

Sistema Embarcado para Monitoramento de Particulados de Carbono em Emissões de Motores do Ciclo Diesel

Tomás Víctor Gonçalves Pereira Araújo

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Instrumentação Eletrônica

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.
Orientador

Helmut Neff, Dr.
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
©Tomás Víctor Gonçalves Pereira Araújo, Fevereiro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A663s

2007 Araújo, Tomás Victor Gonçalves Pereira.

Sistema embarcado para monitoramento de particulados de carbono em emissões de motores do ciclo diesel / Tomás Victor Gonçalves Pereira Araújo. Campina Grande: 2007.

96f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr. Helmut Neff.

1. Particulados de carbono. 2. Instrumentação eletrônica. 3. Microcontroladores. I. Título.

CDU- 621.3.049.077:621.436(043)

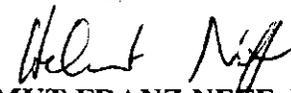
UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
726	31-03-08

**SISTEMA EMBARCADO PARA MEDIÇÃO DE PARTICULADO DE CARBONO EM
EMISSÕES DE MOTORES DO CICLO DIESEL**

TOMÁS VICTOR GONÇALVES PEREIRA DE ARAÚJO

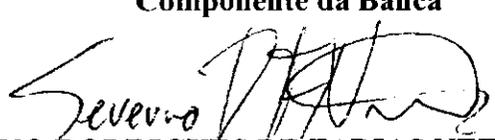
Dissertação Aprovada em 23.02.2007


ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Orientador


HELMUT FRANZ NEFF, Dr., UFCG
Orientador


JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.SC., UFCG
Componente da Banca


EURICO BEZERRA DE SOUZA FILHO, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


SEVERINO RODRIGUES DE FARIAS NETO, Dr., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO - 2007

Dedicatória

Dedico este trabalho a meu padrinho Vicente Felix da Silva que me ensinou a gostar de eletrônica. Me lembro quando eu era uma criança e ele com seu jeito de "Professor Pardal" me chamava para ver suas invenções. Seu entusiasmo e bom humor me ajudaram nos meus primeiros passos e despertou a minha paixão pela eletrônica.

Agradecimentos

- Agradeço a Deus por tudo de bom que me proporcionou na vida: minha família, meus amigos, minha pátria.
- Agradeço a meus pais Egberto Araújo e Maria da Conceição Gonçalves Pereira Araújo todo o apoio que me deram nos meus dias de luta. Obrigado por me tornarem um homem digno. Quero carregar dentro de mim o legado de fé, honestidade, amizade e perseverança inspirados por eles.
- Agradeço a meu irmão Tiago Gonçalves Pereira Araújo que com sua fidelidade, sempre me ajudou nas horas em que mais precisei.
- Agradeço a minha noiva, Julia Kissy França Bandeira, pela paciência e principalmente pelo carinho e afeto que sempre confortaram meu coração, fazendo contraponto aos meus momentos difíceis.
- Agradeço ao professor Antônio Marcus Nogueira Lima, por me ensinar os caminhos de como se tornar um pesquisador. Obrigado pelos ensinamentos, e principalmente por seu exemplo de dedicação e afino.
- Agradeço ao professor Helmut Neff pelos ensinamentos e por despertar meu ponto de vista para novos veios de pesquisa.
- Agradeço ao professor Gurgip Singh Deep que me iniciou, apresentando-me o maravilhoso mundo da instrumentação eletrônica.
- Agradeço aos professores José Sergio, Pericles Barros e Carlos Freire por colaborarem, significativamente, na minha formação e no aprimoramento deste trabalho.
- Agradeço aos professores Eurico Filho e Yoge Gerônimo pelas discussões e trabalhos realizados no projeto da GEBRA.
- Agradeço ao amigo Carlos Alberto de Souza Filho, pela amizade e pela parceria bem sucedida desenvolvida no mestrado.
- Agradeço ao amigo Alfranque Amaral da Silva, pela amizade, pela parceria e pelos conselhos.

- Agradeço a todos os amigos do grupo AEC (Amigos Engenharia e Cachaça) que sempre torceram por mim e souberam respeitar meus momentos de reclusão. A amizade de sangue que tenho de vocês me mantém forte e me estimula a encarar novos desafios.
- Agradeço aos amigos do DEE: Ademar Junior, Anderson Esteves, Airan Sausen, Euzeli Junior, Eisenhower Fernandes, Ewerton Rômulo, Genildo Vasconcelos, George Acioly, George Rossani, Hernan Marinho, Jadsonlee Sá, Jaidilson Jó, José Antônio, Kleber Melo, Luciano Barbosa, Luis Felipe, Luis Gonzaga Jr., Marcus Berguer, Manoel Filho, Max Gleison, Milena Moreira, Paulo Sausen, Valber Medeiros, Walter Valensuela, Weflen Santos e tantos outros que fizeram parte de meu cotidiano nos corredores do Departamento.
- Agradeço a Simões Soares Toledo, por montar todas as placas que precisei em meus projetos. Sua habilidade de artesanato e seu carisma faz com que ele seja peça chave nas pesquisas realizadas no LIEC.
- Agradeço a Roberto Lucena pelas aulas de mecânica automotiva e pelas discussões técnicas dos mais diversos assuntos.
- Agradeço a Lucimar Ribeiro, que com sua simpatia, eficiência e amizade no dia dia de trabalho.
- Agradeço a meus novos irmãos Fabrício Braga e Patrício Castro, que sempre me estimularam e me ajudaram a concretizar esse trabalho.
- Agradeço fortemente a ajuda de Thelma Suely e Maria da Penha que com muita paciência me ajudaram de forma incrível a finalizar este trabalho.
- Ao CNPQ, CAPES, a GEBRA e a Brasympe pelo apoio financeiro e estímulo às pesquisas.

Resumo

O monitoramento dos níveis de emissões de particulados de carbono em motores do ciclo diesel é necessário devido aos graves danos à saúde e ao ambiente que altas concentrações deste tipo de emissão podem causar. Neste trabalho é descrito o desenvolvimento de um sistema de instrumentação para monitoramento da concentração de particulados de carbono. O princípio de detecção está baseado na extinção e no espalhamento da luz proveniente de uma fonte luminosa (laser) provocado pelo fluxo de fumaça de exaustão coletada por uma tubulação de amostra. A medição da concentração de particulado utiliza o princípio do opacímetro (atenuação luminosa), onde um sensor óptico está posicionado em frente à fonte luminosa. O espalhamento luminoso é medido através três de sensores ópticos posicionados em ângulos diferentes. A intensidade da luz espalhada em cada ângulo pode revelar características referentes à composição do particulado. O sistema de ensaio utiliza o motor diesel de um grupo gerador de 150KW e uma amostra dos gases de exaustão é canalizada até uma câmara de análise, onde estão localizados a fonte luminosa (laser) e os sensores ópticos. As leituras de cada um dos sensores e o controle do brilho do laser, são realizadas pelo microcontrolador do sistema de aquisição de dados. Os valores das leituras são processados e disponibilizados para um sistema de armazenamento ou controle através de uma conexão serial RS232.

Abstract

The monitoring of carbon particulate levels in diesel cycle engines is imperative due to the fact that high concentrations of this type of emission could cause severe damage in health and environment. This work describes an instrumentation system development for monitoring carbon particulate concentration. The detection principle is based on extinction and scattering of a light provided by a light source (laser) caused by an exhaust smoke collected by a sample tube. The measure of particulate concentration uses opacimetry (light extinction), that an optical sensor is positioned in front of light source. The light scattering measurement is achieved by three optical sensors positioned in different angles. The Intensity of scattered light in each angle could reveal particulate composition properties. The characterization system uses a diesel engine of a 150KW generator group and an exhaust gas sample is canalized to the analysis chamber, where the light source and the optical sensor are placed. The readings of each sensor and laser bight control are realized by the data acquisition system microcontroller. The values of the readings are processed and shared to a data storage system (PC) or a control system via RS232 serial connection.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	5
1.3	Organização da Dissertação	7
2	Motor Diesel	9
2.1	Histórico	9
2.2	Classificação dos Motores Diesel	10
2.3	Motor Diesel de Quatro Tempos	11
2.4	Turbocompressor	13
2.5	Considerações Gerais Sobre a Fumaça de Exaustão do Motor Diesel	15
2.6	Particulados de Carbono em Emissões de Motores Diesel	16
2.7	Conclusão	19
3	Métodos para a Determinação da Concentração de Particulados	20
3.1	Determinação da concentração de particulados de carbono pelo Método de Comparação (Escala de Ringelmann)	20
3.2	Acúmulo de Particulados em um Filtro	22
3.2.1	Método de Comparação Visual	24
3.2.2	Método de Análise Eletrônica	24
3.3	Extinção Luminosa	25
3.4	Opacímetro	26
3.4.1	Opacímetro de Amostragem	29
3.4.2	Opacímetro de Fluxo Contínuo	31
3.5	Metodologias Complementares para Medição da Concentração de Particulados	32
3.5.1	Sensor Baseado em Fibra Óptica para Medição de Fumaça de Motor Diesel	32

3.5.2	Metodologia para a Medição de Concentração de Fumaça em Gases de Exaustão em um Dispositivo Acoplado ao Cano de Descarga . . .	33
3.6	Espalhamento Luminoso (<i>Light Scattering</i>)	37
3.6.1	Intensidade da luz espalhada	39
3.6.2	Diagrama de Espalhamento e Função de Fase	40
3.7	Conclusão	41
4	Material e Métodos	43
4.1	Módulo de Aquisição de Dados e Controle MADC	43
4.2	Plataforma de Testes	44
4.2.1	Sistema de Condicionamento do Sinal de Leitura	47
4.2.2	Controle de Corrente do Laser	50
4.2.3	Chaveamento do Laser	51
4.2.4	Construção Mecânica do Sistema de Testes	52
4.2.5	Resposta do Sistema	53
4.3	Conclusão	55
5	Sistema Embarcado para Monitoramento de Particulados de Carbono	57
5.1	Geometria	57
5.1.1	Plataforma Mecânica Construída	59
5.2	Sistema de Condicionamento de Sinais	62
5.2.1	Algoritmo de Média Móvel	66
5.3	Estrutura de montagem do Sistema de Monitoramento de Particulados de Carbono	69
5.4	Resultados Experimentais	70
5.5	Conclusão	78
6	Conclusões e Perspectivas	79
6.1	Propostas para trabalhos futuros	81
A	Módulo de Aquisição de Dados e Controle MADC	82
A.1	Microcontroladores ADuC	82
A.2	Placa de Desenvolvimento para microcontroladores ADuC (PD-ADuC) . . .	83
A.3	Convertendo a PD-ADuC no Módulo de Aquisição de Dados e Controle (MADC)	87
B	Publicações em Congressos	90
	Referências Bibliográficas	91

