 8). A concentração de CO no cilindro é alta durante a combustão, enquanto que, na subsequente fase de expansão, uma porção é oxidada formando CO_2 . Por outro lado, em condições de mistura pobre (excesso de ar), a emissão de CO é baixa e não depende da razão ar-combustível, sendo dependente da não homogeneidade na distribuição da mistura e de flutuações em sua composição entre cada ciclo.

Quanto aos seus efeitos ao ser humano, o CO possui um alto índice de toxicidade. Negri (2009) relata que o CO pode ser considerado como um antimetabólico do oxigênio.

Quando aspirado (ao nível do alvéolo pulmonar), combina-se irreversivelmente com a hemoglobina para formar a carboxihemoglobina (HbCO), resultando na redução da capacidade de transporte do oxigênio pelo sangue, podendo chegar até a ausência total de oxigênio no cérebro. O CO é inodoro, incolor e insípido, e de início não irritante às mucosas nasais, sendo por isso muito difícil às pessoas detectarem a sua presença (BOSCH, 2005). Se a inalação for prolongada, pode resultar em uma parada cardiorrespiratória, seguida de uma grave lesão cerebral e levar a pessoa ao óbito.

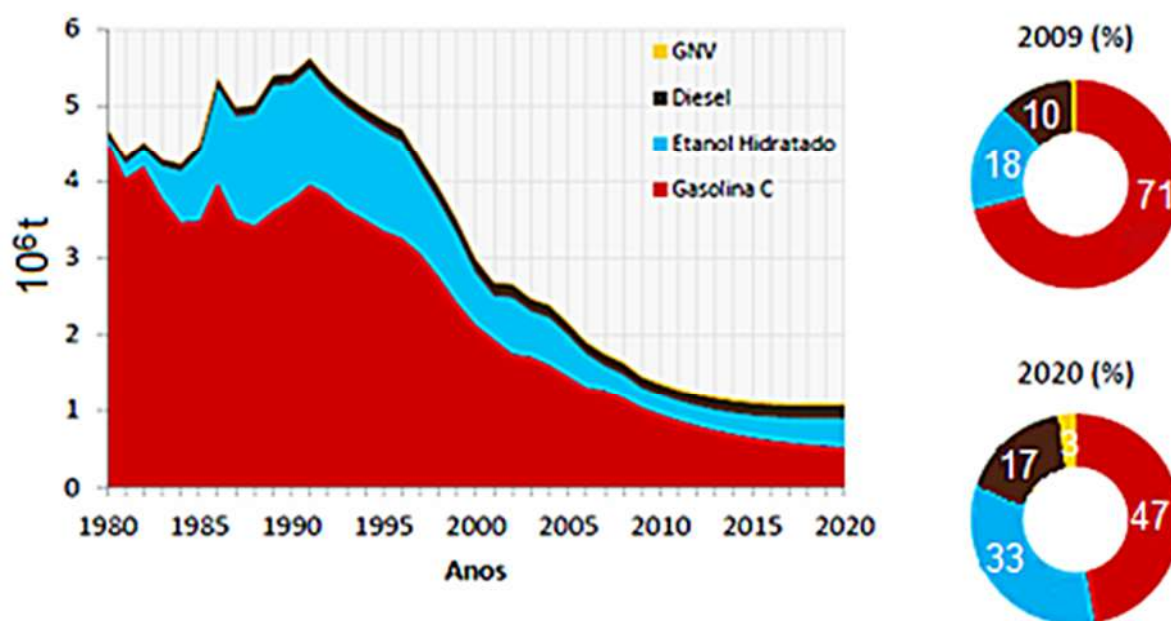


Figura 7 - Emissões de CO por tipo de combustível.

Fonte: Adaptado MMA (2014).

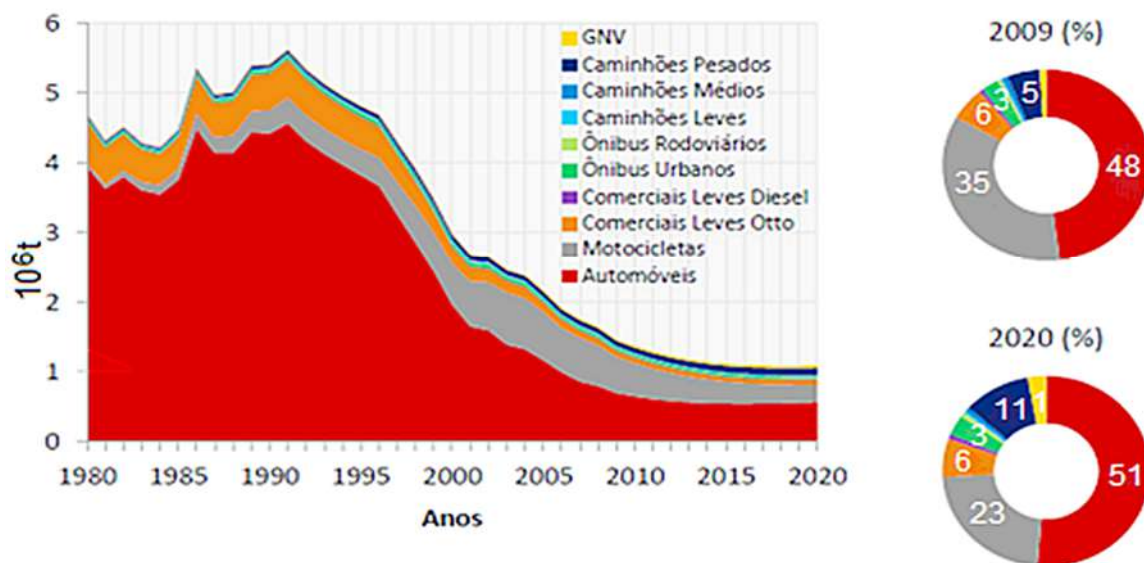


Figura 8 - Emissões Monóxido de Carbono (CO) por categoria de veículo.

Fonte: Adaptado MMA (2014).

2.1.3. Hidrocarbonetos (HC_s)

Os hidrocarbonetos têm como principais fontes de emissões os combustíveis parcialmente queimados ou não emitidos pelos veículos automotores.

Os hidrocarbonetos não queimados englobam todos aqueles que deixam a câmara de combustão sem serem oxidados, formados pela decomposição térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular, como metano, etano e acetileno. São formados na câmara onde a temperatura não é suficiente para completar a reação, ou em regiões onde a mistura é excessivamente rica ou pobre de O₂ (BRUNETTI, 2012).

Ainda de acordo com Brunetti (2012) existem estudos que mostram a geração de hidrocarbonetos não queimados em motores do ciclo Otto, em reentrâncias e cavidades formadas entre anéis, e ainda, a retenção de vapores pelo filme de óleo junto às paredes dos cilindros e sua subsequente liberação em condições de baixa temperatura na câmara, quando não serão mais oxidados. A presença de hidrocarbonetos nos gases durante o

escape, contribuem para o aparecimento de fumaça branca ou azul, sendo cerca de dez vezes menor para motores a diesel em relação a motores Otto, isso se deve ao fato dos motores do ciclo Otto operar com excesso de ar.

Brunetti (2012) afirma que alguns desses hidrocarbonetos são considerados carcinogênicos. Em exposição ao sol e aos óxidos de nitrogênio, ocorrem reações fotoquímicas que produzem oxidantes que causam irritações. Segundo Alvares Jr (2002 *apud* Schirmer, 2004), os vapores penetram nas vias respiratórias chegando até os alvéolos pulmonares onde se dissolvem no sangue, causando problemas respiratórios, inflamação nos olhos, nariz, efeitos narcóticos, mal-estar, dor de cabeça, sonolências e câncer no pulmão.

2.1. Dióxido de Carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é um dos produtos primários de qualquer combustão de hidrocarbonetos. É um gás inodoro e incolor sem efeito direto para saúde humana. Mas, segundo estudos o acúmulo deste gás na atmosfera é um dos principais responsáveis pelo fenômeno do aquecimento global. Para limitar a emissão de CO₂ o recurso é investir na redução do consumo de combustível dos motores, buscando sistemas cada vez mais eficientes em termos de eficiência térmica, mecânica e volumétrica (BRUNETTI, 2012).

2.2. Técnicas de Controle de Poluição do Ar

2.2.1. Absorção

Mais especificamente, no controle de poluição do ar, a absorção envolve a remoção de um contaminante gasoso (absorvato) de uma corrente gasosa por sua dissolução em um líquido (absorvente). A absorção é um processo de transferência de massa, que se dá devido a uma diferença de concentração entre os meios presentes. A eficiência de remoção dos gases é devida ao tempo de contato, à concentração do meio absorvente, à velocidade de reação entre o absorvente e os gases, ao coeficiente de transferência de massa. Os equipamentos utilizados na remoção de contaminantes gasosos são os absorvedores (ou

lavadores). A faixa usual de eficiência de absorvedores é de 80% a 99,7% para equipamentos adequadamente projetados (ÁLVARES Jr., 2002; KHAN e GHOSHAL, 2000).

2.2.2. Adsorção

A adsorção em sólidos, particularmente carvão ativado, tornou-se uma operação largamente utilizada nos processos de purificação de fluidos, tanto líquidos quanto gasosos (Weber, 1992). Os principais adsorventes utilizados em poluição do ar são carvão ativado, alumina ativada, nanopartículas de argilas organofílicas, peneiras moleculares e sílica gel. No caso do controle de poluição do ar, a adsorção não é um processo de tratamento final. O gás poluente é simplesmente coletado pela superfície do sólido. Os adsorvedores são extremamente efetivos na remoção de poluentes gasosos. Mesmo menores concentrações, os mesmos podem ser projetados para eficiências próximas a 100% (ÁLVARES Jr., 2002; KHAN e GHOSHAL, 2000).

O desempenho dos processos de adsorção resulta em geral a partir dos efeitos combinados de fatores termodinâmicos. Estes determinam o desempenho do processo em um limite em que o sistema se comporta idealmente, isto é, sem limitações cinéticas de transferência de massa e com a fase fluida em perfeito fluxo gasoso. As taxas e fatores termodinâmicos podem determinar a eficiência do processo. Os fatores determinantes incluem as limitações do calor e de transferência de massa, reação cinéticas e hidrodinâmicas da dispersão resultante, a partir da distribuição de velocidade em toda a mistura e difusão no espaço entre as partículas ou vazios (PERRY'S, 2008).

2.2.3. Condensação

Condensação é um método de redução de volume de um gás/vapor a um líquido. Quando uma corrente gasosa quente contata uma superfície resfriada do condensador, o calor é transferido deste vapor para a superfície fria. Com a diminuição da temperatura da corrente, ocorrerá a diminuição de energia cinética das moléculas do gás e, conseqüentemente, o volume que estas partículas ocupam. A redução na velocidade das partículas facilita o choque entre elas propiciando desta forma a condensação do líquido. Neste caso, os percentuais de eficiência na recuperação dos gases vão de 70 a 85% (KHAN e GHOSHAL, 2000). Os condensadores, geralmente associados a outro equipamento de

controle, têm sido utilizados na redução de orgânicos emitidos em indústrias petroquímicas, refino de petróleo, asfalto, indústria farmacêutica, etc. (ENGLEMAN, 2000).

2.2.4. Separação por membranas

A separação por membranas (figura 9) é uma técnica mais recente, tendo sido reportada só a partir da década de 60, quando utilizada nos processos de dessalinização. As membranas utilizadas para o controle de vapores de gases e solventes devem ser mais seletivas para vapores de hidrocarbonetos, do que para componentes do ar, tais como N_2 e O_2 . Devem também ser estáveis, tanto física quanto quimicamente. A eficiência de remoção de CO_2 supera os 90% em compostos orgânicos voláteis (DEGREVE, EVERAERT e BAYENS, 2001). A maioria das membranas são caras e raramente disponíveis, o que acaba limitando seu uso. São muito suscetíveis à sujeira, crescimento de bactérias e danos em determinadas condições de operação. Apresentam geralmente um curto tempo de vida (poucos anos) (KHAN e GHOSHAL, 2000).

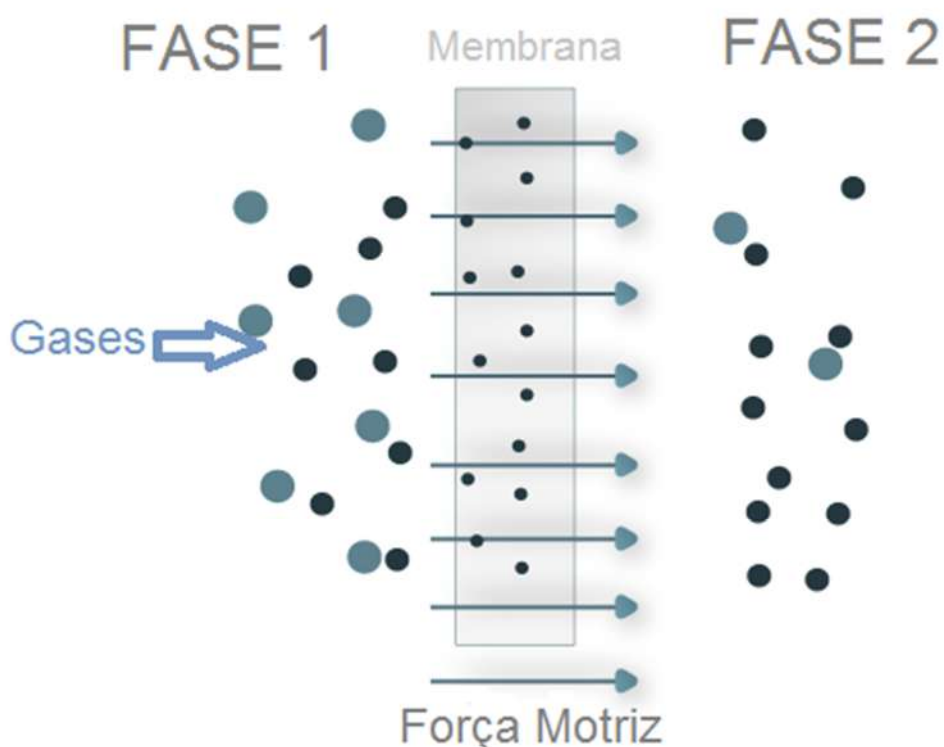


Figura 9 - Representação esquemática de separação por membrana.

Fonte: Mulder & Dordrecht (1991).

2.3. Coleta de Partículas na separação Úmida

2.3.1. Impactação Inercial de Partículas por Via Úmida

Por muitos anos foi aceita a ideia de que a habilidade de um líquido em manter contato com uma superfície sólida, era um fator determinante na separação em lavadores úmidos. Entretanto, foram realizados extensivos estudos sobre este comportamento da molhabilidade de partículas de poeira, mostrando que o efeito era secundário (HOLZER,1985). Molhabilidade maior faz com que a partícula penetre na gota imediatamente, enquanto que, as partículas que apresentam pouca molhabilidade ficam aglomeradas na superfície da gota, sendo também retidas. Assim, o problema crítico da separação úmida é o transporte das partículas até a gota.

O conhecimento científico básico é que as partículas de poeira circunscrevem a gota como resultado de sua inércia, não seguem as linhas de escoamento do gás e são parcialmente arremetidas sobre a gota. Portanto, o parâmetro mais importante a ser considerado na colisão de partículas de poeira com as gotas de líquido é a inércia. Sob sua influência, as partículas individuais se chocam com as gotas que estão em movimento ou são arremessadas para dentro da gota, em um processo denominado de colisão por impacto.

Partículas de tamanho muito reduzidos seguem o escoamento do gás em torno da gota e não se chocam com a gota. O contato de partículas pequenas com as gotas se dá por efeitos secundários, por exemplo, a partícula segue o rastro da gota. No caso de partículas muito pequenas, o mecanismo de difusão induz a uma mudança no tamanho das partículas pelo efeito da coagulação e condensação. Portanto, os mecanismos de assentamento das partículas de poeira na gota de líquido são: inercial, agarramento e difusão ou condensação. Por outro lado, como dito anteriormente, o parâmetro mais importante a ser considerado na colisão de partículas de poeira com as gotas de líquido é a inércia, por esta razão, o mecanismo de impactação ou assentamento inercial está apresentado a seguir com maiores detalhes.

2.3.2. Assentamento por Inércia

É o mecanismo realizado ao longo da passagem do fluxo de aerossol por uma série de gotas, onde algumas partículas de aerossol depositam-se sobre elas sob a forma de assentamento. A análise sobre o assentamento das partículas de aerossol sobre uma única gota considera que a gota tem a forma esférica, e que as oscilações das gotas não possuem grande influência sobre o rendimento de assentamento inercial das partículas (Warych, 1979). V_o é a velocidade de impactação inercial, D_p é o diâmetro da partícula, D_b é o diâmetro da gota de água e x é a distância entre as correntes de fluxo que impactam a gota de água, como mostra a figura 10 (PERRY'S, 2008).

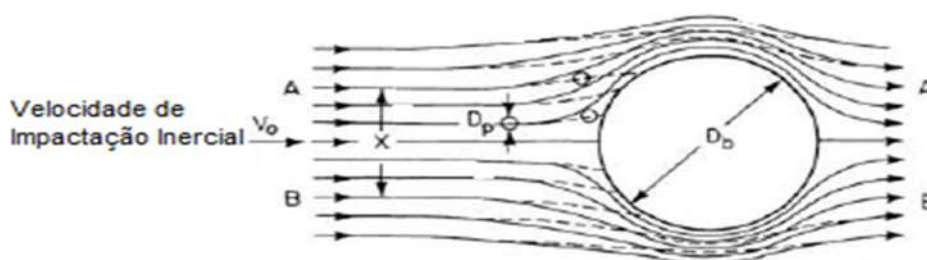


Figura 10 - Assentamentos de partículas na circunscrição da gota.

Fonte: Perry's (2008).

2.4. Lavador de Gases por Via Úmida

Lavador de gases, conforme Schirmer (2004), é um equipamento utilizado no controle de poluição do ar, cujo objetivo é remover o material particulado de um fluxo de gás, sendo projetado para purificar uma nuvem de gases antes que esta seja liberada no meio ambiente. Seu sistema de trabalho é captar os gases por captadores especiais e, enviá-los via dutos até a câmara de lavagem, que contém diversos dispositivos e acessórios para esta finalidade. Por fim, devolvem-se os gases dentro dos parâmetros da legislação ambiental para a atmosfera.

Neste equipamento, os compostos tóxicos são retidos sendo permitido a ventilação de compostos inofensivos, enquanto os tóxicos são retidos e eliminados de forma adequada.

Gonçalves (2000) observa que as partículas sólidas presentes em um fluxo de gases são coletadas através do contato direto com um líquido atomizado, geralmente a água.

Os lavadores de gases têm seu uso obrigatório por lei, em situações nas quais as pessoas trabalhem com gases potencialmente poluidores, considerando os vários modelos e aplicabilidades dos equipamentos lavadores e purificadores de gases disponíveis no mercado (WANG, 2005).

Um lavador de gás funciona da seguinte forma: um líquido, geralmente água, é introduzido no sistema de ventilação. O líquido é comumente aplicado em aerossol. As partículas de gás ficam armazenadas e reagem com outros compostos, levando as partículas para o fundo do reservatório de líquido. É comum ver uma nuvem visível, quando um lavador de gases é usado, conforme a umidade vai sendo criada.

Devido à poluição crescente, muitos países em várias regiões do mundo, têm obrigado suas empresas a desenvolver métodos eficazes e precisos de controle da poluição. Os projetos de implementação de lavadores de gases estão constantemente sob melhorias, com diversos profissionais trabalhando em novos sistemas, com o intuito de retirar as impurezas do ar. Muitos governos regulam estritamente a quantidade de poluentes a serem liberados para o ar. A utilização de lavadores de gases é uma forma de gerenciar a liberação de substâncias nocivas no ar, os gases podem ser testados, a fim de determinar se um grau suficiente de pureza foi alcançado ou não.

Na combustão de óleos e derivados, madeira ou lenha e outros tipos de combustíveis, são geradas emissões de materiais particulados e gases, tais como: óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio e em alguns casos mais específicos gases com HCl, Cl₂, HF e outros, em níveis acima do permitido pelos órgãos ambientais. Nessas situações fica evidente que o mais adequado é a utilização de equipamentos de controle via úmida para a remoção de materiais particulados e controle de gases tóxicos de forma simultânea.

2.4.1. Lavadores sem Enchimento

Lavadores sem enchimento (figura 11), são equipamentos para resfriamento do gás através da injeção direta de água de resfriamento, sendo que os lavadores deste tipo são eficientes tanto para a separação, como para o resfriamento do gás (que depende do tempo de contato das partículas com água). A velocidade do gás é pequena e não ultrapassa 1m/s, portanto, para oferecer o tempo suficiente, necessita-se de uma altura de 30 a 40 metros para o lavador. Em função disso, pode-se obter resfriamento do gás acima de 100°C, com separação simultânea e eficiência da ordem de 50 a 80 %. A perda de pressão causada pela passagem de gás pelo lavador é pequena, ou seja, da ordem de 10 a 300 N/m². A desvantagem deste lavador é o elevado consumo de água, que pode ser acima de 6 L/m³ (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).

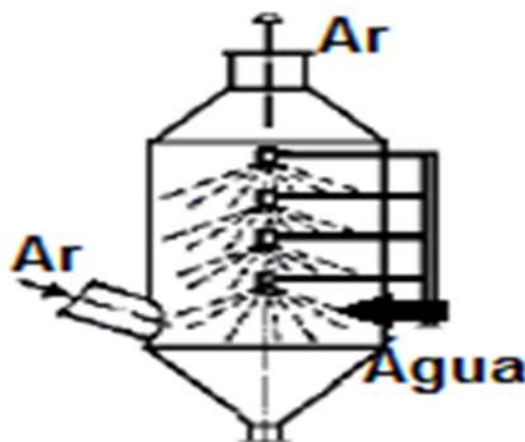


Figura 11 - Lavador sem enchimento.

Fonte: Judá e Nowicki (1979).

2.4.2. Lavadores com Enchimento

A construção deste tipo de equipamento é semelhante à dos lavadores sem enchimento, com uma camada adicional de filtração. O esquema deste tipo de lavador está apresentado pela figura 12.

Sobre a grelha ou tela de chapa perfurada, é colocado o elemento de filtração, que poderão ser anéis de *Raching* ou outros elementos de porcelana ou plástico. O gás é introduzido por baixo e conduzido pelo recheio continuamente umidificado pela água que passa pelos separadores de gotas e, em seguida, para o ambiente. A velocidade de passagem do gás por este lavador é de 1 a 1,5 m/s, com um consumo de água de 1 a 20 L/m³. Este tipo de lavador trabalha bem para partículas de trituração mecânica (maiores que 1µm). O rendimento está na faixa de 80 a 95 % com perdas de pressão de 100 a 500 N/m². O fluxo da passagem de gás é de 5000, 13000 e 19000 m³/hora, com consumo de água de 1 a 4 L/m³ (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).

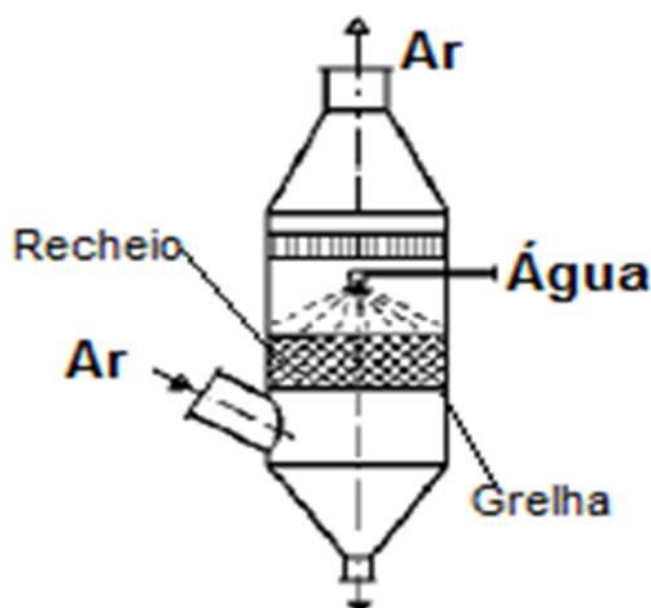


Figura 12 - Lavadores com enchimento.

Fonte: Judá e Nowicki (1979).

2.4.3. Lavador tipo torre

A torre do lavador é composta por uma série de elementos direcionadores dispostos sequencialmente (figura 13). O gás é fornecido tangencialmente abaixo da torre e tem a sua saída na região superior, passando através do lavador. Este lavador trabalha com gases a uma vazão de 1800 a 36.000 m³/hora e com perda de pressão de 600 a 1500 N/m², o que significa um consumo de potência de 1 a 75 kW. Consome uma notável quantidade de água, isto é, 25 l/m³ de gás, operando em circuito fechado. Para partículas de trituração mecânica o rendimento de separação das partículas chega a 98% (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).