Glossário

η_V	Rendimento Volumétrico
κ	Fator do comprimento de onda da luz (λ)
λ	Comprimento de onda da luz incidente
\mathfrak{R}	Número de partículas por unidade de volume
θ	Ângulo de espalhamento
φ	Ângulo de polarização da luz incidente
A	Ganho da associação entre o PGA e o Potenciômetro Digital
a	Área média das partículas em análise
$C_{absorção}$	Área da seção transversal correspondente à absorção de luz
$C_{espalhamento}$	Área da seção transversal correspondente ao espalhamento de luz
$F(\theta, \varphi)$	Fator de espalhamento
G_{PGA}	Ganho do PGA (1, 10, 100 ou 1000)
I	Intensidade luminosa medida com a presença de uma amostra de fumaça na câmara de leitura
$I(\theta)$	Intensidade luminosa capturada pelo fotosensor posicionado no ângulo θ em relação a amplitude máxima I_0
I^2C	<i>Interconnect Integrated Circuit</i>
I_0	Intensidade de luz capturada com a presença de ar limpo na câmara de leitura
$I_{espalhada}$	Intensidade da luz espalhada por uma partícula
j	Período da Média Móvel
K	Coefficiente da Média Móvel
k	Coefficiente de absorção de luz
L	Comprimento do percurso da luz ao longo da amostra de fumaça (m)

$M_{combustível}$	Massa de Combustível necessária para a combustão
$M_{ar-ambiente}$	Massa de ar que ocupa o volume do cilindro do motor diesel nas condições ambientais de pressão e temperatura
M_{ar}	Massa de Ar Admitido
$MM(t)$	Média Móvel da amostra atual (t)
$MM(t - 1)$	Média Móvel da amostra anterior (t-1)
N	Opacidade
n	Concentração de partículas de fumaça (para fumaça preta dada em g/m^3 de carbono)
$P(F_1, D_1)$	a intensidade de luz atenuada do diodo lase D_1 captada pelo fotosensor F_1
$P(F_2, D_2)$	a intensidade de luz atenuada do diodo lase D_2 captada pelo fotosensor F_2
$P_{\varphi}(F_1, r, D_2)$	intensidade de luz proveniente do diodo laser D_2 espalhada pela amostra analisada e captada pelo fotosensor F_1 a um angulo φ
$P_{\varphi}(F_2, r, D_1)$	intensidade de luz proveniente do diodo laser D_1 espalhada pela amostra analisada e captada pelo fotosensor F_2 a um angulo φ
$P_{Pot.Digital}$	Posição do cursor do potenciômetro digital (0 a 255)
Q	Coefficiente médio de absorção de luz do particulado
RAC	Relação Ar-Combustível
T	Transmitância luminosa
t_s	Período de amostragem de um sinal
$V(\theta)$	Valores de tensão referente à intensidade luminosa capturada pelo fotosensor posicionado no ângulo θ
$V(t)$	Valor medido da amostra atual
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADuC	<i>Analog Devices Micro-Controller</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
APS	<i>Active Pixel Sensor</i>
ASCII	<i>American Standard Code for International Interchange</i>
CAN	<i>Control Area Network</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CI	<i>Compression Ignition</i>

Comandos BT	Comandos <i>Basic Transmission</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Conversor D/A	Conversor Digital Analógico
DC	<i>Direct Current</i>
DI	<i>Direct Injection</i>
ECM	<i>Electronic Control Module</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programable Read Only Memory</i>
EFI	<i>Electronic Fuel Injection</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FPF	Filtro Passa Faixa
GEBRA	Geradora Brasileira de Energia
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IDI	<i>Indirect Injection</i>
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LAOF	<i>Large Agglomerate Optical Facility</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LIEC	Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle
MADC	Módulo de Aquisição de Dados e Controle
MFB	<i>Multiple-Feedback</i>
MIPS	<i>Mega Instruction per Second</i>
NBR	Designação para Normas Técnicas Brasileiras
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PC	<i>Personal Computer</i>
PCM	<i>Powertrain Control Module</i>
PGA	<i>Programable Gain Amplifier</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
Pot	Valor numérico da potência elétrica da carga acoplada ao gerador em KW na expressão da determinação da concentração de particulados de carbono
PVC	<i>Polymer of Vinyl Chloride</i>

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RPM	Rotações Por Minuto
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SI	<i>Spark Ignition</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TTL	<i>Transistor Transistor Logic</i>

Lista de Tabelas

3.1	Escala de Ringelmann	20
5.1	Valores de tensão medidos nos fotosensores em relação a potência acoplada pelo banco de cargas.	72
5.2	Valores Normalizados de $I(\theta)$ em relação a potência acoplada pelo banco de cargas.	73
A.1	Identificação dos recursos da PD-ADuC referentes à Figura A.1.	85
A.2	Lista dos "Comandos BT".	89

Lista de Figuras

1.1	Fumaça de exaustão de Caminhões Diesel.	2
2.1	Tipos de Injeção: a) Injeção Direta; b) Injeção Indireta.	10
2.2	Partes componentes do cilindro de um motor diesel de quatro tempos.	12
2.3	Tempos de um motor diesel. a) Admissão; b) Compressão; c) Explosão; d) Exaustão.	13
2.4	Turbocompressor de um motor diesel.	14
2.5	Representação simplificada da estrutura fractal de um material particulado.	18
3.1	Escala de Ringelmann reduzida.	21
3.2	Processo de coleta da amostra da fumaça de exaustão.	23
3.3	Volume definido de amostra dentro do êmbolo.	23
3.4	Comparação do filtro com a Escala de cinza de Bacharach.	24
3.5	Sistema para a leitura do nível de fuligem contido na amostra.	25
3.6	Diagrama esquemático de um sistema para a medição da extinção.	26
3.7	Diagrama com os principais componentes do opacímetro.	27
3.8	Sistema do opacímetro de amostragem.	30
3.9	Medição da concentração de particulado com opacímetro de fluxo contínuo.	31
3.10	Diagrama esquemático da câmara de medição do sensor baseado em fibra óptica.	33
3.11	Diagrama funcional do dispositivo de medição de concentração de particulados.	34
3.12	Arranjo óptico do dispositivo de medição de concentração de particulados.	34
3.13	Espalhamento de luz por um obstáculo.	38
3.14	Interação da luz com uma partícula.	39
3.15	Interação da luz com uma partícula.	39
3.16	Definição do ângulo de espalhamento.	40
4.1	<i>Firmware</i> dos "Comandos BT" gravado na PD-ADuC formando o MADC.	44
4.2	Diagrama do sistema óptico da plataforma de testes.	45

4.3	a) Diagrama Polar do espalhamento luminoso de uma amostra; b) Leitura da luz espalhada em 90°	45
4.4	Conexão do Sistema de Leitura do Espalhamento Luminoso e o PC.	46
4.5	Procedimento experimental para medir-se a quantidade de fumaça a partir da queima de pasta de soldagem.	47
4.6	Diagrama de Blocos da Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem e Interconexão com o MADC.	48
4.7	Circuito do Amplificador de Instrumentação INA101.	49
4.8	Filtro Passa Faixa MFB.	49
4.9	Fonte de Tensão Ajustável para o Diodo Laser.	50
4.10	Circuito de Chaveamento do Diodo Laser.	52
4.11	Vista Frontal do Módulo de Leitura da Plataforma de Testes.	53
4.12	Vista Superior do Módulo de Leitura da Plataforma de Testes.	53
4.13	Gráfico de Resposta da Plataforma de Testes através do programa de interface com o MADC no MATLAB.	54
5.1	Diagrama Polar do espalhamento luminoso de uma amostra.	57
5.2	Sistema de análise de espalhamento luminoso com fotosensor móvel (LAOF)	58
5.3	Fotosensores posicionados em diversos ângulos para a medição da luz espalhada.	59
5.4	Posicionamento dos fotosensores e do diodo laser no disco de náilon da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.	60
5.5	Visão lateral da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.	61
5.6	Fotografia da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono com os sensores posicionados.	61
5.7	Diagrama de Blocos do Sistema Embarcado para Monitoramento de Particulados de Carbono.	62
5.8	Diagrama de Blocos do circuito de condicionamento do sinais da Plataforma Eletrônica de Monitoramento de Particulados de Carbono.	63
5.9	Fluxograma do algoritmo de Correção da tensão de <i>offset</i> em V_0	65
5.10	Correção da tensão de <i>offset</i> em V_0	65
5.11	Algoritmo para o cálculo da média móvel.	67
5.12	a) Leitura de V_0 sem filtragem; b) Leitura de V_0 filtrada com o algoritmo de média móvel de período 8.	68
5.13	Estrutura do grupo gerador instalado no Laboratório de Geração Termo-Elétrica.	69

5.14	Sistema de Monitoramento de Particulados de Carbono Instalado no Grupo Gerador.	70
5.15	Posicionamento dos sensores no primeiro quadrante da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.	72
5.16	Determinando a função de ajuste através de um polinômio de grau 6 no intervalo de 0 a 90° para as cargas de 0KW, 40KW e 90KW acopladas ao gerador.	74
5.17	Diagrama Polar do espalhamento luminoso causado por uma amostra de gases de exaustão do motor diesel sem carga acoplada.	75
5.18	Atenuação luminosa em função da potência acoplada ao gerador.	76
5.19	Concentração de Particulados de Carbono em função da potência acoplada ao gerador.	77
A.1	Disposição dos recursos da PD-ADuC.	85
A.2	<i>Firmware</i> dos "Comandos BT" gravado na PD-ADuC formando o MADC.	87
A.3	Quadro de um "Comando BT".	88

Capítulo 1

Introdução

A poluição atmosférica é uma das consequências negativas do desenvolvimento da atividade humana. Ao passo que o progresso chega às regiões mais remotas do planeta, através de veículos e indústrias, os níveis de gases lançados na atmosfera em consequência deste progresso, aumentam significativamente. Este aumento contribui fortemente para o aquecimento global levando ao efeito estufa. A queima de combustíveis de origem fóssil, presente nos veículos automotores e nas usinas de geração termoelétricas, é um dos principais causadores da poluição atmosférica, que lança diariamente uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO_2) (REEVE, 2002).

No setor de transporte automotivo, o interesse em tecnologias para o desenvolvimento de combustíveis eficientes e tecnologias de controle de sistemas de combustão vêm aumentando gradativamente, uma vez que há a necessidade de diminuir a quantidade de CO_2 emitido na atmosfera. Os motores diesel são largamente empregados no transporte pesado e geração de energia elétrica, entretanto, nos últimos anos o número de carros de passageiros com este tipo de motor aumentou muito, particularmente na Europa. Deste modo, o monitoramento e o controle dos níveis de emissão de poluentes para motores diesel se fazem necessários, uma vez que as legislações internacionais estão regulamentando estes níveis (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.473). A legislação brasileira ainda não permite a utilização de motores diesel em carros de passeio, contudo normas definidas pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) regulamentam os níveis de emissão de veículos pesados (IBAMA, 2004; CONAMA, 2001).