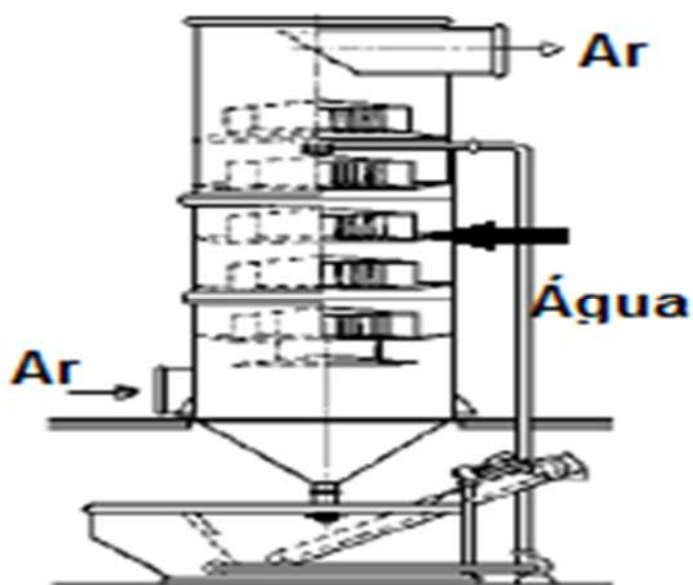


Figura 13 - Lavador tipo torre.

Fonte: Judá e Nowicki (1979).

2.4.4. Lavador com Leito Fluidizado

Um lavador de torre especial é o de leito fluidizado (figura 14). O leito é composto por esferas leves de diâmetro 30 a 40 mm, sustentados pelo gás fluindo de baixo para cima. Estas esferas têm movimento irregular e quando umidificadas oferecem maior área de contato com as partículas carregadas pelo gás. O lavador possui duas seções de esferas de diâmetro 38 mm. Na parte superior é localizado o separador de gotas rotativo. A velocidade do gás é de 2,5 a 5 m/s, com o consumo de água é de 0,1 a 1 L/m³ de gás. Estes separadores são construídos para fluxo de gás de 5000 a 25.000 m³/h e tem perda de pressão na ordem de 700 a 1000 N/m². Com rendimento de separação é de 90 a 99 % (JUDÁ, J.; NOWICKI, M.,1979).

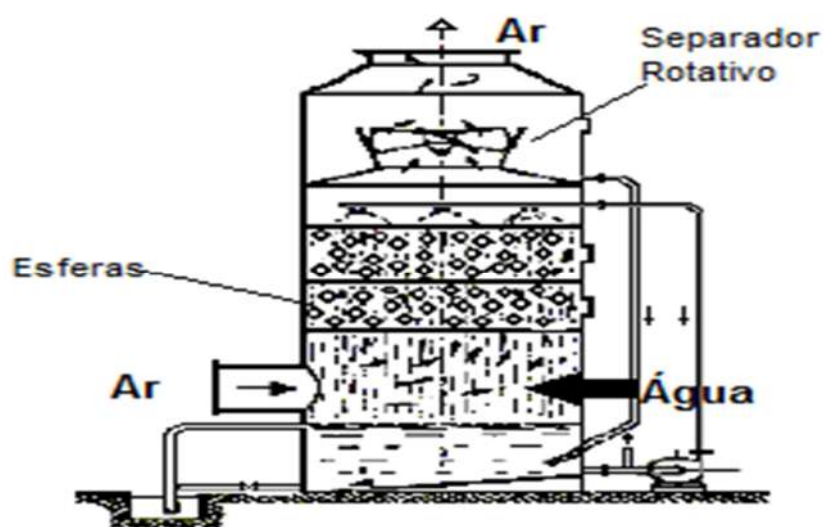


Figura 14 - Lavador com leito fluidizado.

Fonte: Juda e Nowicki (1979).

2.4.5. Lavador Roto Clone N

Os equipamentos roto apresentam construção simples e compacta. Na figura 15 é apresentado o mais popular lavador com labirinto denominado Roto Clone tipo N da firma *American Air Filtre (AAF)*.

Este lavador é construído para vazões de 1.500 a 89.000m³/h de ar, para perdas de pressão de 1.300 a 1.600N/m². O consumo de água é notavelmente pequeno, podendo chegar até 0,03 L/m³ de gás. A concentração de poluente na entrada do lavador pode ser de até 40 g/m³. O rendimento do lavador não é alterado com as mudanças de vazão de gás na faixa de 60 a 110 % da vazão nominal e a eficiência é de 90% para as partículas de 1 µm e quase 100 % para as partículas de 8 µm. O consumo de água padrão é de 0,01dm³/m³ de gás. Os lavadores deste tipo são equipados com sistemas para a limpeza mecânica dos materiais depositados. Conclui-se que os lavadores com labirintos inundados são de boa eficiência, de construção simples, de pequeno consumo de água podendo inclusive, reter partículas não umidificadas (STRAUSS, 1979).

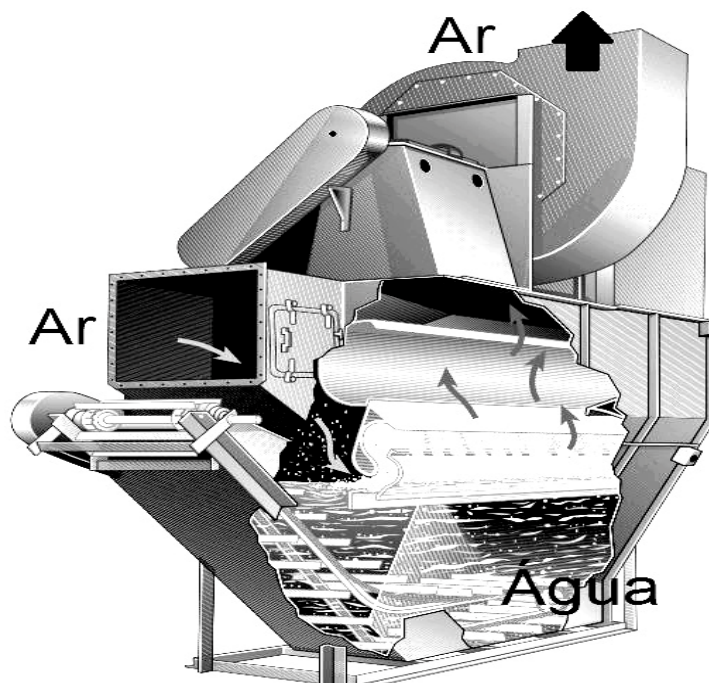


Figura 15 - Lavador Roto – Clone tipo N.

Fonte: Strauss (1979).

2.4.6. Lavador Rotativo Vertical

O exemplo clássico de um lavador rotativo vertical é apresentado na figura 16. No eixo vertical são instalados, em três níveis, discos cônicos de chapa, sendo que, o externo é de chapa perfurada. Com o movimento rotativo, a água é pulverizada no ambiente do gás retendo a partícula e, também, absorvendo gases tóxicos. Na parte superior tem-se uma camada de material granulado ou elementos de *Rasching*. Este tipo de lavador é pouco usado, devido a seu elevado custo de operação (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).

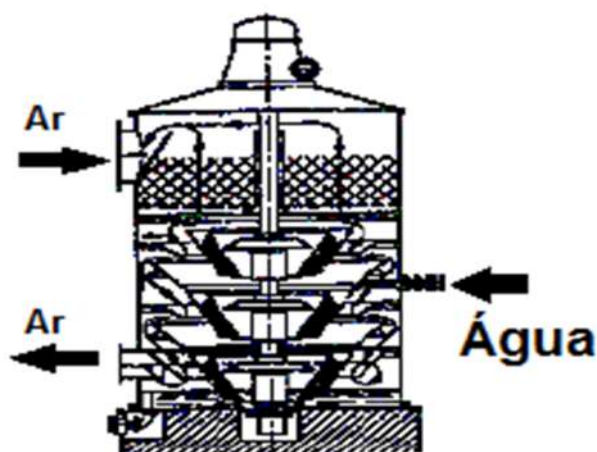


Figura 16 - Lavador rotativo vertical.

Fonte: Juda e Nowicki (1979).

2.4.7. Lavador Roto Clone

A figura 17 mostra um lavador roto clone, observa-se que ele também, a função de ventilador. A pressão de insuflamento varia de 500 a 2250 N/m², com velocidade de entrada de 15 a 25 m/s. E consumo de água é de 0,15 dm³/m³. O consumo de energia elétrica é de 0,6 a 2,0 kWh/1000 m³ de gás. Os lavadores deste tipo são construídos para vazões de 0,415 a 23,6m³/s, isto é, 1.550 a 85.000 m³/h. E as vantagens de utilização são: a elevada retenção das partículas menores do que 1 µm de difícil umidificação e a compacidade. No entanto têm a sua desvantagem do elevado consumo de energia elétrica e necessidade de manutenção frequente (PERRY'S, 2008).

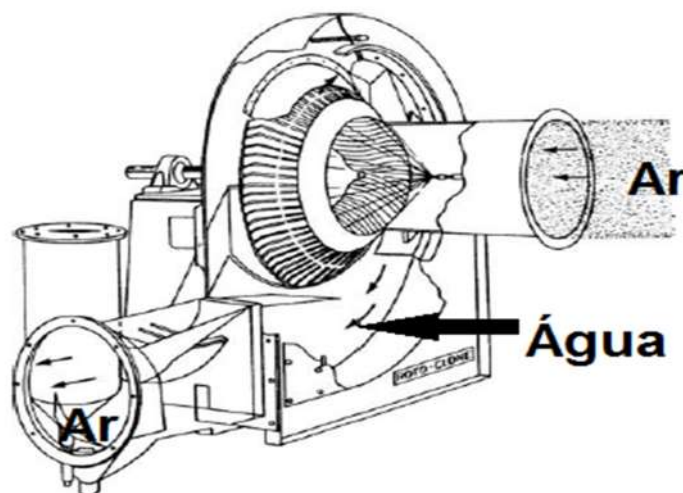


Figura 17 - Vista geral do lavador Roto Clone.

Fonte: Perry's (2008).

2.4.7. Lavadores de fluxo ciclônico úmido

Observa-se que os lavadores de fluxo ciclônicos são construídos como torres (figura 18), com a passagem de gás com fluxo ciclônico, e pulverizadores que podem ser instalados na entrada do gás, nas paredes coletoras ou na parede central. O gás é introduzido pela parte inferior do lavador. Os bicos pulverizadores são instalados no tubo central pelo qual é conduzida a água. A pressão da água é de 0,5 a 1,0 N/m² obtendo as gotículas de água de 25 a 50 µm. As partículas são depositadas na parede do aparelho, coletadas e conduzidas para o devido tratamento. A entrada de gás é controlada pelo bocal de ar e a velocidade pode ser de 7 a 25 m/s. O consumo de água é de 0,7 a 1,4 l/m³ com perda de carga da ordem de 500 a 1000 N/m². A eficiência para partículas de trituração mecânica é de 95 a 99 % (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).

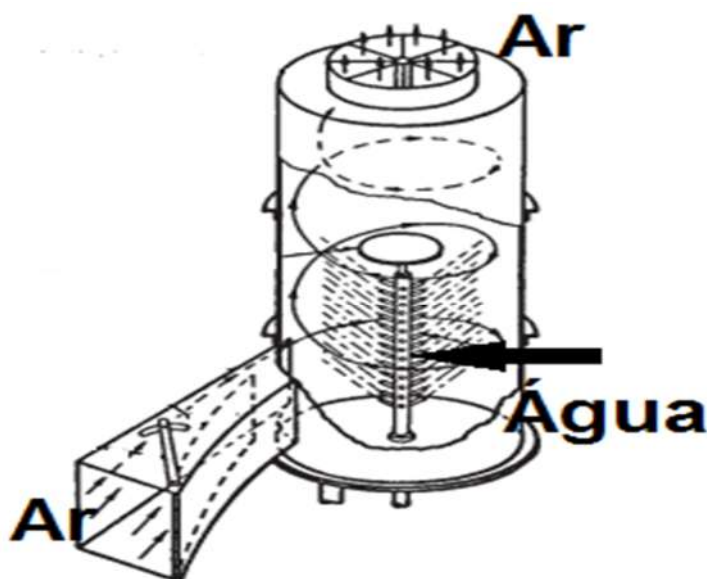


Figura 18 - Lavador de fluxo ciclônico úmido.

Fonte: Judá e Nowicki (1979).

2.4.9. Lavador por Borbulhamento

Quando o gás é soprado com elevada velocidade sobre o espelho d'água (figura 19), formam-se uma quantidade de bolhas que capturam as partículas ocorrendo assim, a separação. A figura 20 mostra um fluxo formando uma camada de bolhas de altura definida. Este fenômeno, de acordo com Wang *et al.* (2005) é aproveitado para a separação de gases industriais nos lavadores de colisão, de espumas e nos lavadores com labirintos isolados com água conforme demonstrado na figura 19. O gás poluído é introduzido em um duto na forma de injetor e colide com a superfície de água localizada logo na saída. Esta água é turbilhonada formando uma espuma. Então as partículas do poluente são retiradas do gás devido à força de inércia formada pela rápida mudança de direção de gás. A velocidade aplicada nos lavadores de borbulhamento está entre 30 e 70 m/s com perda de carga entre 1.500 a 4.250 N/m². O consumo de água pelo lavador é de 0,3 a 0,5 litros/m³ de gás (JUDÁ, J.; NOWICKI, M., 1979).

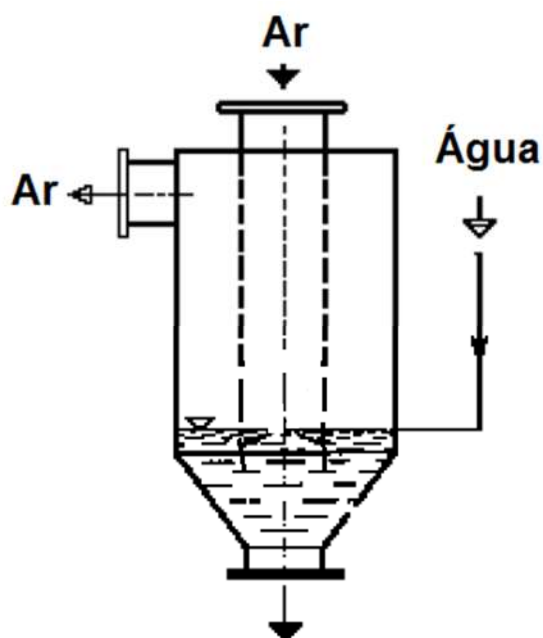


Figura 19 - Lavadores de borbulhagem.

Fonte: Juda e Nowicki (1979).

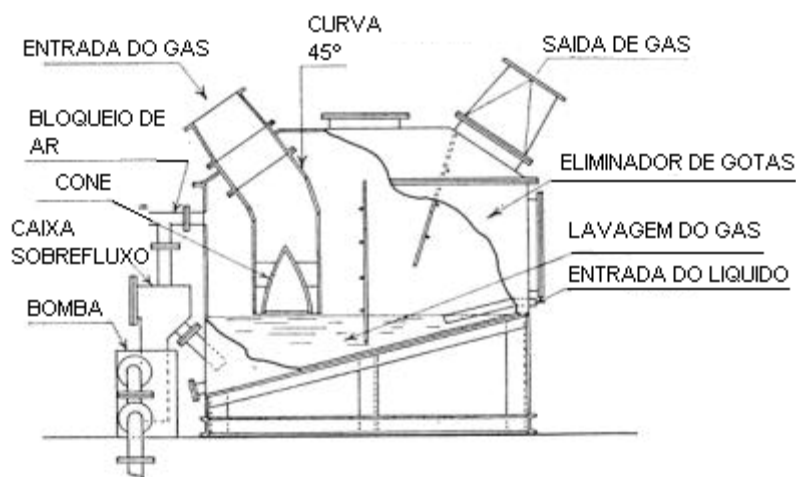


Figura 20 - Esquema do funcionamento de um lavador por borbulhamento (Doyle).

Fonte: WANG et al. (2005).

2.5. Considerações Finais

As Oficinas Mecânicas são locais confinados cuja ventilação existente é insuficiente para remover contaminantes. Essa descrição de local confinado é encontrada na NR-33 do ano 2012, que enquadra às oficinas mecânicas, e salas de ensaio dinamométrico, que muitas vezes têm a necessidade de recorrer a exaustores e ventiladores para diluir os gases poluentes do meio. Porém, ocorre apenas a transferência do problema, pois ainda estaria descartando esses gases à atmosfera, gerando poluições e eventuais incômodos a vizinhança. O fato de lavadores de gases serem uma tecnologia longamente explorada no tratamento de efluentes gasosos e de terem seus mecanismos de reação e funcionamento definidos foi um fator determinante para a escolha da técnica para o estudo de redução da emissão de poluentes em ambientes confinados.

Esta revisão citada apresentou o embasamento teórico e bibliográfico que auxiliou no desenvolvimento do presente trabalho de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Santa Cecília (UNISANTA). O tema trata do estudo, projeto, construção e testes de um dispositivo de captação e tratamento dos gases liberados pelos escapamentos de veículos automotores em ambientes confinados, assunto este, de grande relevância científica e social.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para determinação da quantidade de gases emitidos pelo motor do ciclo Otto estudado neste trabalho foram realizados três experimentos com características e configurações de montagem diferentes. O primeiro experimento determinou as quantidades de poluentes CO, CO₂ e HC_s medidos diretamente do escapamento do veículo. O segundo experimento já com o dispositivo DLGO conectado ao escapamento do veículo quantificou os poluentes CO, CO₂ e HCs emitidos após a lavagem por borbulhamento no dispositivo. O terceiro experimento realizou o monitoramento da saturação dos gases expelidos (CO, CO₂ e HCs) na água interna ao dispositivo DLGO, durante intervalos de tempo predeterminados.

Os testes foram realizados na Oficina Stilomatic, cidade de Santos, no dia 29 de abril de 2014 às 16:00hs e reproduzidos em 11 de dezembro de 2014 as 14:00 hs. A empresa é especializada em injeção eletrônica de combustível em motores de combustão interna automotivos abastecidos com gasolina, álcool e diesel, sendo credenciada pelo SINDIREPA-SP para a realização de testes de inspeção veicular.

3.1. PRIMEIRO EXPERIMENTO SEM O DISPOSITIVO DLGO

3.1.1. Equipamentos e Instrumentos

O sistema experimental desenvolvido para determinar as quantidades de poluentes que são emitidos para o espaço confinado (oficina mecânica) é constituído de um analisador de gases, provenientes da combustão do motor de um veículo do ciclo Otto, com monitoramento por *scanner* computacional das condições de operação do motor, garantindo sua normalidade durante todo o teste. Os gases analisados foram: hidrocarbonetos (HCs), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂).

3.1.1.1. Analisador de Gases

A parte experimental desse trabalho foi realizada com um equipamento denominado analisador de gases, modelo PC Multigás (figura 21), fabricado pela empresa NAPRO (Núcleo de Análise Profissional), com medidas de concentração, dados técnicos e escalas: CO: 0 - 15%, CO₂: 0 - 20%, HC_s: 0 - 20000ppm (Hexano), O₂: 0 - 25%, NO_x Opcional: 0 - 5000 ppm, Lambda: 0 - 9.99 (classificações das leituras de infravermelho) e AFR: 0 - 99.99, e relação ar por combustível de 1,3. Homologado de acordo com as especificações baseadas na Portaria Inmetro n.º 155, de 12 de agosto de 2005, a qual prescreve e estabelecem as condições técnicas e metrológicas essenciais a que se devem atender os instrumentos de medição de gases de exaustão de veículos com motores do ciclo Otto. O equipamento também atende às normas internacionais OIML R99 CLASS I, ISO 3930 e ASM/BAR 97.



Figura 21 - Analisador de Gases PC Multigás NAPRO.

3.1.1.2. Scanner Automotivo

Para monitorar o motor do ciclo Otto durante o experimento utilizou-se o *Scanner Tecnomotor 2* automotivo TM 531 - *Rasther II* com Leitor de códigos de falhas, detector de falhas no motor ciclo Otto, temperatura do motor, pressão de operação, rotação do motor e tensão de operação do motor (Figura 22).



Figura 22 - Scanner automotivo Tecnomotor TM 531.

3.1.1.3. Sonda para Coleta de Gases Ciclo Otto

Para coleta de gases diretamente no escapamento, foi utilizada a sonda tipo gatilho (figura 23) com mangueira e filtro eliminador de umidade.



Figura 23 - Sonda de coleta de gases tipo gatilho NAPRO.

3.1.2. Método do Experimento sem o DLGO

Todo o teste neste primeiro experimento foi monitorado pelo scanner automotivo Tecnomotor 2 automotivo TM 531 para analisar a normalidade do funcionamento do motor a temperatura de 98 °C, pressão de operação 534 mbar, rotação do motor 882 rpm e tensão 11,6 V.

O teste foi realizado no veículo sem a instalação do DLGO (figura 25), a fim de coletar os dados das emissões do veículo sem o tratamento dos gases.

O método como observado pelas normalizações supracitadas, exige a completa a completa descontaminação do equipamento. Retirando-se a mangueira de entrada da sonda, o programa do equipamento solicita a retomada da posição inicial da mangueira conectando-a ao analisador, antes da realização do primeiro experimento. Após a sua descontaminação total, deve-se certificar que o motor encontra-se na temperatura adequada próximo a 98 °C (temperatura normal de operação), em seguida, verifica-se a rotação do sensor 882 rpm (marcha lenta). Uma vez realizado esse procedimento, insere-se a sonda no escapamento (figura 24) para iniciar as medições de CO, CO₂ e HCs pelo equipamento. Lembrando que este procedimento só pode ser efetuado com exatidão, se o sistema de exaustão dos gases do veículo, encontrar-se em perfeitas condições de uso.



Figura 24 - Sonda do Analisador de Gases conectado diretamente no veículo.

O programa de interface do PC Multigás (NAPRO) orienta detalhadamente sua correta utilização durante todo o processo de análise de gases, ditando cada passo a ser seguido pelo operador do equipamento, e indicando o momento exato que o responsável pelo teste deve alterar a rotação do motor (primeiramente para 2500 rpm e posteriormente para 882 rpm). Ao final, o sistema plota na tela os dados obtidos com a leitura.

Os testes foram realizados com o veículo parado, suspenso em um elevador automotivo a uma altura de 1,20m, que facilitaram a maneabilidade dos testes, porém acelerando o veículo conforme solicitação do programa de *software*, em diferentes rotações.

Os experimentos tiveram a duração de 30 minutos, tempo suficiente para diagnosticar e realizar reparos em um automóvel dentro de uma oficina mecânica.

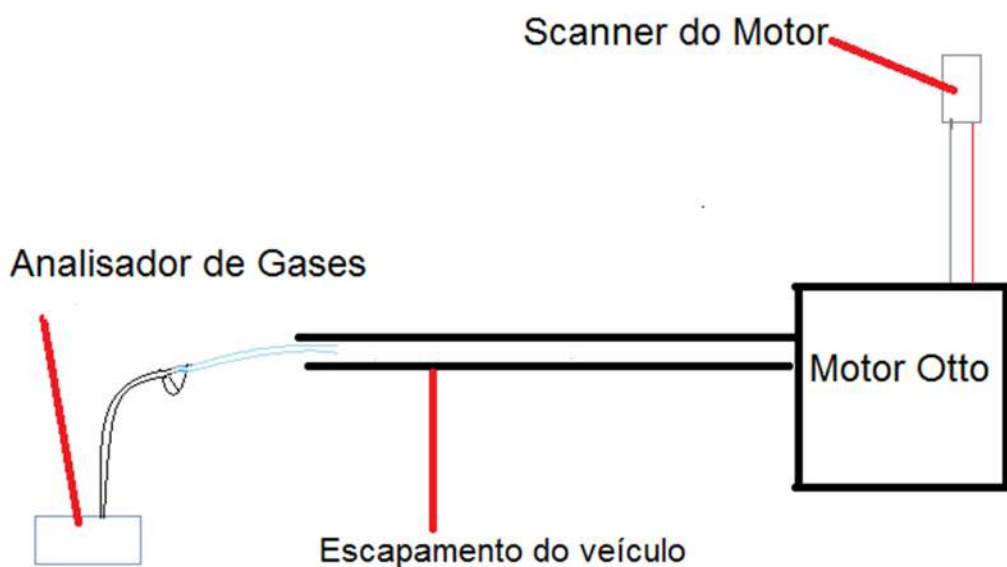


Figura 25 - Esquema da primeira montagem com o monitoramento dos gases conectando a sonda diretamente no veículo.