Em um motor do ciclo diesel (doravante motor diesel), a queima é feita a partir da mistura de ar e combustível injetada a uma alta pressão na câmara de combustão, cuja temperatura se encontra elevada. Nestas condições, a mistura ar-combustível entra em combustão espontaneamente forçando o pistão para baixo, produzindo assim, a energia mecânica necessária para o movimento do eixo do motor. Se a queima ocorrida na mistura

ar-combustível (neste caso, o combustível considerado é o óleo diesel) fosse perfeita, os seus resíduos seriam apenas vapor d'água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), formando os gases de exaustão. Todavia, a queima perfeita não acontece, visto que o diesel combustível não é perfeitamente refinado e as proporções da mistura ar-combustível não são exatas para cada ciclo do motor. Consequentemente, a exaustão de um motor diesel é formada por um conjunto de gases. São eles: hidrocarbonetos não queimados, monóxido de carbono (CO), aldeídos, óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos de enxofre e particulados de carbono. Dentre o conjunto de gases emitidos, as legislações mundiais (inclusive a brasileira) regulamentam a quantidade de emissão de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, particulados de carbono bem como a fumaça visível (CHALLEN; BARANESCU, 1999). Na Figura 1.1 mostra-se a fumaça preta exaurida por caminhões com motores diesel.



Figura 1.1: Fumaça de exaustão de Caminhões Diesel.

Os particulados de carbono são componentes dos gases de exaustão de um motor diesel que reflete a qualidade da combustão e consequentemente a quantidade de poluentes em sua composição. Sendo assim, faz-se importante um monitoramento eficiente deste particulado de forma que os ajustes no motor para adequá-lo às legislações de emissão possam ser programados em tempo hábil. Os particulados de carbono são monitorado por diversas metodologias adotadas por órgãos reguladores em várias partes do mundo (WEISSENSTEIN, 2001; ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - UNITED STATES, 2007),

com destaque especial para os métodos de comparação como a Escala de Ringelmann e Filtragem, e por métodos de análise da opacidade da fumaça emitida, como o opacímetro (BOSCH, 2005).

O monitoramento dos particulados de carbono pode culminar em um sistema de instrumentação que forneça parâmetros para um ECM (*Electronic Control Module*), cujas ações de controle sejam realizadas diretamente pelo sistema de injeção eletrônica de combustível, visando minimizar a emissão de poluentes. Desta forma, um método de medição que pudesse ser embarcado em cada veículo ou sistema que utilizasse o motor diesel como propulsor poderia contribuir substancialmente para a diminuição dos níveis de poluentes lançados diariamente na atmosfera.

1.1 Motivação

A indústria automotiva é um dos principais propulsores econômicos do mundo. A evolução qualitativa nos quesitos tecnológicos dos veículos automotores da atualidade se deve principalmente à larga utilização de elementos eletrônicos. Sistemas inteligentes embarcados em automóveis auxiliam gradativamente a melhoria do conforto, segurança, dirigibilidade e economia de combustível dos veículos da atualidade (BONNICK, 2001). Mesmo sendo largamente utilizado no mundo todo, o motor à explosão é uma máquina que não possui uma grande eficiência (normalmente 52%). Um dos caminhos para a melhoria da eficiência do processo de combustão consiste justamente no desenvolvimento de um sistema de controle em que a maior parte dos parâmetros envolvidos seja manipulada. Deste modo, o monitoramento e a medição das variáveis envolvidas no processo de combustão é um fator de primordial importância para a concepção de tal sistema de controle.

Os gases de exaustão de um sistema de combustão contém informações importantes referentes às características qualitativas e quantitativas da queima. Com base nesta motivação, propõe-se então, integrar técnicas de instrumentação embarcada a sistemas mecânicos de propulsão baseada em motor diesel. O desenvolvimento de um sistema de instrumentação embarcada, para a medição do particulado de carbono contido nos gases de exaustão caracteriza-se como uma ferramenta suplementar ao sistema de injeção eletrônica de combustível.

Dentre as metodologias de análise de gases, as que se baseiam em suas propriedades ópticas, são as mais utilizadas (CHALLEN; BARANESCU, 1999). Deste modo, características físico-químicas de um determinado gás são identificadas a partir do efeito que suas moléculas provocam em uma radiação luminosa incidente. A análise destas características a partir de uma fonte de luz conhecida (comprimento de onda, intensidade de luz absorvida, intensidade de luz espalhada e ângulo de espalhamento) revela informações

importantes a respeito de sua composição e concentração (HULST, 1981).

Todavia, este trabalho apresenta um sistema de instrumentação que a partir de uma fonte de luz conhecida e controlada poderá fazer uma análise do espalhamento e absorção da luz incidente na amostra de gás. A partir do princípio da opacimetria pode-se determinar a concentração de particulados presente nas emissões.

Para o desenvolvimento do sistema, foram levados em conta quatro fatores fundamentais. São eles:

- Escolha do Motor Diesel

No Laboratório de Geração Termo-Elétrica são desenvolvidas as atividades do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) envolvendo a Geradora Brasileira de Energia (GEBRA), DEE (Departamento de Engenharia Elétrica) e a DEM (Departamento de Engenharia Mecânica), além de atividades acadêmicas. O sistema de geração de energia elétrica instalado no laboratório é baseado em um motor diesel de 150 HP acoplado a um gerador. O desenvolvimento de um trabalho no nível de mestrado consolida o investimento feito na infra-estrutura, justificando também sua finalidade como laboratório de pesquisas.

- Espalhamento Luminoso

A leitura do espalhamento luminoso provocada pelo particulado em análise pode revelar características importantes em função do ângulo de espalhamento e sua intensidade. A medição da intensidade da luz espalhada pelo particulado submetido a uma fonte de radiação orientada é obtida através de fotossensores (*Photocounters* ou fotodiodos) orientados em diversas posições estratégicas.

- Atenuação Luminosa

Através do princípio da opacimetria, determina-se a concentração de particulados contidos nos gases de exaustão. Neste princípio, a concentração é determinada em função da turbidez dos gases exauridos pelo motor diesel em estudo. Uma fonte de radiação conhecida tem sua intensidade luminosa atenuada em função do volume de particulado que a transpassa. Um fotossensor localizado na face oposta à fonte luminosa, mede a atenuação da intensidade de luz provocada pela absorção dos particulados da amostra.

- Baixo custo

Diodos lasers e fotodiodos não representam um alto custo na implementação de um sistema de instrumentação destinado à análise de particulados, portanto o custo construtivo do sistema óptico do equipamento não será elevado. Utilizando uma

unidade de processamento digital como um microcontrolador ADuC, circuitos de condicionamento de sinal podem ser minimizados, uma vez que o processamento da informação lida pode ser feito digitalmente.

- Sistema Embarcado

O sistema de instrumentação que será desenvolvido, caracteriza-se como um sensor inteligente (*Smart Sensor*), uma vez que é dotado de uma unidade de processamento, no qual poderá ser integrado em sistemas de instrumentação distribuída ou remota (BOYES, 2003). Acessibilidade e mobilidade são fatores importantes para que o protótipo desenvolvido seja embarcado em sistemas de geração termoelétrica baseados em motor diesel e em veículos automotores.

Este trabalho pode representar um passo incipiente para o DEE no que diz respeito a atividades voltadas para o setor automotivo. Integrar áreas como engenharia mecânica e elétrica amplia e viabiliza novas tecnologias e novas contribuições à comunidade acadêmica.

1.2 Objetivos

Este trabalho, tem como principal objetivo desenvolver um sistema monitoramento dos particulados de carbono emitido por motores diesel, mais especificamente motores estacionários utilizados para geração termo-elétrica, baseado nas propriedades ópticas dos gases exauridos. Este sistema de geração de energia está localizado no Laboratório de Geração Termo-Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) (SILVA et al., 2005). A utilização de um motor estacionário possibilita a instalação de uma plataforma experimental necessária para validar o sistema. Deste modo, equipamentos de instrumentação de laboratório, sistema de aquisição de dados, PC (*Personal Computer*) e demais acessórios podem ser conectados ao protótipo sem maiores problemas no que diz respeito às condições estruturais para os ensaios. Com características diferentemente dos motores veiculares, um motor diesel estacionário utilizado em sistemas de geração de energia trabalha em um regime constante de rotação e torque variado em uma dinâmica muito mais lenta ao passo que cargas são acopladas ou retiradas do sistema. Com rotação constante e cargas acopladas de maneira controlada, os ensaios iniciais são favorecidos, visto que os níveis de emissão serão aproximadamente constantes enquanto a carga aplicada ao gerador estiver em um valor fixo.

O desenvolvimento do sistema de medição da concentração de particulados de carbono será baseado no fenômeno de espalhamento luminoso¹, causado pelas partículas (particulado) de carbono que compõem os gases de exaustão. A luz espalhada é então capturada por sensores de luz, no qual a intensidade luminosa e o ângulo de espalhamento podem revelar informações importantes no que diz respeito à quantidade e à natureza do particulado.

Para os testes preliminares do instrumento, uma plataforma de ensaios deve ser desenvolvida. Nesta plataforma, a geração de uma quantidade controlada de fumaça se faz necessária, de modo que as leituras dadas pelo protótipo sejam coerentes com o modelo. Uma análise comparativa *in loco* pode ser feita com a utilização de um sistema de análise de gases de exaustão (disponível em nosso laboratório).

O processamento do sinal de leitura dado pelo sistema de instrumentação deve ser embarcado em uma unidade de processamento digital onde seja possível encapsular o sistema em um único módulo. Através de um microcontrolador ADuC (*Analog Devices Micro-Controller*) será então possível utilizar tecnologias de interconexão de dados. Deste modo, o protótipo pode ser integrado às redes CAN² (*Controller Area Network*), *Bluetooth*, RS232 e RS485.

Além do processamento do sinal e interconexão, a unidade de processamento adotada será responsável pelo monitoramento dos sistemas que compõem o instrumento para medição da concentração dos particulados de carbono. Mesmo utilizando uma plataforma estacionária para o desenvolvimento do sistema de instrumentação proposto, este trabalho espera alcançar a realização de um protótipo de um equipamento onde, em trabalhos futuros, seja possível sua integração em sistemas EFI (*Electronic Fuel Injection*) de veículos com motor diesel.

Em suma, têm-se os seguintes objetivos específicos para este trabalho:

- Desenvolvimento de um sistema de instrumentação para detecção e medição da concentração de particulados de carbono;
- Desenvolvimento de uma plataforma de ensaios;
- Desenvolvimento de um sistema de fixação para contemplar uma geometria multi-sensor e multi-angular;

¹A expressão espalhamento luminoso é uma interpretação para a língua portuguesa da expressão em inglês *light scattering*. Entenda-se espalhamento luminoso como o fenômeno da dispersão da luz incidente causada por uma superfície irregular

²A rede CAN foi desenvolvida, inicialmente, para sistemas automotivos, de modo que sensores, atuadores e controladores distribuídos em um veículo ficassem conectados em uma única via de dados (CORRIGAN, 2002)

- Desenvolvimento de uma placa de aquisição de dados multi-canal para contemplar os sensores de luz;
- Implementação de algoritmos de filtragem dos sinais adquiridos;
- Desenvolvimento de uma plataforma embarcada baseada em microcontrolador ADuC;
- Integração do sistema a redes de instrumentação distribuída (CAN e RS485) e a sistemas de aquisição de dados (RS232).