3.2. SEGUNDO EXPERIMENTO COM O DLGO

3.2.1. Equipamentos e instrumentos

O sistema experimental foi desenvolvido para determinar as quantidades de poluentes após a lavagem por borbulhamento pelo Dispositivo de Lavagem de Gases do Ciclo Otto (DLGO), dos gases provenientes da combustão do motor de um veículo do ciclo Otto, constituindo-se de um recipiente para borbulhamento e lavagem dos gases, tubulação para conectar o dispositivo ao escapamento do veículo, analisador de gases e monitoramento por *scanner* computacional para o acompanhamento das condições de operação do motor.

3.2.1.1. Tubulação do dispositivo DLGO

Para fabricação da tubulação do dispositivo foi utilizado um tubo de aço carbono SAE 1012 conformado a frio com costura e perfil de seção circular, de acordo com a norma NBR 8261, com 1500 mm de comprimento e diâmetro interno de 45 mm tubo este fabricado especialmente para ser utilizado em sistemas de escapamentos automotivos.

3.2.1.2. Máquina Hidráulica para curvar tubos

A figura 26 mostra uma máquina hidráulica industrial, curvadeira de escapamentos modelo VAN / Industrial, motor trifásico de 3 hp, bomba de 100bar, para tubos diâmetro de 3/4 até 2", espessura de parede de 1,5mm até 2.25mm e curva até 180°.



Figura 26 - Máquina hidráulica para curvar tubos.

3.2.1.3. Reservatório de água do DLGO

Para o reservatório (leito de borbulhamento), recorreu-se a reutilização de um recipiente de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com volume de 50 litros, conhecido popularmente como “bombona”, da marca GOODMAN, muito utilizado para envasamento de produtos químicos, materiais de limpeza, etc. O reservatório atende aos requisitos do projeto inicial, aproximando-se tanto do volume, quanto da altura 600 mm (figura 27 A), maneabilidade e abertura de bocal com valor próximo ao do diâmetro externo do tubo, conforme a figura 27 B, não havendo a necessidade de grandes ajustes.



Figura 27 - A) Reservatório do DLGO, feito de bombona reutilizada. B) Detalhe do bocal de entrada do reservatório.

3.2.1.4. Abraçadeira de fixação da tubulação do DLGO

Para que não houvesse vazamentos de gases em sua emenda de conexão e nem tão pouco danos ao sistema do escapamento do veículo em teste, foi utilizada uma abraçadeira regulável de união de tubos de escapamento como demonstrado na figura 28. A abraçadeira regulável de diâmetro de 60 mm é regulável para que fosse possível a fixação do tubo que liga a saída do dispositivo ao escapamento do veículo.



Figura 28 - Abraçadeira de conexão para tubos de escapamento.

3.2.1.5. Anemômetro digital

Para medir a velocidade dos gases de saída do escapamento do motor ciclo Otto foi utilizado um aparelho anemômetro digital modelo e marca, AM-4201 Luton (figura 29).



Figura 29 - Anemômetro digital AM-4201 Luton.

3.2.1.6. Cronômetro digital

Para o acompanhamento do tempo dos experimentos utilizou-se um cronômetro digital, modelo SW 2018 CRONOBIO (figura 30).



Figura 30 - Cronômetro digital.

3.2.2. Método do Experimento com o DLGO

O método para determinar experimentalmente a eficiência do Dispositivo de Lavagem de Gases do Ciclo Otto (DLGO) baseou-se no conceito de funcionamento de um lavador de gases por borbulhamento do tipo Doyle. Por tanto foi realizada a medição da velocidade dos gases de saída do escapamento em marcha lenta e rotação 882 rpm, sendo de 5,6 m/s. O equipamento foi projetado a princípio, para operar com 30 litros de água, peso aproximado de 30 kg, o que é a metade do peso permitido por lei, art. 198 da Consolidação das Leis do Trabalho que um trabalhador pode transportar individualmente SENADO FEDERAL (2005), tornando sua movimentação e utilização viável em oficinas mecânicas, sendo o volume de água suficiente para conseguirmos alcançar os resultados esperados de absorver os poluentes emitidos pelos motores de combustão interna. O experimento teve a duração de 30 minutos, tempo este suficiente para diagnosticar e realizar reparos em um automóvel dentro de uma oficina mecânica.

Ao sistema experimental desenvolvido para determinação da quantidade de poluentes emitidos pelo motor ciclo Otto (CO, CO₂ e HCs) foi acoplado o analisador de gases e *scanner* automotivo, com suas respectivas interfaces computacionais.

Tomou-se o cuidado neste experimento de evitar a fuga de gases antes de passarem pelo analisador, aumentando assim a confiabilidade nos testes realizados, sendo que todo o fluxo de poluente emitido pelo motor foi analisado.

Antes de iniciar os testes foi necessário que a tubulação de aço carbono SAE 1012, 1500 mm de comprimento e diâmetro interno de 45 mm, que conecta o escapamento ao dispositivo fosse dobrada com uma curvadeira industrial, em um ângulo de 90°, para que não ocorresse danos ao sistema e escapamento do veículo durante a sua instalação (figura 31).



Figura 31 - Tubulação dobrada em ângulo de 90 ° para melhor aporte do contato entre o dispositivo e o escapamento veicular.

Por ser um protótipo, seu projeto foi simplificado a uma tubulação de entrada de 45mm de diâmetro, em que foi conectado o escapamento do veículo testado do reservatório com leito de borbulhamento, onde simultaneamente os gases serão lavados e direcionados para o duto de descarga, com a liberação das emissões (figura 32).

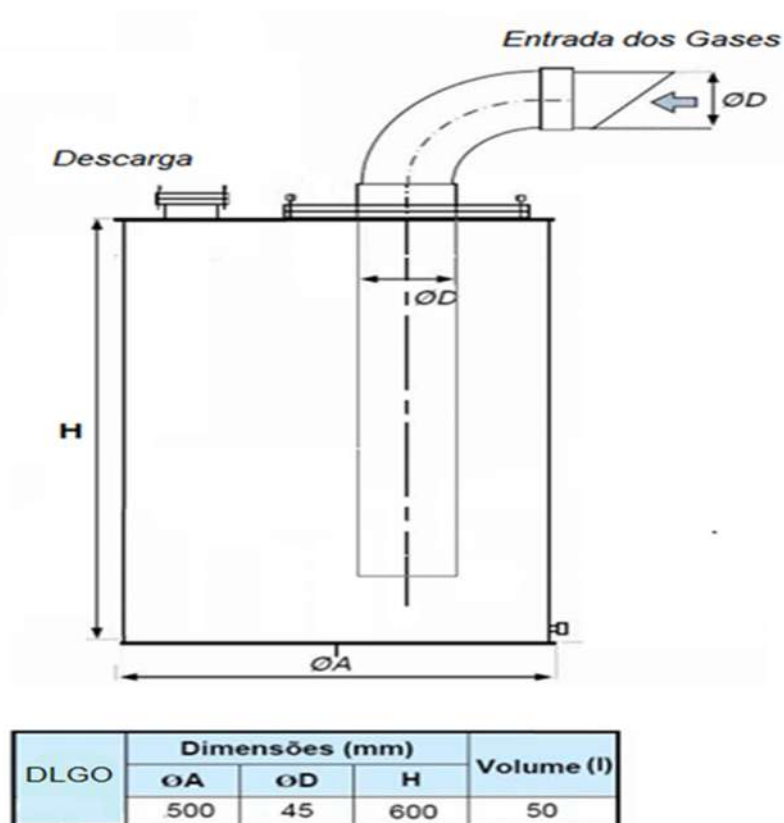


Figura 32 – Croqui do dispositivo DLGO.

Para a realização do segundo experimento será necessário que todas as etapas do primeiro experimento sejam realizadas, com a completa descontaminação do equipamento e conexão ao analisador até que o motor estabeleça a temperatura adequada entre 95°C e 98 °C (temperatura normal de operação) e posteriormente o monitoramento do sensor de rotação 882 rpm em marcha lenta, repetidas rigorosamente. A temperatura do motor deverá ser mantida em 98 °C, pressão de operação do motor 534 mbar, rotação do motor a 882 rpm e tensão 11,6 V, tomando-se o devido cuidado para manter os mesmos parâmetros de funcionamento do motor da primeira experiência (figura 33). Uma vez realizado esse procedimento, insere-se a sonda no Dispositivo de Lavagem de Gases do Ciclo Otto (DLGO) (figura 34) para iniciar a medições de (CO, CO₂ e HCs) pelo equipamento e conectando-se a outra saída do dispositivo ao escapamento do motor de ciclo Otto (figura 35). Lembrando

que este procedimento é monitorado pelo *scanner* automotivo, para analisar a normalidade do funcionamento do motor.



Figura 33 – Interface do programa *scanner* Tecnomotor monitorando o motor durante os experimentos.

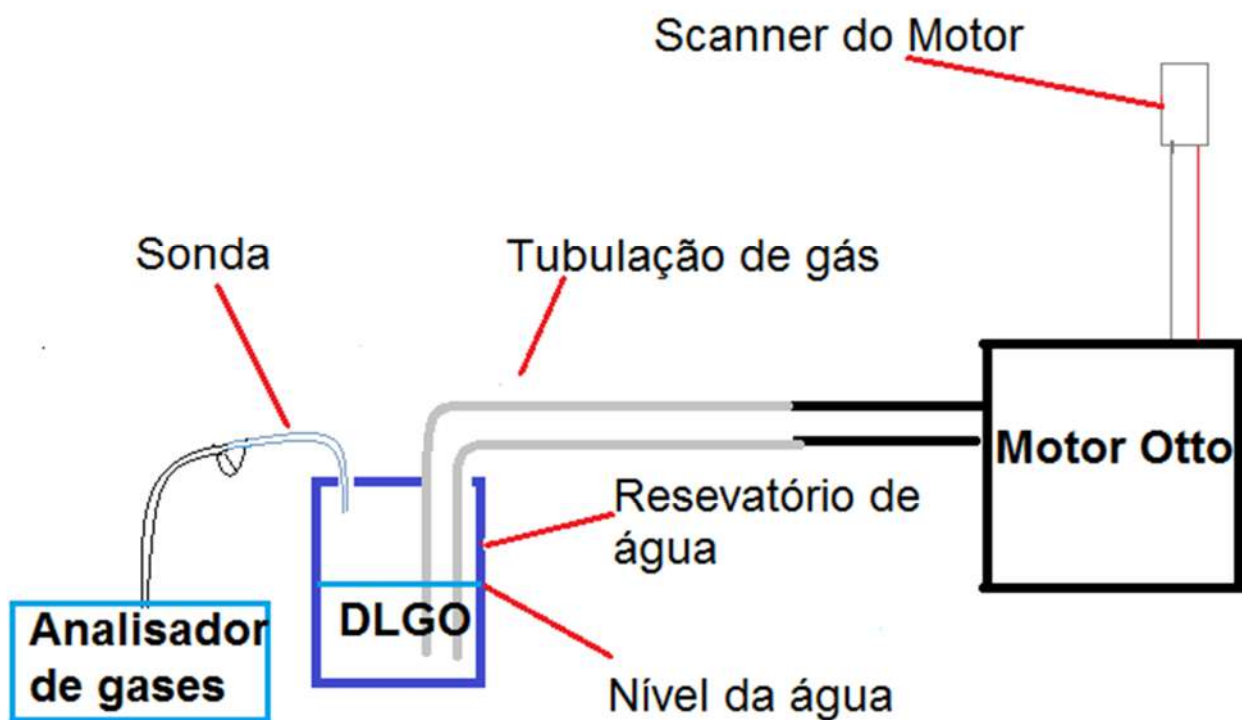


Figura 34 - Esquema de montagem da segunda experiência com monitoramento dos gases, por conexão da sonda na saída do dispositivo DLGO.



Figura 35 - Sonda do Analisador de Gases, instalado na descarga do DLGO.

3.3. Terceiro Experimento: análise da saturação da água com o DLGO

3.3.1. Equipamentos e instrumentos

Neste terceiro experimento foram utilizados o analisador de gases NAPRO e *scanner* automotivo, ambos conectados ao Dispositivo de Lavagem do Ciclo Otto DLGO, e ainda, todos os equipamentos e instrumentos relacionados no segundo experimento.

3.3.2. Saturação da água do DLGO

Logo após a realização das medições das emissões dos poluentes com o auxílio do analisador de gases, a análise de saturação da água no reservatório do dispositivo DLGO (30 litros) se torna crucial para determinar qual é tempo ideal de operação do dispositivo sem a realização da troca de água e sua eficácia efetiva em relação ao tempo, quantificando com isso a redução dos gases (CO , CO_2 e HC_s) que foram emitidos para o ar respirável da oficina mecânica, durante o tempo de funcionamento do DLGO.

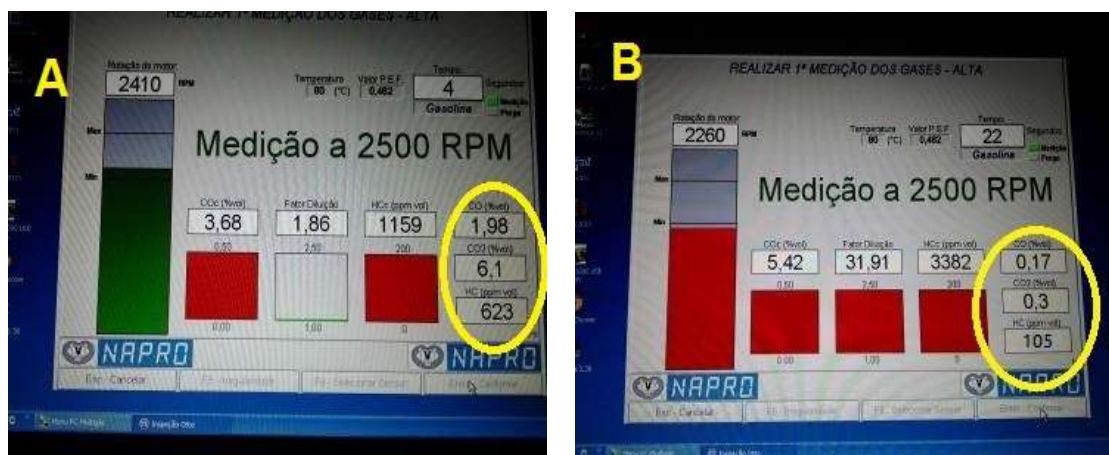
Antes de realizar os experimentos de saturação da água que podem maximizar os dados deste estudo e otimizar todo o processo foi de extrema importância o acompanhamento de três oficinas mecânicas de médio porte: Centro Automotivo Ademar, Oficina Stilomatic e Oficina Mecânica São Judas. Os ensaios foram realizados durante o período de 13 junho de 2013 a 13 junho de 2014 onde foi verificado o tempo médio de 10 veículos em cada oficina, tempo em que um motor de ciclo Otto fica em operação para manutenção em um ambiente confinado. O tempo estimado para as três oficinas foi de 30 minutos, suficiente para diagnosticar e realizar reparos em um automóvel.

Tabela 5 - Tempo médio de funcionamento do motor para manutenção em oficinas mecânicas.

Oficinas Mecânicas	Carros com ciclo Otto em manutenção /dia	Média do tempo minutos de funcionamento do motor com ciclo Otto para manutenção em oficinas mecânicas por carro.	
Ademar	10	32	
Stilomatic	10	29	
São Judas	10	28	
Média dos tempos Otto para manutenção			30 min.

O terceiro experimento parte do tempo de operação do segundo experimento, ou seja, com o dispositivo há 30 minutos de operação, sendo realizadas 6 tomadas de medições de 10 em 10 minutos, totalizando 60 minutos, com tempo total do experimento de 1h:30 minutos.

Foram então, realizadas as leituras das emissões de CO, CO₂ e HCs no bocal de saída do dispositivo. A figura 36 mostra um exemplo da tela de interface do analisador.

**Figura 36** - Reprodução da tela de interface do analisador mostrando A) antes e B) após a instalação do DLGO.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Primeiro experimento sem o dispositivo DLGO

Os resultados obtidos pelo analisador de gases com o tempo de operação do motor de 30 minutos foram, 623 (ppm vol) de Hidrocarbonetos (HC_s), 1,98 (% vol) de Monóxido de Carbono (CO) e 6,1 (% vol) de Dióxido de Carbono (CO_2) como mostra a figura 36(A). Gases estes que são emitidos para o ambiente confinado (oficina mecânica).

4.2. Segundo experimento com o dispositivo DLGO

A tabela 6 apresenta a comparação das medições gasosas captadas pelo analisador de gases. O segundo experimento, foi operado com 30 litros de água como fluido absorvente e tempo de operação do motor de 30 minutos. Os resultados dos índices de emissões foram: 105 ppm vol de Hidrocarbonetos (HC_s), 0,17 % vol de Monóxido de Carbono (CO) e 0,3 % vol de Dióxido de Carbono (CO_2) como mostra a figura 36 (B). A redução efetiva de 83,14% do índice de emissões de HC, 91,41% para o CO e 95,08% para o CO_2 . A redução dos índices de poluentes comprova a eficácia do dispositivo (figura 37).

Tabela 6 – Comparação das medições dos gases no 1º experimento (sem o DLGO) e 2º experimento (com o DLGO) em rotações próximas a 2500 rpm.

Gases	1º Experimento Sem o DLGO	2º Experimento Com o DLGO	% de Redução
HC_s (ppm vol)	623	105	83,14
CO (% vol)	1,98	0,17	91,41
CO_2 (%vol)	6,1	0,3	95,08

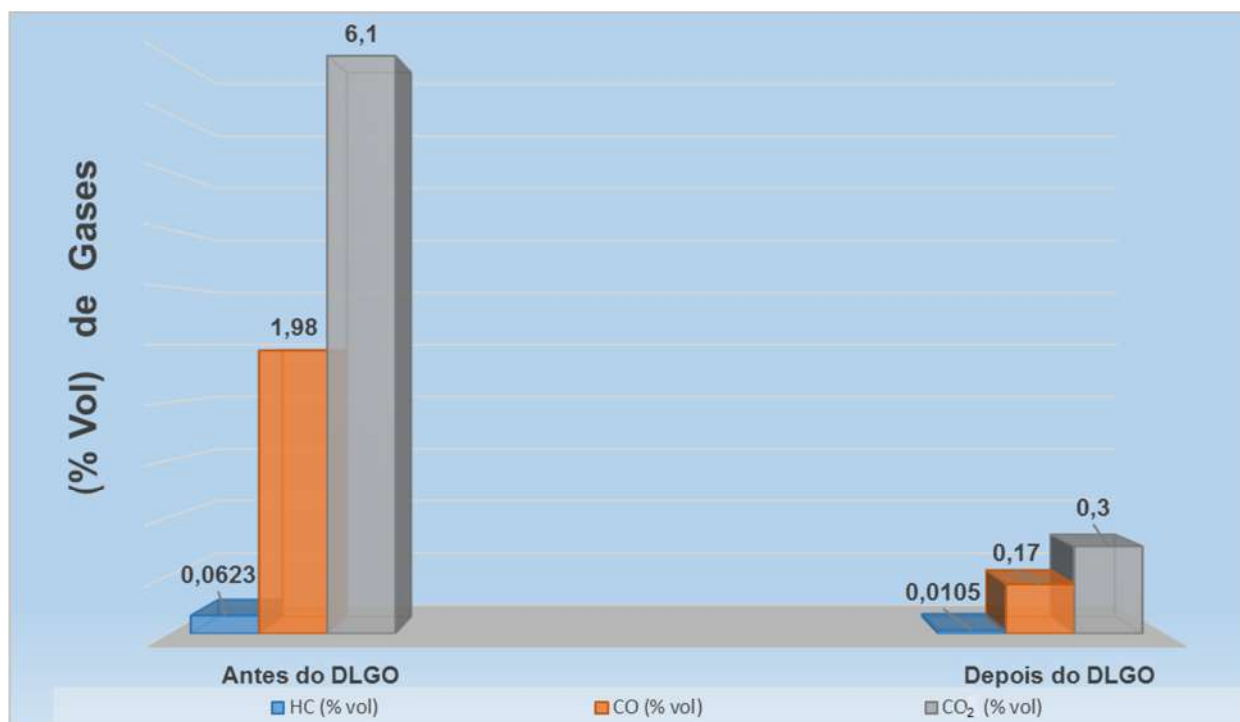


Figura 37 - Redução do HC_s (Hidrocarbonetos - Combustível não queimado), CO e CO₂ antes e depois da instalação do DLGO.

4.3. Terceiro experimento, análise de saturação da água com o DLGO

A figura 36 também apresenta os resultados do terceiro experimento realizado com o dispositivo DLGO, objetivando o levantamento de dados para a verificação do tempo de saturação da água no interior do dispositivo. Com o DLGO já em operação a 30 minutos foram efetuadas 6 leituras, como mostra a tabela 7. O tempo de análise dos gases foi dividido em intervalos de tempo de 10 em 10 minutos até atingir o tempo total de 60 minutos, com o tempo total do teste 1h:30 minutos.

Tabela 7 - Tempo de Saturação da água com o dispositivo funcionado em intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.

GASES	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 minutos
HC _s (ppm vol)	123	124	127	131	133	135
CO (% vol)	0,2	0,2	0,21	0,23	0,23	0,23
CO ₂ (% vol)	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Pode ser observado que mesmo com o passar do tempo estipulado o dispositivo continua atendendo as expectativas que eram de reduzir as quantidades de poluentes emitidos para dentro do ambiente confinado.

O DETRAN-SP (2014) em conjunto com a empresa de inspeção veicular do estado de São Paulo, CONTROLAR (2013) e CETESB (2014), estipula os limites máximos de emissão de gases, 200 ppm vol de hidrocarbonetos (HC_s), 0,3 % vol de monóxido de carbono (CO) e 0,5 (% vol) de dióxido de carbono (CO₂), para veículos automotores com motor do ciclo Otto com o ano de fabricação de 2003 a 2005.

4.3.1. Porcentagem de redução de poluentes na água de saturação

Os resultados da porcentagem de poluentes na saturação da água são mostrados nas figuras 38 a 40. Com o tempo de 10 minutos as emissões registradas pela sonda foram de 123 ppm vol de Hidrocarbonetos (HCs), 0,2 % vol de Monóxido de Carbono e 0,3 % vol de Dióxido de Carbono (CO₂). Com o tempo de 20 minutos as emissões registradas pela sonda foram de 124 ppm vol de Hidrocarbonetos (HCs) ,0,2 % vol de Monóxido de Carbono e 0,4 % vol de Dióxido de Carbono (CO₂), tempo de 30 minutos as emissões registradas pela sonda foram de 127 ppm vol de Hidrocarbonetos (HCs) ,0,21 % vol de Monóxido de Carbono e 0,4 % vol de Dióxido de Carbono (CO₂) ,tempo de 40 minutos as emissões registradas pela sonda foram de 131 ppm vol de Hidrocarbonetos (HCs) ,0,23 % vol de Monóxido de Carbono e 0,4 % vol de Dióxido de Carbono tempo (CO₂), tempo de 50 minutos as emissões registradas pela sonda foram de 133 ppm vol de Hidrocarbonetos (HCs) ,0,23 % vol de Monóxido de Carbono e 0,4 % vol de Dióxido de Carbono (CO₂), tempo de 60 minutos as emissões registradas pela sonda foram de 135 ppm vol de Hidrocarbonetos (HCs) ,0,23 % vol de Monóxido de Carbono e 0,4 % vol de Dióxido de Carbono(CO₂).

Os cálculos realizados da porcentagem de redução dos gases poluentes nos intervalos de tempo 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos , 40 minutos, 50 minutos e 60 minutos em relação aos resultados obtidos no primeiro experimento com 30 minutos são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Porcentagem de redução dos poluentes com o uso do dispositivo DLGO a cada intervalo de tempo comparativos com o 1º Experimento.