1.3 Organização da Dissertação

Esta dissertação está organizada em sete capítulos, cujos conteúdos são abordados de forma a englobar os passos necessários para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de particulados de carbono. O primeiro capítulo apresentou uma visão geral dos itens que motivaram o desenvolvimento deste trabalho, bem como uma visão geral das características das emissões provenientes de motores diesel.

No capítulo 2 é feita uma apresentação do funcionamento dos motores diesel em suas diferentes configurações. Além disso, na seção 2.6 há uma descrição detalhada do processo de formação de particulados de carbono, bem como suas características químicas.

Visando levantar um arcabouço teórico sobre os processos de instrumentação existentes, no capítulo 3, apresenta-se um conjunto de metodologias utilizadas para a determinação da quantidade de particulados de carbono contidas em motores diesel. Um destaque especial é dado às propriedades ópticas da fumaça analisada. O espalhamento luminoso provocado por uma partícula em suspensão em um meio fluido, é apresentado na seção 3.6.

No capítulo 4, a metodologia de desenvolvimento do sistema embarcado para o monitoramento de particulados de carbono tem como principal elemento uma Placa de Desenvolvimento para microcontroladores ADuC (PD-ADuC). Um experimento realizado com uma plataforma de testes mostra a viabilidade do espalhamento luminoso para a determinação do nível de fumaça contida em um fluxo.

O sistema de Monitoramento de Particulados de Carbono composto de suas plataformas Mecânica, Eletrônica e a estrutura básica do *firmware* para aquisição de dados são apresentados no capítulo 5. Através de um experimento realizado com a Plataforma de Monitoramento desenvolvida verificou-se a concentração de particulados de carbono presente nas emissões do motor diesel utilizado neste estudo.

As conclusões e perspectivas do trabalho desenvolvido, bem com as propostas de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 6

No apêndice A, as metodologias adotadas no projeto da Placa de desenvolvimento para Microcontroladores ADuC (PD-ADuC) e o *firmware* que a converte no MADC (Módulo de Aquisição de Dados e Controle) viabilizando a comunicação com o PC, são abordados em detalhes.

Por fim, no Apêndice B, evidencia-se as participações do autor em congressos durante o período de desenvolvimento do mestrado.

Capítulo 2

Motor Diesel

O óleo diesel, por se tratar de um combustível subsidiado no Brasil é mais barato do que gasolina e etanol, tendo seu uso viabilizado atividades de geração de energia e em plataformas veiculares. Dentre os vários tipos de motores baseados em queima de combustível, o motor do ciclo diesel é um dos que mais libera particulados de carbono na atmosfera (CHALLEN; BARANESCU, 1999). Conseqüentemente, este tipo de motor se caracteriza como um dos principais objetos de estudo de grupos de pesquisa, órgãos reguladores e empresas automotivas, para diminuição do lançamento de poluentes na atmosfera.

Motor diesel é um motor com pistão alternado onde a formação da mistura ar-combustível, ocorre internamente à câmara de combustão de modo heterogêneo. Durante o tempo de compressão, o ar de admissão é comprimido a uma pressão de 30 a 55 *bar* em motores aspirados, ou de 80 a 110 *bar* em motores turbocomprimidos. Devido à compressão, a temperatura do ar admitido aumenta de 700° para 900° C, sendo esta temperatura suficiente para induzir a auto-ignição no combustível injetado, um pouco antes do final do tempo de compressão, quando o pistão se aproxima do PMS (Ponto Máximo Superior). Nos processos heterogêneos, a formação da mistura é decisiva para se determinar a qualidade da combustão (BOSCH, 2005).

2.1 Histórico

Desde o final do século XIX até os dias atuais, a invenção de Rudolf Diesel vem tendo cada vez mais espaço em diversas aplicações da atividade humana. O desenvolvimento de técnicas de controle da combustão e melhoria de materiais caracterizam o motor diesel como o mais eficiente motor que utiliza combustível líquido como força motriz primária.

Até 1914, o motor diesel era utilizado apenas em sistemas estacionários, porém com o início da Primeira Guerra Mundial, motores mais leves e de maior rotação foram desenvolvidos e sua aplicação passou a ser estendida a veículos bélicos. A partir de então, e

com o fim da guerra, essas aplicações foram estendidas para fins civis mais precisamente no âmbito do transporte (ônibus e caminhões) (CHALLEN; BARANESCU, 1999).

Passando aplicações industriais e marítimas, a evolução de tal motor após a Segunda Guerra Mundial, consolidou-se economicamente de modo que a sua utilização abrange na atualidade, as mais diversas faixas de mercado, não só no que diz respeito ao transporte de cargas, mas também em veículos de passeio.

2.2 Classificação dos Motores Diesel

Têm-se dois tipos de motor que utilizam diesel como combustível: o de dois e o de quatro tempos. Cada um deles subdivide-se em duas categorias, sendo elas as de injeção direta e indireta. A primeira delas, também denominada DI (*Direct Injection*), caracteriza-se pela injeção direta de combustível na câmara de combustão formada pelo próprio cilindro conforme mostrado na Figura 2.1a. Por sua vez, a injeção IDI (*Indirect Injection*) ocorre em uma pré-câmara que se comunica com o cilindro a partir de uma passagem estreita, havendo uma rápida transferência de ar entre os compartimentos levando ao Ponto Morto Superior (PMS), cujo resultado é uma mistura ar-combustível também rápida (Figura 2.1 b).

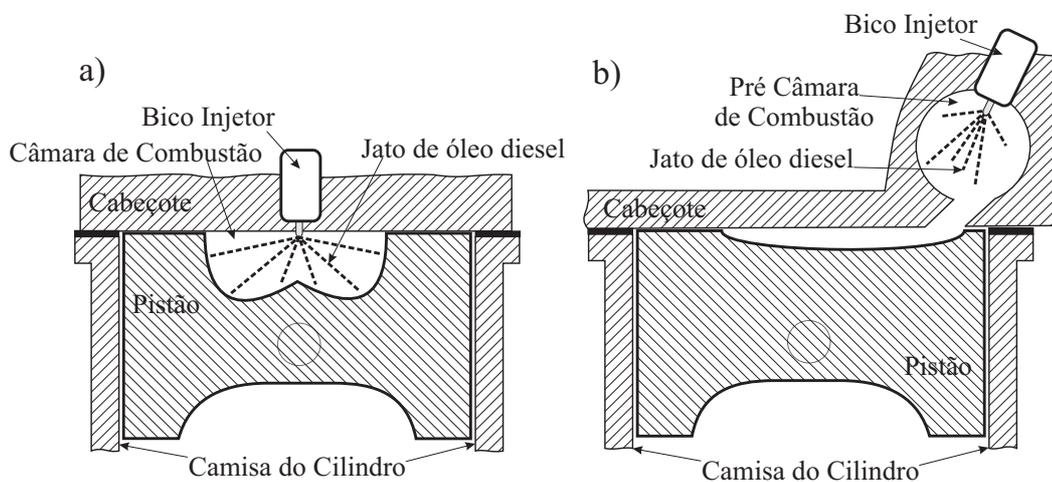


Figura 2.1: Tipos de Injeção: a) Injeção Direta; b) Injeção Indireta.

Em se tratando dos motores diesel, estes seguem um princípio de ignição de compressão (CI - *Compression Ignition*), ou seja, sem a utilização de centelha (SI - *Spark Ignition*). Sendo assim, não há presença de faísca para detonar a mistura, onde o que resulta na ignição espontânea são as elevadas temperatura e pressão (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.5). No caso do motor de dois tempos, além de outras características, seu processo de admissão, compressão, explosão e exaustão é feito em apenas um giro da árvore de manivela, diferentemente do de quatro tempos que precisa de dois giros e comando das

válvulas de admissão e exaustão. Este tipo de moto será melhor detalhado na seção 2.3 , por ser o tipo de motor utilizado para o propósito deste trabalho.

2.3 Motor Diesel de Quatro Tempos

Largamente utilizado em meios de transporte de grande porte e em sistemas de geração termo-elétrica, o motor de quatro tempos é assim denominado, devido aos quatro passos por ele exercidos ciclicamente e de forma interdependente.

Um motor diesel normalmente é composto por uma quantidade par de cilindros, que produzem o giro de um eixo em função de seu movimento de subida e descida. Este eixo, denominado de árvore de manivela, fornece ao sistema em que o motor é empregado, a força motriz primária. Os cilindros de um motor diesel podem ser dispostos em linha em V ou em delta (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1993, p.2-6), onde neles estão contidos os pistões, bico injetor e as válvulas de admissão e de exaustão.

O movimento circular da árvore de manivelas é produzido através do movimento de subida e descida do pistão de cada um dos cilindros, que estão a ela conectados através da biela (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1993, p.18). Na Figura 2.2 é mostrado de forma esquemática o cilindro do motor diesel e os componentes responsáveis pela realização das quatro etapas (tempos) responsáveis pelo giro do eixo principal.

A válvula de admissão, quando aberta, permite a entrada de ar para câmara de combustão que é aspirado pelo movimento de descida do pistão. Entretanto, a válvula de exaustão é aberta para que os gases provenientes da queima do óleo diesel sejam expelidos à atmosfera. Ambas as válvulas são fechadas, para que os processos de compressão e explosão sejam realizados. A sincronia do movimento das válvulas é feita através do eixo de comando de válvula, que consiste em um conjunto de ressaltos concêntricos alinhados em um eixo que gira em conjunto com a árvore de manivelas. Estes ressaltos produzem o fechamento e a abertura das válvulas de acordo com a posição do pistão no cilindro e com o tempo em execução.

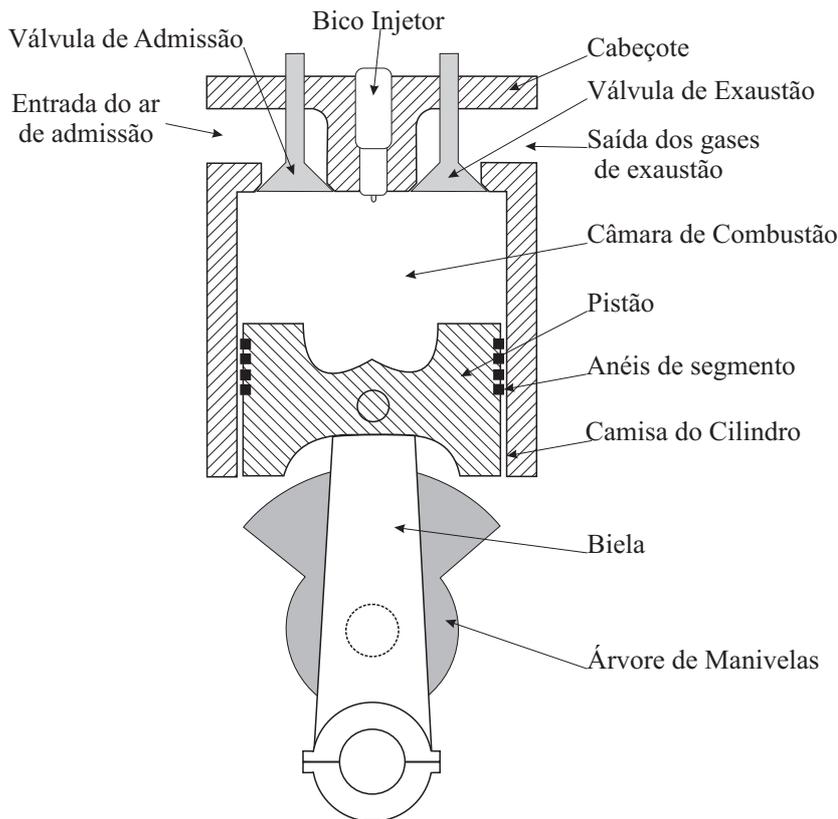


Figura 2.2: Partes componentes do cilindro de um motor diesel de quatro tempos.