GASES	10 minutos	20 minutos	30 minutos	40 minutos	50 minutos	60 minutos
HCs(ppm vol)	80,25%	80,09%	79,62%	78,97%	78,65%	78,33%
CO (% vol)	89,89%	89,89%	89,89%	88,38%	88,38%	88,38%
CO ₂ (% vol)	95,08%	93,44%	93,44%	93,44%	93,44%	93,44%

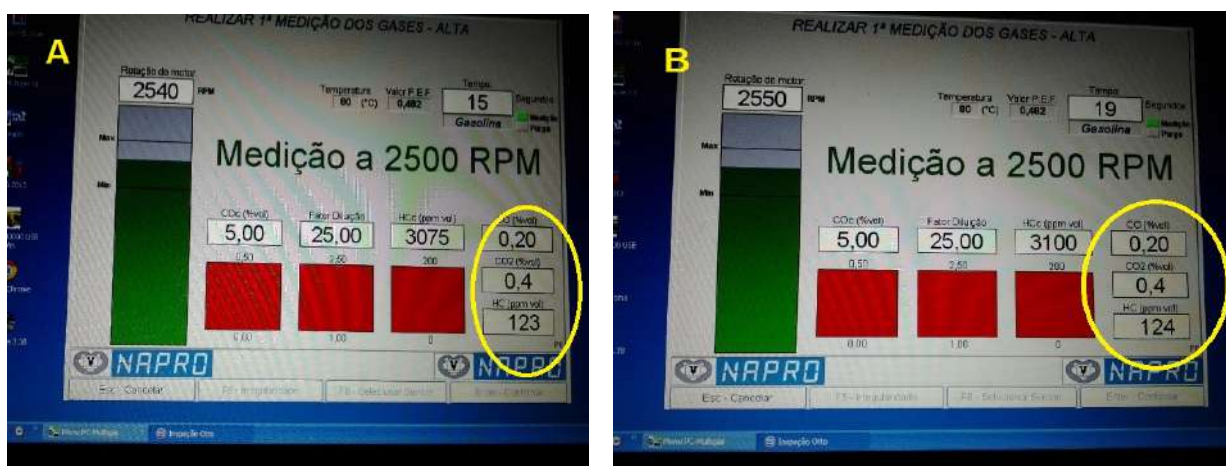


Figura 38 - A) Reprodução da tela da interface do analisador de gases com tempo de operação 10 minutos e **B)** tempo de operação 20 minutos.

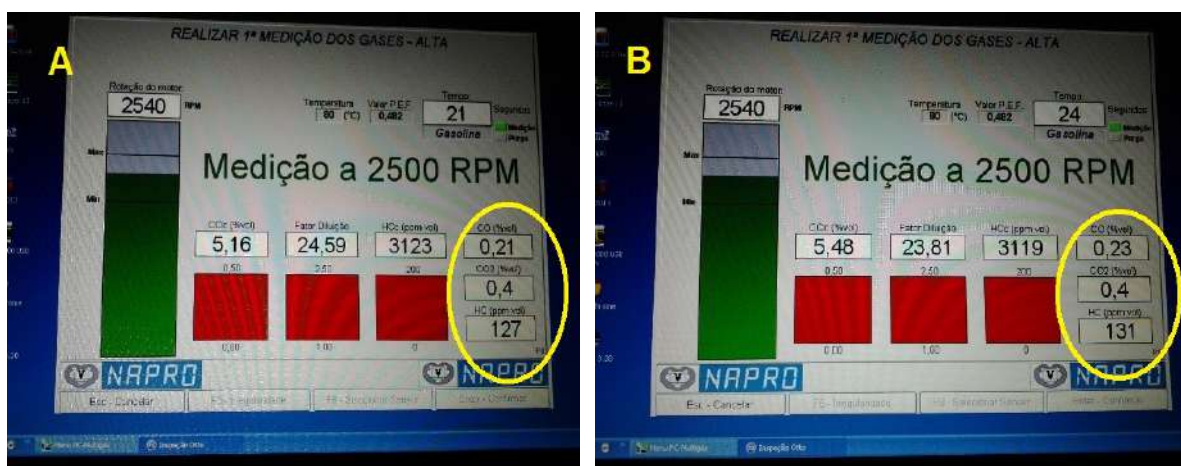


Figura 39 - A) Reprodução da tela da interface do analisador de gases demonstrando tempo 30 minutos e **B)** tempo de 40 minutos.

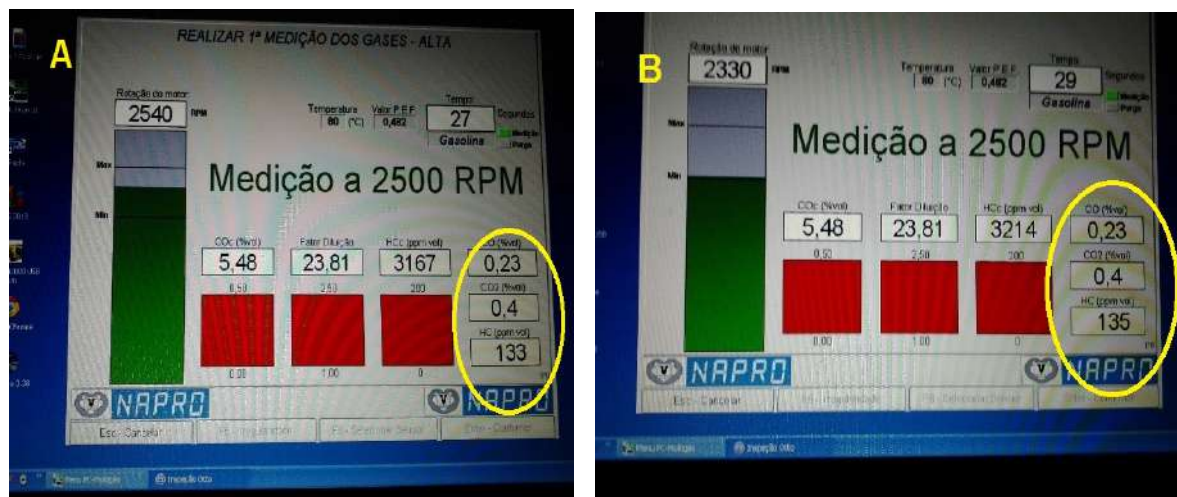


Figura 40 - A) Reprodução da tela da interface do analisador de gases demonstrando tempo 50 minutos e B) tempo de 60 minutos.

Na figura 41, pode ser notado o aumento do índice de HC_s ao longo do experimento de saturação, cabe salientar neste teste que possivelmente com o aumento da temperatura da água do dispositivo e com o decorrer do tempo de operação ocorre a exaustão dos HC_s , que foram dissolvidos inicialmente na água do reservatório.

Depois de 20 minutos de operação a estabilização dos valores de CO e CO_2 podem indicar a saturação da água (figura 42 e 43).

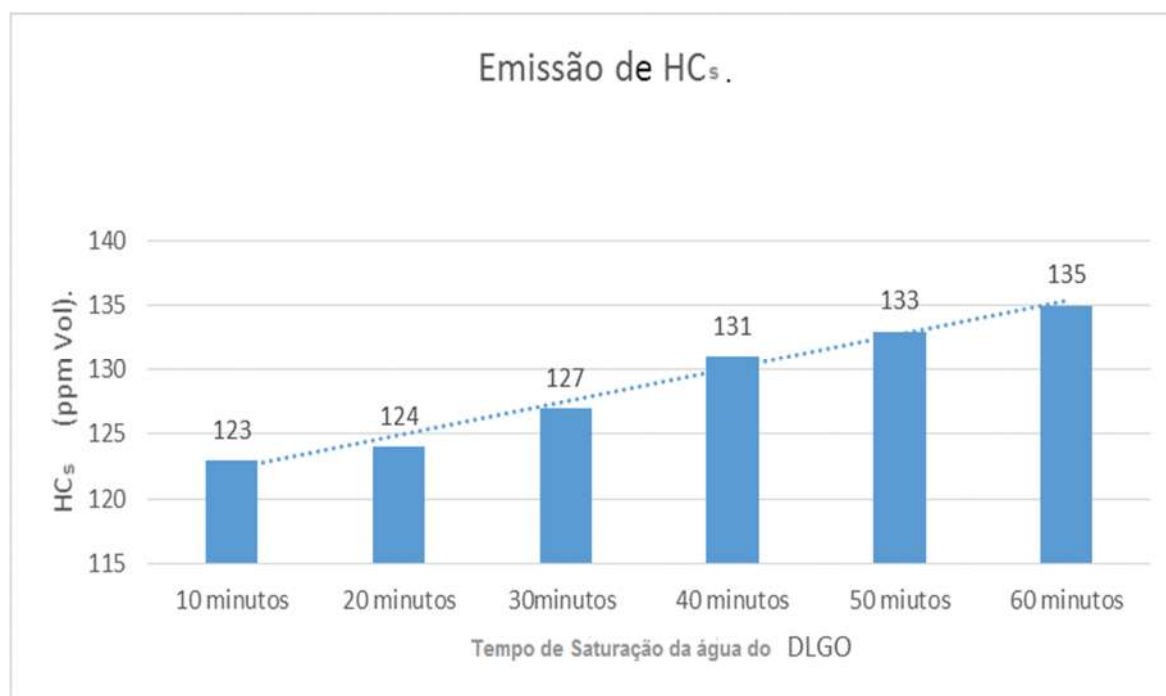


Figura 41 - Emissão de HC_s com o dispositivo funcionado com intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.

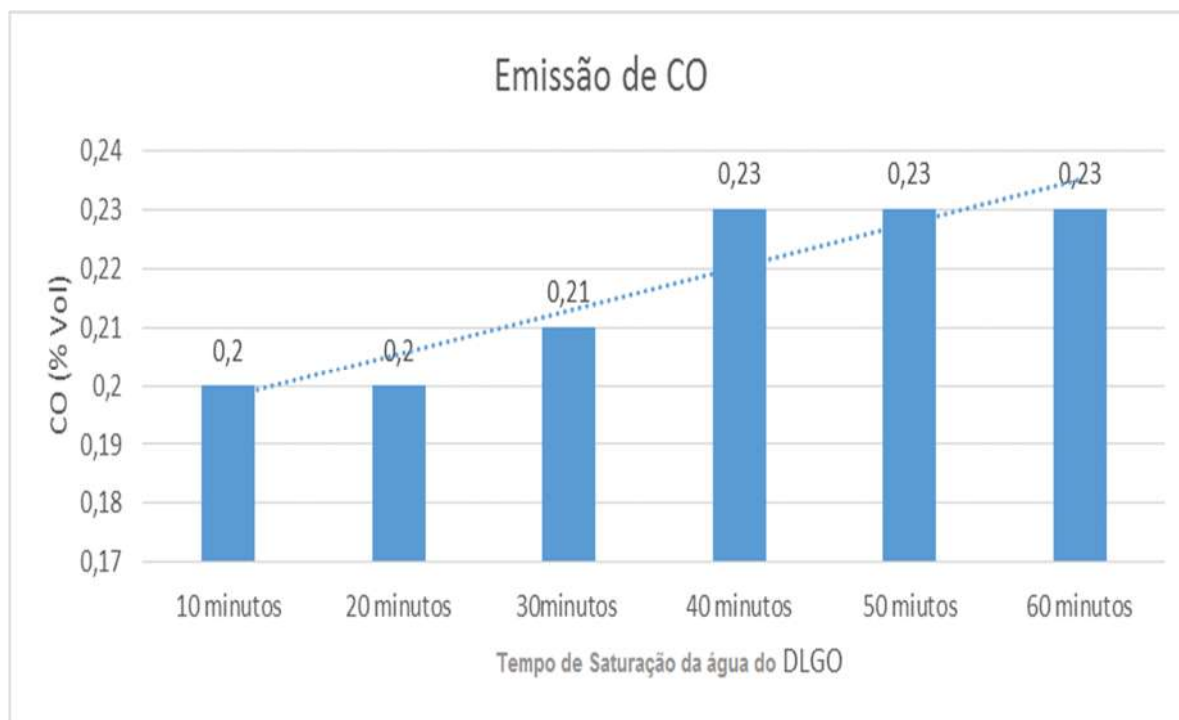


Figura 42 - Emissão de CO com o dispositivo funcionado com intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.