O bico injetor é responsável pela injeção do óleo diesel na proporção de estequiométrica, ou seja, injetar a quantidade (massa) correta de combustível em relação à quantidade (massa) de ar admitido. A relação ar-combustível é dada pela equação

$$RAC = \frac{M_{ar}}{M_{combustível}} \quad (2.1)$$

e no motor diesel a plena carga não deve ser inferior a 1,3 (PEREIRA, 2000). Desta forma, um sistema de injeção eletrônica, por exemplo, mede a quantidade de ar admitido e calcula o tempo necessário para o acionamento do bico injetor, de modo que a quantidade de óleo diesel injetada esteja, dentro da RAC (Relação Ar-Combustível) adequada (estequiométrica).

Os quatro tempos do motor diesel são: admissão, compressão, explosão e exaustão.

A admissão ocorre quando o ar atmosférico é aspirado ou injetado, sendo o último o caso do motor turbo-comprimido, no interior do cilindro. Nesta fase, o pistão desce dando espaço para a entrada de ar, que preenche todo o volume do compartimento para que o motor realize o próximo tempo: a compressão (Figura 2.3 a).

Dando continuidade ao ciclo, a válvula de admissão se fecha com o cilindro no PMI

(Ponto Morto Inferior). Subindo, por decorrência do giro da árvore de manivela, o pistão comprime o ar que diminui 16 vezes de volume (Figura 2.3 b).

Estando o ar comprimido dentro do cilindro, ocorre então a explosão. Alguns graus antes do PMS, o combustível é injetado, e em contato com o ar em alta pressão e temperatura provoca uma explosão espontânea. Tal explosão resulta na expansão da mistura ar-combustível, forçando o retorno do pistão para o PMI, provocando o movimento da árvore de manivela (Figura 2.3 c).

O último passo realizado pelo motor diesel é exatamente aquele que o faz reiniciar todo o ciclo: a exaustão. Após a explosão e expansão dos gases, a árvore de manivela continua a girar fazendo com que o pistão suba expelindo os gases provenientes da queima. Estes gases são exauridos para atmosfera através da abertura da válvula de exaustão. Uma das consequências deste ciclo de quatro tempos, ou seja, a fumaça expelida (particulado do carbono), é o objeto de análise desta pesquisa (Figura 2.3 d).

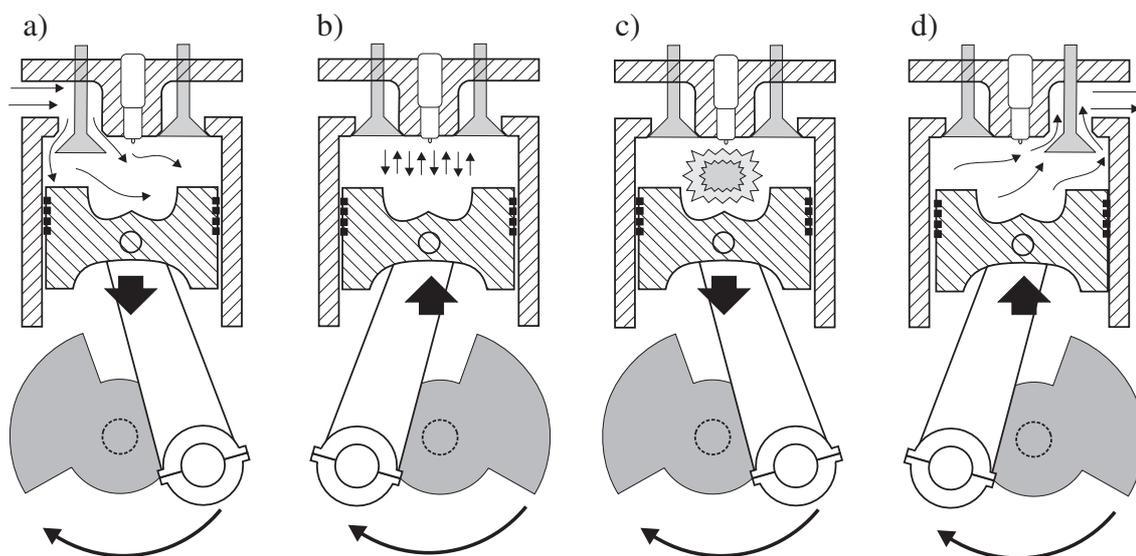


Figura 2.3: Tempos de um motor diesel. a) Admissão; b) Compressão; c) Explosão; d) Exaustão.

2.4 Turbocompressor

Os motores de quatro tempos do ciclo diesel podem ser aspirados ou turbo-comprimidos. Nos motores aspirados o ar de admissão é absorvido pela pressão negativa produzida pelo movimento de descida do pistão dentro do cilindro. Já nos motores turbo-comprimidos, o ar de admissão é injetado a partir de uma pressão positiva (maior que a atmosférica), produzida pela rotação de uma turbina.

O rendimento volumétrico de um motor a explosão, consiste na relação existente entre a massa de ar admitida pelo cilindro e a massa do mesmo volume de ar (volume do cilindro)

nas condições ambientes de pressão e temperatura (PEREIRA, 2000, p.15) expresso pela equação (2.2).

$$\eta_V = \frac{M_{ar}}{M_{ar-ambiente}} \quad (2.2)$$

Nos regimes de alta rotação, os motores aspirados fazem a admissão do ar com uma pressão menor do que a atmosférica. Isto ocorre porque não há tempo suficiente para que a massa de ar admitida se iguale a pressão interna da câmara de combustão à atmosférica. Nesta situação, o oxigênio existente na câmara não será suficiente para queimar todo o combustível injetado.

O turbocompressor de um motor diesel consiste em um dispositivo giratório composto de duas hélices acopladas entre si, através de um eixo. Os gases resultantes da queima do combustível são canalizados para um duto de exaustão que possui uma das hélices da turbina. Esta hélice, denominada de rotor quente, então gira em função da pressão exercida pela passagem dos gases de exaustão.

O eixo de acoplamento faz com que a segunda hélice da turbina (hélice de admissão ou rotor frio) gire em conjunto com o rotor quente. Nestas condições o ar atmosférico é sugado pelo rotor frio e comprimido no coletor de admissão, conforme mostrado na Figura 2.4.

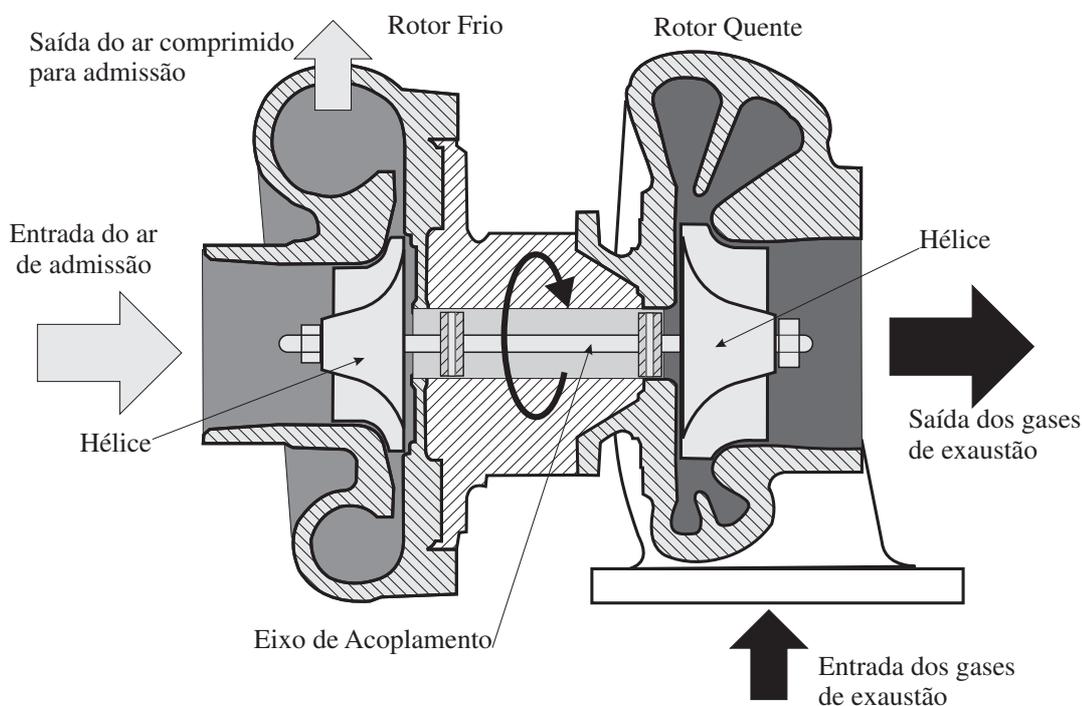


Figura 2.4: Turbocompressor de um motor diesel.

Com a utilização do turbocompressor, a quantidade de ar injetada dentro do cilindro será maior que em um motor aspirado. Deste modo, o rendimento volumétrico do mo-

tor diesel é aumentado, uma vez que o ar será injetado na câmara de combustão, com uma pressão maior do que a atmosférica. A potência final do sistema mecânico também aumenta na ordem de 30 a 40%, pois a massa de combustível injetada também deverá ser maior, compensando a *RAC* estequiométrica (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 1993, p.16).

Outro aspecto positivo da utilização do turbocompressor em motores diesel, diz respeito à poluição atmosférica e à economia de combustível. Sendo a massa de ar admitida em maior quantidade, a probabilidade de que a queima do óleo diesel seja mais próxima possível da completa, aumenta significativamente. Deste modo, a quantidade de particulado proveniente de combustível não queimado lançado juntamente com os gases de exaustão diminui. Esta melhoria na eficiência da queima, provê uma economia de até 5% de combustível dos motores turbocomprimidos em relação aos motores aspirados (PEREIRA, 2000).

2.5 Considerações Gerais Sobre a Fumaça de Exaustão do Motor Diesel

Uma visão geral da necessidade do controle dos gases de exaustão dos motores à explosão, é dada a partir do momento que, se conhece sua composição e as consequências provocadas ao meio ambiente. A fumaça é definida como um conjunto de partículas, tanto sólida como líquida (*aerosol*), suspensas nos gases de exaustão (CHALLEN; BARANESCU, 1999). A fumaça expelida por motores diesel pode ser caracterizada pela sua cor em basicamente em dois tipos:

- Azul/Branca - Composta, basicamente, pela mistura de combustível e óleo lubrificante nos estados queimados ou não queimado;
- Cinza/Preta - Partículas sólidas de carbono provenientes da queima completa de combustível.

O componente azul é derivado, principalmente, do excesso de óleo lubrificante na câmara de combustão, decorrente do desgastes dos anéis de segmento, responsáveis pela vedação do pistão. Entretanto, partículas de combustível não queimado podem aparentar-se como fumaça azul, isso se o tamanho da gotícula ficar em torno de $0.5 \mu m$. A identificação da fumaça azul pode ser utilizada como um indicativo de uma necessidade de manutenção nos componentes internos do motor diesel, ou como indicativo da qualidade da queima ocorrida na câmara de combustão.

Por outro lado, o componente branco da fumaça é derivado principalmente, como consequência de uma temperatura muito baixa dentro da câmara de combustão, durante o período de injeção de combustível. A fumaça branca apresenta gotículas com um tamanho em torno de $1.3 \mu m$. A fumaça branca é usualmente percebida quando o motor é ligado em regiões, com baixa temperatura ambiente ou em grandes altitudes. Todavia, a fumaça branca desaparece gradativamente ao passo que o motor esquenta. Entretanto, a fumaça branca pode também ser resultante de uma injeção tardia do combustível dentro da câmara de combustão. Este aspecto representa uma falta de sincronia nos elementos mecânicos que gerenciam os tempos do motor, indicando a necessidade de ajustes.

A fumaça cinza/preta é produzida em função do excesso de óleo diesel na mistura ar-combustível. Sob este aspecto, duas situações são observadas: quando o combustível é injetado além das quantidades máximas projetadas para a câmara de combustão e quando a quantidade de ar admitida não é suficiente para a queima total. A graduação de cinza até o preto da fumaça, está diretamente associada com a eficiência térmica do motor diesel e à proporção de componentes tóxicos emitidos, como o monóxido de carbono. A principal causa do excesso de fumaça preta na exaustão no que concerne aos componentes dos motores diesel, é dada pela falta de manutenção nos sistemas de filtragem de ar e ajuste inadequado da bomba injetora.

Deste modo, a fumaça de exaustão consiste essencialmente de partículas de carbono e coagulados (*aerosol*), com uma faixa de diâmetro médio variando de $0,02 \mu m$ a $0,12 \mu m$. O tamanho do particulado depende da forma como a combustão é realizada, onde a escala de cinza da fumaça emitida é função da quantidade de combustível injetado. É importante considerar que há uma grande quantidade de carbono presente na exaustão do motor diesel, em qualquer regime de operação, entretanto a emissão de nenhuma fumaça é impossível (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.461).

2.6 Particulados de Carbono em Emissões de Motores Diesel

O material particulado produzido por um motor diesel constitui-se basicamente de: aglomerados de núcleos de carbono; hidrocarbonetos; trióxido de enxofre (SO_3); ácido sulfúrico (H_2SO_4) e água. Estes elementos são adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbônicos.

Os núcleos carbônicos são partículas primárias, ou seja, pequenas unidades esféricas compostas basicamente de carbono e algum material inorgânico com diâmetro aproximado de 10 a $80 \eta m$. Sobre os núcleos carbônicos, os hidrocarbonetos provenientes da combustão incompleta do óleo diesel formam agregados. Vários agregados formados, por

sua vez, aglomeram-se e formam as partículas secundárias, com diâmetros entre 100 e 1000 ηm . Entretanto, 90% do material particulado produzido por motor diesel, apresenta um diâmetro médio menor que 300 ηm . A aglomeração dos núcleos de carbono contendo hidrocarbonetos adsorvidos começa na câmara de combustão e continua até a exaustão. O conglomerado final denomina-se "material particulado", ou simplesmente "particulado". Como o carbono é principal componente dos gases exauridos pelo motor diesel, pode-se então denominar-se "particulados de carbono" (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2004).

Os particulados de carbono constituem-se em média de: 70% em massa de carbono; 20% de oxigênio; 3% de enxofre; 1,5% de hidrogênio; menos que 1% de nitrogênio e aproximadamente 1% de elementos traços (elementos diversos em pequenas concentrações). Porém, a composição elementar dos particulados pode variar significativamente, dependendo da qualidade do óleo diesel, condições e modo de operação da máquina (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2000).

O material particulado forma-se em altas temperaturas nas regiões da câmara de combustão ricas em combustível, a partir das gotículas individuais provenientes da injeção. Para a formação dos particulados são necessários os seguintes passos elementares: a pirólise, nucleação, crescimento e coagulação, agregação e oxidação. Dentro da câmara de combustão, a reação de oxidação fica limitada devida à baixa concentração de oxigênio, já que o mesmo é consumido pela chama. Esses passos elementares ocorrem em diferentes intervalos de tempo. O processo de nucleação inicial dura na ordem de uns poucos microsegundos. Entretanto para a formação completa dos particulados são necessários alguns milisegundos, já que a oxidação e resfriamento ocorrerão quando o tempo de exaustão permitir que os gases se expandam e resfriem.

A pirólise consiste em um processo em que as moléculas de combustível em fase gasosa formam as moléculas precursoras dos particulados via radicais livres. A nucleação é o processo em que moléculas precursoras do material particulado crescem em pequenos núcleos. A oxidação do diesel após a pirólise ocorre em altas temperaturas e altas concentrações de compostos reativos.

O crescimento é o processo em que as moléculas precursoras, de tamanho inicial entre 1 a 2 ηm , aumentem para diâmetros na faixa de 10 a 30 ηm . A relação atômica entre o Hidrogênio e o Carbono diminui durante esse processo devido a reações de desidrogenação. Simultaneamente ao crescimento ocorre a coagulação. Nesse processo, os núcleos carbônicos de pequeno diâmetro colidem e coalescem ¹, formando, portanto, partículas maiores e aproximadamente esféricas.

¹O fenômeno de crescimento de uma gotícula de líquido ou bolhas de gás, pela incorporação em sua massa de outras gotículas ou bolhas com as quais entra em contato (FERREIRA, 2004).

A agregação e a coagulação com formação de cadeias têm como consequência, a formação de estruturas fractais do material particulado. Esse processo que ocorre fora da câmara de combustão, faz com que e os particulados, agora com diâmetros aerodinâmicos da ordem de $20 \mu\text{m}$, colidam a uma taxa proporcional ao quadrado do número de esferas. Devido às colisões sucessivas, estruturas em cadeia com dimensões finais de algumas centenas de nanômetros são formadas (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2000).

Na Figura 2.5 mostra-se um esquema simplificado de um material particulado produzido na combustão de diesel baseado em imagens de microscopia eletrônica de material particulado (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2004).

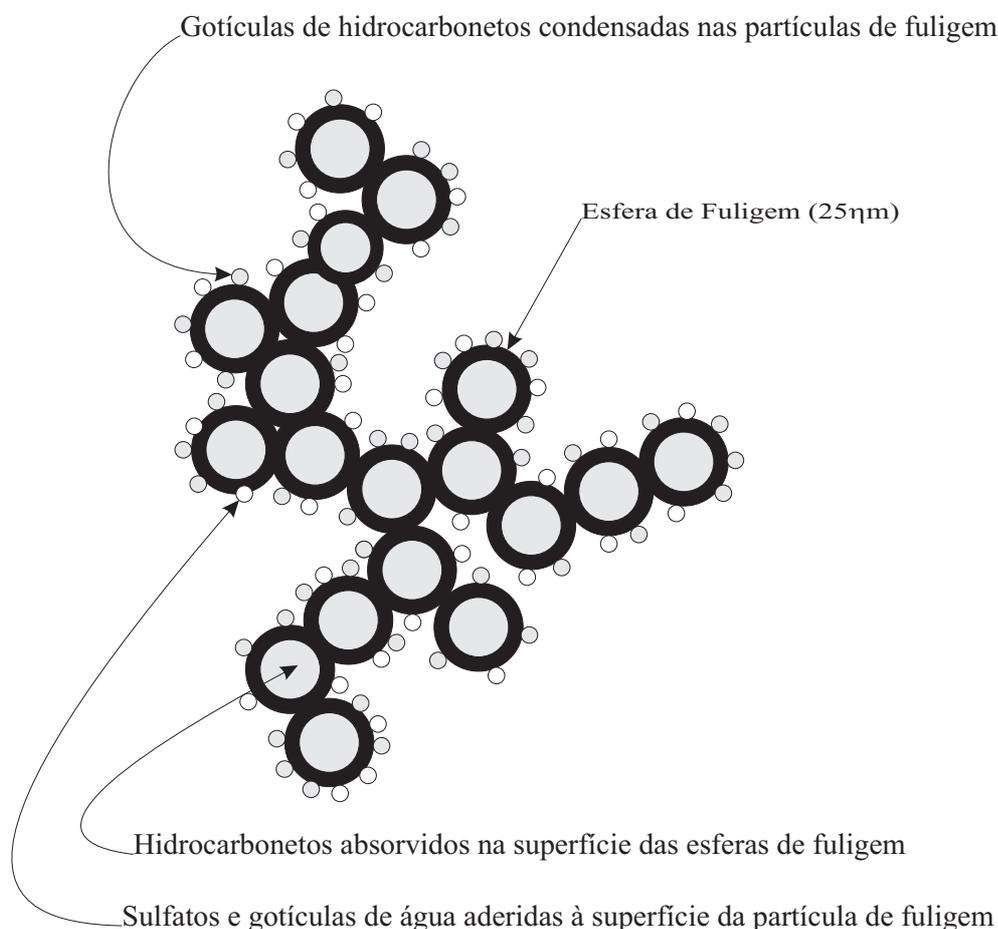


Figura 2.5: Representação simplificada da estrutura fractal de um material particulado.

O material particulado pode ser subdividido em duas partes: a fração insolúvel (fração carbonácea sólida), que é composta basicamente por carbono; e a fração orgânica, a qual pode ser subdividida em solúvel e volátil, as quais contêm os hidrocarbonetos derivados do combustível e do óleo lubrificante. Dependendo do processo de combustão, a fração orgânica solúvel pode contribuir com cerca de dois terços da emissão total de particulados (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2000).

O material particulado apresenta uma estrutura bastante complexa, a qual depende de vários fatores, como o tipo de motor, da carga aplicada ao eixo motriz, do modo de operação da máquina, além da qualidade do óleo lubrificante e do diesel utilizado (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 2004).

2.7 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado-se o sistema de funcionamento do motor diesel e as características de suas emissões. Além de se tratar de um tipo de motor largamente empregado em atividades de transporte e de geração energia, o motor diesel foi escolhido como plataforma de estudos para o desenvolvimento deste trabalho, uma vez que a UAEE dispõe de um grupo gerador diesel de 150 *KW* (SILVA et al., 2005). A possibilidade de se desenvolver uma plataforma de análise de emissão dos particulados de carbono em uma estrutura estática viabiliza de forma significativa o desenvolvimento de um protótipo. Por se tratar de um grupo gerador, o regime de rotação é constante, possibilitando que os níveis de emissão sejam analisados em função do trabalho (cargas acopladas ao grupo gerador) que o motor realiza.