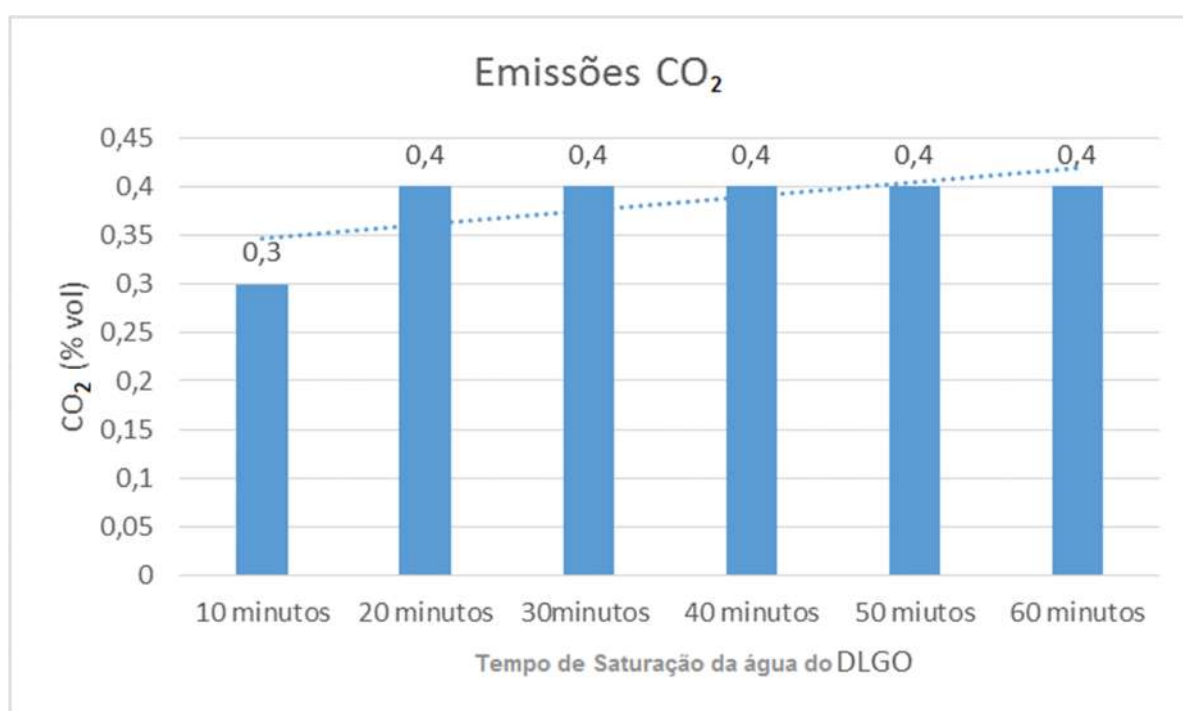


Figura 43 - Emissão de CO₂ com o dispositivo funcionado com intervalos de tempo de 10 em 10 minutos.

5 . CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1. Conclusões

Com base nos resultados apresentados e discutidos nos experimentos neste trabalho pode-se concluir que o dispositivo DLGO desenvolvido neste trabalho e operando por 30 minutos, com 30 litros de água como fluido absorvente, atende satisfatoriamente o objetivo esperado, diminuindo os efeitos nocivos das emissões geradas em ambientes confinados e reduzindo os índices dos gases gerados pelo motor de combustão interna em 83,14% HC (ppm vol), 91,41% CO (vol %) e 95,8 % CO₂ (vol %).

Em relação ao tempo de saturação da água, após a análise dos gases emitidos pelo escapamento, ficou evidenciado que mesmo depois de 1h30 minutos de operação utilizando 30 litros de água como fluido absorvente, com motor a 2500 rpm, o equipamento continuou desempenhando seu objetivo na redução dos poluentes em 78,33% HC (ppm vol), 88,38% CO (vol %) e 93,44 % CO₂ (vol %), mantendo assim as características e propriedades mecânicas do motor ciclo Otto, não causando danos operacionais e de rendimento ao mesmo.

No entanto, as reduções dos poluentes após a passagem pelo dispositivo instalado necessitam de um melhor esclarecimento e estudos voltados aos fenômenos envolvidos que ocasionaram tal diminuição, pois é de conhecimento que tanto o CO como o CO₂ não absorvem em água nas condições ambientais.

5.2. Sugestões

Como sugestões para posteriores trabalhos nesta linha de pesquisa sugere-se:

- a) Conhecimento dos parâmetros físico-químico da água utilizada como fluido absorvente para seu efetivo tratamento.

- b) Utilização de materiais nanocompósitos, nanopartículas de argila organofílicas ativadas, para aumento da absorção (ou adsorção) dos poluentes;
- c) Aumento da aplicabilidade em outras atividades como restaurantes, hospitais, incineradores, etc.;
- d) Viabilidade de um segundo protótipo utilizando outros métodos de lavagem de gases: Ciclone, Roto N, Lavador com Enchimento, etc.;
- e) Análise de outros gases: NO_x , SO_2 , SO_3 , etc.;
- f) Testes com outros combustíveis como o GNV, Etanol e Diesel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁLVARES Jr., O. M.; LACAVA, C. I. V.; FERNANDES, P. S. **Tecnologias e gestão ambiental – Emissões atmosféricas**. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), 2002. 373p.

ANP– **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis** - Índice. Disponível em < <http://anp.gov.br/?id=661> > Acesso em 08/02/2015.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. Tradução da 25ª Edição Alemã. São Paulo: Blucher, 2005.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2 eds. Revisada. São Paulo: Pearson 2009.

BRUNETTI, F. Prentice Hall, 2008. **Motores de Combustão Interna**. Vol. 2. São Paulo: Blucher, 2012.

CAIAZZO, F. et al. **Air pollution and early deaths in the United States. Part I: Quantifying the impact of major sectors in 2005**. Laboratory for Aviation and the Environment, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology. Atmospheric Environment Journal, Volume 79, p. 198–208, Novembro de 2013. Disponível em: <<http://lae.mit.edu/wordpress2/wp-content/uploads/2013/08/US-air-pollution-paper.pdf>>. Acesso em: 02 Nov. 2014.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Governo do Estado de São Paulo-Secretaria do Meio Ambiente. - São Paulo: CETESB, 2013.**Relatório de Emissões veiculares no estado de São Paulo 2014**.

Disponível em:< [http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/emissao veicular](http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/emissao_veicular)>Acesso em 09 dez 2014.

CONAMA - **Padrões nacionais de qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA** - Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução CONAMA 03/90. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/> >Acesso em 13 abril de 2015.

CONTROLAR - **Emissão de Gases Poluentes dos motores do ciclo Otto**. Disponível em <http://www.controlar.com.br/AInspecao_LimitesEmissao.aspx#/Emissao-de-Gases>

Acesso em: 02 Abr. 2015

DETRAN - **Departamento Estadual de Trânsito e SEADE Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados**). Disponível em

<[Observatóriohttp://www.nossasaopaulo.org.br/observatorio/regioes](http://www.nossasaopaulo.org.br/observatorio/regioes)> Acesso em: 03 Abr. 2015

DEGREVE, J.; EVERAERT, K; BAYENS, J. ***The use of gas membranes for Co -air separations. Filtration & Separation***, v.38, n.06, p.48-54, may2001.

ENGLEMAN, V. S. ***Updates on choices of appropriate technology for control of CO Emissions. Metal Finishing***, v.98, n.06, p.433-445, 2000.

FUKS, N. A. ***Evaporation and droplet Growth in a Gaseous Media***. Oxford. Pergamon Press, 1959

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. **Poluentes Atmosféricos Provenientes da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão**. Revista Virtual de Química, 2011, vol. 03 (5), pp. 434-445. Disponível em <<http://www.uff.br/rvq>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

HOLZER, K. ***Wet separation of fine dusts and aerosols***, Int. Chem. Eng., 25 (1985) 223-233.

IBAMA – Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de controle da poluição do ar por veículos Automotores – PROCONVE. 2**. Ed. Brasília, 2014. 181 p.

JUDA, J.; NOWICKI, M. ***Urządzenia odpylające, Wydawnictwo PWN, Warszawa*** 1979, 346–351.

PROCONVE/ PROMOT/IBAMA -**Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores**, 3 ed. Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes – Gestão Ambiental, n.º 3. Brasília: Ibama/Diqua, 2014.

INMETRO – **Instituto Nacional De Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Portaria Inmetro N.º 155, De 12 De Agosto De 2005.** Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000968.pdf> > Acesso em: 17 Nov. 2014.

GAMA GASES – **As propriedades e efeitos nocivos dos gases para o homem.** Disponível em:< http://www.gamagases.com.br/propriedades_monoxidodecarbono.htm> Acesso em: 14 Abril. 2015.

GOMES, J.F.P. **Métodos expeditos de estimativa da concentração de poluentes gasosos no interior de edifícios.**

Rev Port Pneumol [online]. 2006, vol.12, n.4, pp. 447-453.ISSN 0873-2159.Disponível em < <http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/pdf/pne/v12n4/v12n4a07.pdf>>. Acesso em: 26 Nov. 2014.

GONÇALVES, J.A.S. **Aspectos da modelagem matemática de lavadores Venturi.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2000.

KHAN, F. I.; GHOSHAL, A. K. **Removal of volatile organic compounds from polluted air.** Journal of loss prevention in the process industries, v. 13: p. 527-545, set. 2000.

MULDER, M.; KLUWER, D. **Basic Principles of Membrane Technology** 1991. 372 pp

MMA – Ministério Do Meio Ambiente. **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários – Relatório Final.** 2011 Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/emissoes-veicularesmma.gov.br/publicacao27072011055200.pdf>>Acesso em: 10 mar. 2014.

NEGRI, A. **Estudo dos efeitos mutagênicos da poluição ambiental em trabalhadores de rua em São Paulo.** 2009. Tese (Doutorado em Patologia) - Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/5/5144/tde-25022010-154540/>>. Acesso em: 23 Jun. 2014.

NR-33 – **Norma regulamentadora de segurança e saúde nos trabalhos em espaços confinados** Disponível em < <http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C816A39E4F614013A0CC54B5B4E31/NR-33%20%28Atualizada%202012%29.pdf>>. Acesso em: 23 Jul. 2014.

PERRY'S, R.H. ***Chemical Engineers' Handbook***. 8. ed. New York, McGraw-Hill, 2008

RANZ, W. E.; WONG J. B. ***Impaction of Dust and Smoke Particles on Surface and Body Collectors*** Ind. Eng. Chem. 44 (1952) n. 6 p. 1371-1381.

ROSENO, K.T.C. **Estudo Dos Catalisadores Paládio/Zircônia Sulfatada e Paládio/Alumina Sulfatada na Redução do NOx com Metano e Etanol**. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SCHIRMER, W. N. **Amostragem, análise e proposta de tratamento de compostos orgânicos voláteis (COV) e odorantes em estação de despejos industriais de refinaria de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SENADO FEDERAL- **Altera o art. 198 da Consolidação das Leis do Trabalho, aprovada pelo Decreto-Lei nº 5.452, de 1º de maio de 1943, que dispõe sobre o peso máximo que um trabalhador pode remover individualmente 2005**. Disponível em: < www.senado.gov.br > Acesso em: 13 Abril. 2015.

SILVA, R.A *et al.* ***Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change***. Environmental Research Letters. Environ. Res. Lett. 8/2013, 034005,11pp. Disponível em < http://iopscience.iop.org/1748-9326/8/3/034005/pdf/1748-9326_8_3_034005.pdf>. Acesso em: 15 Out. 2014.

SOLDÁ, P. L. **A Importância da Avaliação da Emissão de Dioxinasna Atmosfera Causada por Veículos Automotores Movidos a Gasolina e a Diesel.** Dissertação de M. Sc., Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, Brasil, 2007. Disponível em < maua.br%2Farquivos%2Fdissertacao%2Fh% bv.55123115, d.dmg>Acesso em: 15 Out. 2014.

SOUZA, R.; JARDIM, C. S. **Lesão por inalação de fumaça.** *J. bras. pneumol.* [online]. 2004, vol.30, n.6, pp. 557-565. ISSN 1806-3713. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/jbpneu/v30n6/a11v30n6.pdf>>. Acesso em: 20 Nov. 2014

STRAUSS, W. **Industrial Gas Cleaning Second Edition the Principles and Prattice of Control of Gaseuous and Particulate Emissions** (1975) p. 383-384.

WALTON, W. H.; WOOLCOCK ,A. **The suppression of airborne dust by water spray.** *Int. J. Air Pollut.* Vol 3 (1960) p. 129-153.

WANG, L. K. et al. **Advanced Air and Noise Pollution Control. Handbook of environmental engineering** (004; v. 4. Pp. 526 . vol. 4 New Jersey, 2005. Disponível em: < [http://stikessu.ac.id/file_ebook/\[Lawrence_K._Wang,_Norman_C._Pereira,_Yung-Tse_Hun\(BookFi.org\).pdf](http://stikessu.ac.id/file_ebook/[Lawrence_K._Wang,_Norman_C._Pereira,_Yung-Tse_Hun(BookFi.org).pdf)>. Acesso em: 20 Nov. 2014.

WARYCH, J. **Odpylanie gazow metodami mokrymi.** Wydawnictwa Naukowo-echniczne, 1979. Warszawa, p 46, 47 e 48.

WEBER, W. J. **Physico-chemical process for water quality control.** New York: John Wiley & Sons, 1992. 374p.

KHAN, F. I.; GHOSHAL, A. K. **Removal of volatile organic compounds from polluted air.** *Journal of loss prevention in the process industries*, v. 13: p. 527-545, set. 2000.