Uma descrição do processo de formação e da composição química dos particulados de carbono contidos em emissões de motores diesel é feita de modo a apresentar o objeto de estudo deste trabalho. O material particulado, lançado diariamente na atmosfera representa além de uma ameaça ao equilíbrio térmico do planeta, um forte elemento causador de doenças. Os particulados provenientes do motor diesel, quando inalados, podem acumular-se nos alvéolos pulmonares, causando a fibrose. Os particulados de carbono contêm compostos orgânicos adsorvidos ², tais como os hidrocarbonetos aromáticos polinucleares, que quando absorvido pelos alvéolos, podem exercer efeitos mutagênicos, aumentando o risco de câncer no pulmão (BRAUN; APPEL; SCHMAL, 1998).

O monitoramento da quantidade de particulados de carbono em gases de exaustão se faz importante, pois além de inspecionar a qualidade do funcionamento de motores diesel, pode ajudar significativamente no combate a poluição atmosférica e doenças respiratórias.

²Fixação de moléculas de uma substância (o adsorvato) na superfície de outra substância (FERREIRA, 2004).

Capítulo 3

Métodos para a Determinação da Concentração de Particulados

3.1 Determinação da concentração de particulados de carbono pelo Método de Comparação (Escala de Ringelmann)

A tonalidade de cinza da fumaça de exaustão dos motores diesel exprime de forma direta o nível de poluentes emitidos na atmosfera, além da condição de ajuste do motor. Com base nesta característica a utilização de uma escala graduada em quatro tonalidades de cinza, branco e o preto, chamada de escala de Ringelmann é utilizada para a análise da fumaça (U.S. Bureau of Mines, 1967). As graduações da escala são 0% (branco), 20%, 40%, 60%, 80% e 100% (preto) que correspondem ao teor de particulados (ou fuligem) emitido. Na Tabela 3.1 é apresentada a escala de Ringelmann com o N° de Ringelmann em função do Teor de Fuligem emitido .

Teor de Fuligem	Tonalidade	N° de Ringelmann
0%	branco	0
20%	cinza	1
40%	cinza	2
60%	cinza	3
80%	cinza	4
100%	preto	5

Tabela 3.1: Escala de Ringelmann

A avaliação da fumaça é feita a partir de uma comparação entre a tonalidade da fumaça emitida e as tonalidades impressas na escala de Ringelmann reduzida (Figura 3.1) (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.461).

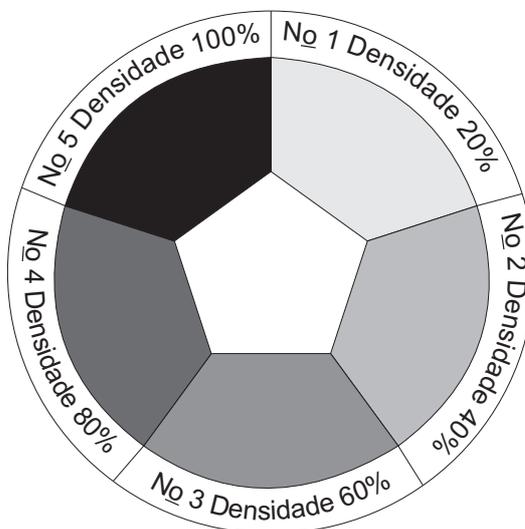


Figura 3.1: Escala de Ringelmann reduzida.

Segundo a NBR 6016 (ABNT, 1986) o procedimento de ensaio deve ser realizado da seguinte forma:

1. O motor deve estar em funcionamento, em qualquer condição de trabalho, sob quaisquer condições de pressão barométrica e temperatura ambiente;
2. O observador deve posicionar-se a uma distância de 20 a 50 metros do ponto de medição posicionado de tal forma que não haja incidência direta da luz do sol em seus olhos. A linha de visada deve ser preferencialmente perpendicular à direção de saída do gás de escapamento;
3. O observador deve segurar a escala de Ringelmann reduzida com o braço esticado olhando através de sua abertura o ponto de medição contra um fundo claro. Deste modo a avaliação comparativa do teor de fuligem é feita, determinando-se qual dos padrões da escala mais se assemelha à tonalidade do gás emitido.

Para avaliar o teor máximo de emissão de fuligem o motor deve ser submetido à máxima rotação.

Durante o processo de avaliação das emissões do motor sob uma determinada condição de trabalho ou carga, é recomendado que vários ensaios sejam feitos. Os resultados de todos os ensaios devem atingir o mesmo valor na escala de Ringelmann.

A avaliação da concentração de fuligem na fumaça de exaustão utilizando a escala de Ringelmann pode ser realizada tanto em motores diesel veiculares, como em motores estacionários.

Enquanto que a utilização da escala de Ringelmann apresenta algumas limitações, é possível obter-se bons resultados práticos, uma vez que seja manipulada por operadores bem treinados. Além de possuir um custo muito baixo, o método de comparação direta apresenta-se com uma boa alternativa para um diagnóstico imediato.

Entretanto, o resultado é questionável, pois mesmo sendo expresso em unidades fracionais, este método está sujeito às condições físicas do ambiente de ensaio e ao julgamento do observador. É importante ressaltar que este método não pode ser utilizado com o veículo em movimento, e os valores de sua leitura não podem realimentar um sistema de controle de EFI em tempo real.

3.2 Acúmulo de Particulados em um Filtro

Esta metodologia consiste na análise do nível de particulados de carbono depositado em um filtro de papel brando durante um determinado período. Uma quantidade definida de fumaça deve atravessar um filtro de papel a uma pressão e um fluxo constante. Os particulados de carbono depositado durante o período de amostra "suja" o filtro de papel. Finalizada a amostra o filtro de papel deve ser retirado da ferramenta de coleta, e ser comparado em uma escala de cinza (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.462).

Para garantir uma homogeneidade no fluxo e na quantidade de fumaça, a coleta da amostra é realizada com a utilização de uma bomba de sucção. O processo de amostragem mostrado na Figura 3.2, consiste em introduzir a ponta de coleta da bomba de sucção no cano de descarga do motor diesel em análise através de um pequeno furo. Na parte anterior da bomba de sucção é colocado um refil (filtro) de papel que será submetido à passagem da amostra quando o pistão selado for puxado. A ponta de coleta da bomba deve ser posicionada em um ponto próximo do centro do cano de descarga de modo a coletar uma amostra, que seja a mais representativa possível.

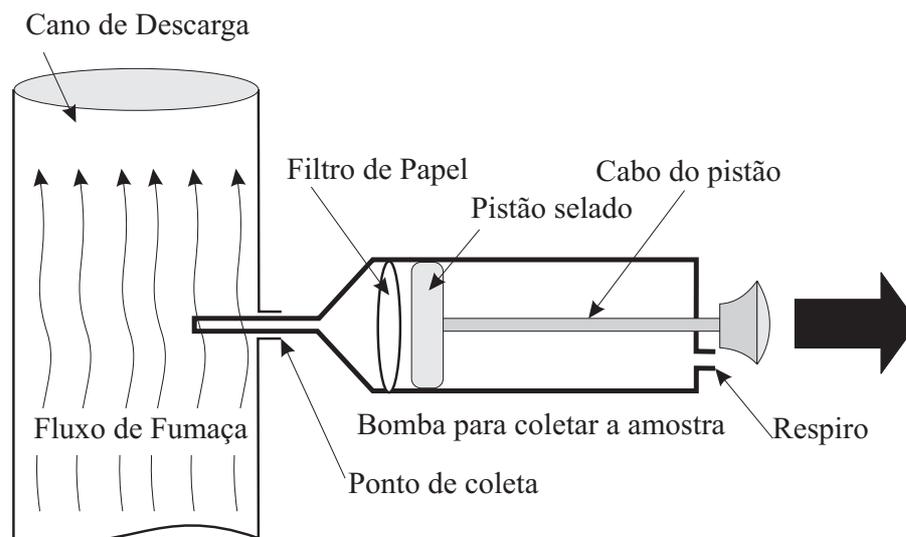


Figura 3.2: Processo de coleta da amostra da fumaça de exaustão.

A coleta da amostra é feita quando o cabo do pistão é puxado a uma velocidade constante (Figura 3.3). A fumaça sugada passa através do filtro de modo que uma determinada quantidade de fuligem (particulados) se acumulará em sua superfície. Por apresentar um volume definido, todas as amostras realizadas utilizando a bomba de sucção apresentam equivalência de condições nos diversos testes.

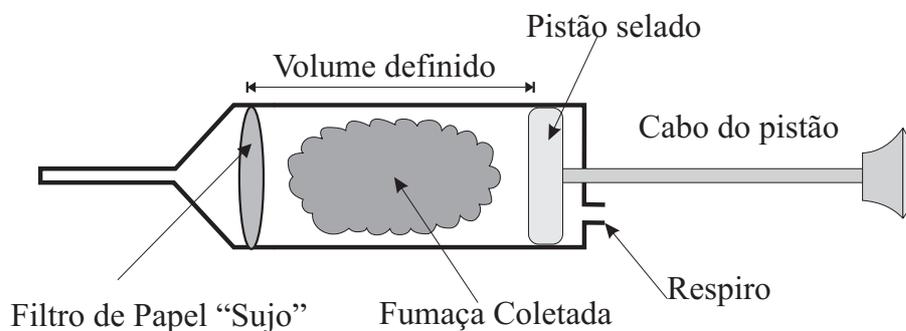


Figura 3.3: Volume definido de amostra dentro do êmbolo.

Feito o procedimento de coleta pode-se verificar a quantidade do particulados de carbono presente na fumaça de exaustão em função da tonalidade de cinza absorvida pelo filtro. Para tal avaliação o filtro deve ser retirado da bomba de sucção, onde a determinação dos níveis de particulados é feita a partir de dois métodos: o de comparação visual e o de análise eletrônica.

3.2.1 Método de Comparação Visual

No método de comparação visual utiliza-se uma escala de cinza com 10 níveis (branco ao preto), conhecida como Bacharach *Greyscale* sendo mostrado na Figura 3.4. Com esta escala o usuário compara a tonalidade do filtro determinando, assim, a quantidade de particulados presente na amostra. O nível apresentado na escala de Bacharach será utilizado para estimar os níveis de particulados emitido pelo motor diesel em teste (BOSH, 2000). Assim como a leitura da escala de Ringelmann a qualidade da análise depende da acuidade visual do usuário e das condições luminosas do ambiente.

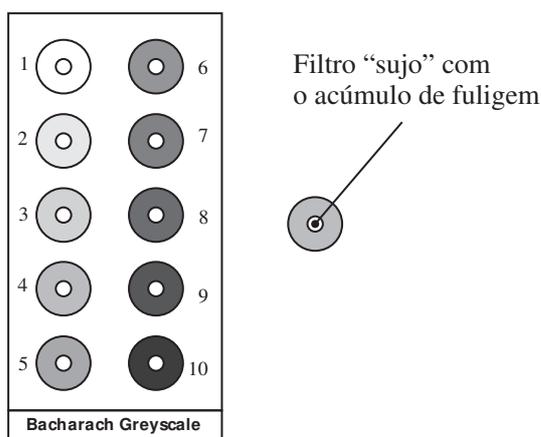


Figura 3.4: Comparação do filtro com a Escala de cinza de Bacharach.

3.2.2 Método de Análise Eletrônica

O método de análise eletrônica é feito através de um medidor de reflexão. Este aparelho consiste em um sistema que realiza a análise mediante o nível de reflexão luminosa do filtro de papel (refil) utilizado na amostra. De acordo com a Figura 3.5 uma fonte luminosa posicionada na parte superior de uma câmara incide luz sobre o filtro em análise. Uma fotocélula (LDR *Light Dependent Resistor*) em forma de disco com um furo no centro localizada abaixo da fonte de luz tem sua resistência alterada em função da quantidade de luz refletida. Uma escala de avaliação com 10 níveis é apresentada em forma de uma indicação eletrônica (*display* ou galvanômetro). A utilização da análise eletrônica diferentemente da análise de comparação não precisa de um critério de avaliação humano.

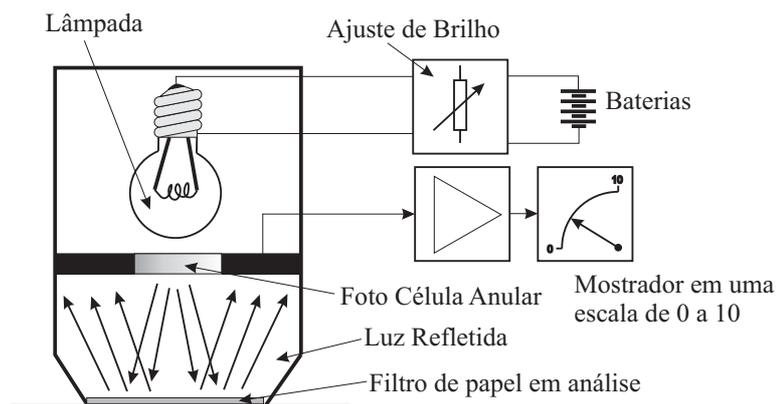


Figura 3.5: Sistema para a leitura do nível de fuligem contido na amostra.

3.3 Extinção Luminosa

O método de extinção (*Extinction*) de uma onda eletromagnética consiste em uma atenuação dada em sua intensidade devido à absorção e espalhamento, quando a mesma transpassa um meio particulado (BOHREN; HUFFMAN, 1998, p.287). Em um meio majoritariamente homogêneo a atenuação na onda eletromagnética é dada, basicamente, pela absorção. Em um meio não homogêneo onde haja a presença de partículas em suspensão por exemplo, a onda eletromagnética que transpassa sofre atenuação tanto por absorção como por espalhamento. Desta maneira pode-se definir que a extinção de uma onda eletromagnética que atravessa um meio não homogêneo é dada pela equação (3.1). Para a situação em estudo, a onda eletromagnética está contida no espectro luminoso.

$$\text{Extinção} = \text{Absorção} + \text{Espalhamento} \quad (3.1)$$

A atenuação da intensidade do feixe luminoso de I_0 para I é dada de maneira exponencial em relação ao comprimento do percurso que a luz transpassa (L) e o coeficiente de extinção (k) do meio particulado expresso por

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kL}. \quad (3.2)$$

O coeficiente de extinção assim como mostrado na equação (3.1) é dado pela soma dos efeitos da absorção e o espalhamento da luz incidente sobre o meio em análise

$$k = \Re(C_{\text{absorção}} + C_{\text{espalhamento}}). \quad (3.3)$$

No qual \Re é o número de partículas por unidade de volume; $C_{\text{absorção}}$ e $C_{\text{espalhamento}}$ são as áreas das seções transversais de absorção e espalhamento.

Embora a absorção e o espalhamento ocorram de forma simultânea, dependendo do meio particulado submetido à radiação luminosa, um dos fatores será dominante sobre o outro. Por exemplo, quando um feixe luminoso transpassa um meio composto por fumaça branca, a extinção ocorrerá basicamente por espalhamento. Mas caso o feixe de luz transpasse uma coluna de fumaça proveniente da queima de carvão, a atenuação será dada majoritariamente pela absorção.

O procedimento para a determinação do coeficiente de extinção de uma determinada substância é feito através da medição do nível de atenuação provocado em um feixe de luz conforme mostrado na Figura 3.6. Esta medição é chamada de turbidimetria, pois o coeficiente de extinção corresponde ao nível de turbidez da substância em análise baseado na equação (3.2) (BOHREN; HUFFMAN, 1998, p.316).

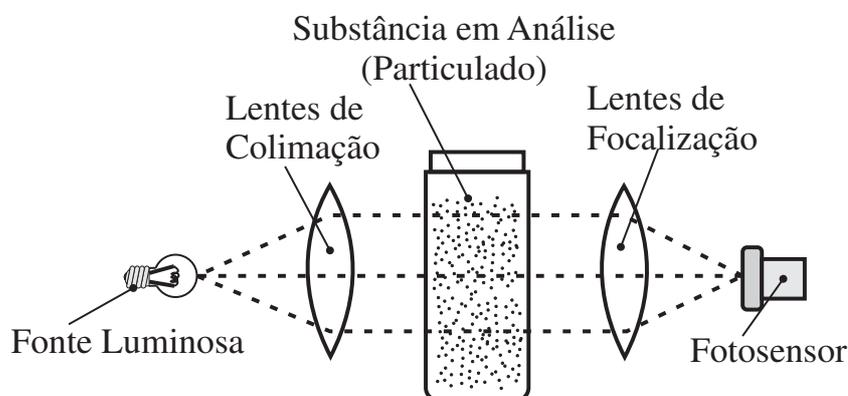


Figura 3.6: Diagrama esquemático de um sistema para a medição da extinção.

O meio particulado utilizado para análise de turbidez é fluido (líquido ou gasoso). Deste modo, é possível determinar-se a concentração de partículas em suspensão em uma solução não homogênea.

3.4 Opacímetro

Em se tratando da fumaça proveniente dos gases de exaustão, quanto mais visível for, maior será a densidade do particulados de carbono.

Nas técnicas de comparação apresentadas anteriormente, a tonalidade da fumaça (escala de cinza) exprime a quantidade de particulados de carbono nela contido. Baseada nas propriedades ópticas da fumaça, a densidade dos particulados de carbono contido nos gases de exaustão pode ser medida através de suas propriedades de absorção de luz. Assim com a utilização de um opacímetro é possível avaliar o índice de absorção de luz e determinar a quantidade de particulados de carbono presente nos gases em análise (CHALLEN; BARANESCU, 1999).

O procedimento de leitura da quantidade de fuligem presente na fumaça, fundamentado em suas propriedades ópticas pode ser feito basicamente de duas maneiras: uma delas consiste em coletar-se uma amostra de fumaça confinando-a em uma câmara específica; e a outra consiste em analisar o fluxo contínuo dos gases diretamente no cano de descarga.

Os principais elementos do opacímetro consistem basicamente em: uma câmara com largura definida, na qual a fumaça analisada é colocada, uma fonte luminosa em uma extremidade e uma fotocélula na extremidade oposta. Conforme mostrado na Figura 3.7, a amostra de fumaça é transpassada pelo feixe luminoso e a fotocélula (LDR ou fotodiodo) captura a luz que não foi absorvida.

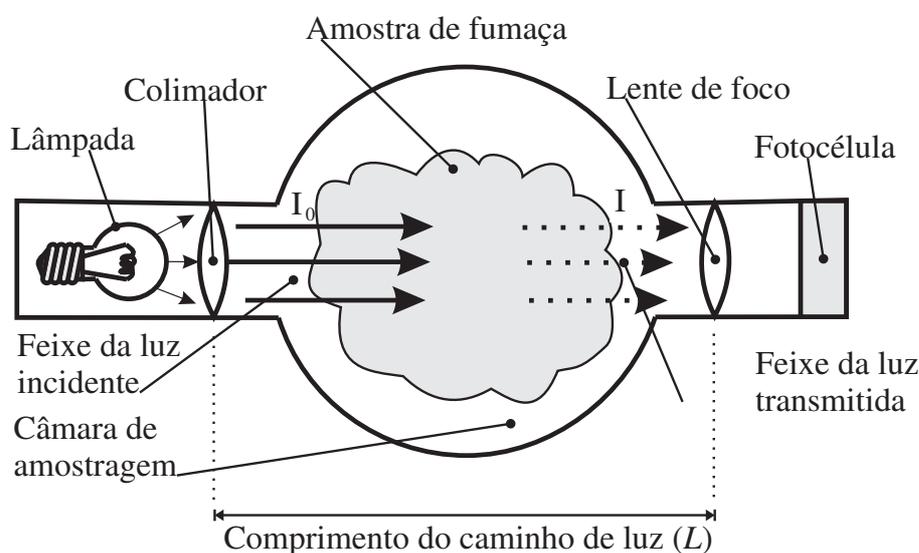


Figura 3.7: Diagrama com os principais componentes do opacímetro.

O sinal elétrico proveniente da fotocélula está relacionado diretamente com a intensidade de luz por ela capturada. A transmitância de uma substância é definida como a relação entre o nível de luz capturada pelo sensor (I) e luz total incidente na amostra (I_0), definida por (3.4) (HARVEY, 2000).

$$T = \frac{I}{I_0} 100\% \quad (3.4)$$

A transmitância dada pela equação (3.4), representada em porcentagem tem seus valores entre 100% (nenhuma absorção de luz pela amostra) e 0% (absorção total da luz pela amostra).

A intensidade de luz (I) é expressa em W/m^2 . Contudo, se a fotocélula utilizada no opacímetro apresentar em sua saída uma resposta linear em uma variação luminosa compreendida entre $0 W/m^2$ (absorvência máxima) e I_0 (transmitância máxima), a transmitância (T) pode ser determinada diretamente em função da tensão apresentada pela

fotocélula. Esta característica faz com que o opacímetro seja um instrumento de medição de particulados de carbono totalmente eletrônico e de leitura direta.

A opacidade de uma determinada amostra de substância está relacionada com a sua transmitância, já que o interesse da análise está ligada à quantidade de luz absorvida pela amostra. Baseado na expressão da transmitância de luz, a opacidade (N) é expressa em uma relação de transmitância apresentada também em forma de porcentagem dada pela equação (3.5) (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.463).

$$N = \left(1 - \frac{I}{I_0}\right) 100\% \quad (3.5)$$

Onde:

I representa a Intensidade luminosa medida com a presença de uma amostra de fumaça na câmara de leitura;

I_0 representa a Intensidade de luz capturada com a presença de ar limpo na câmara de leitura.

A redução da intensidade de luz em função da concentração de partículas é dada de acordo com a Lei de Beer-Lambert (3.6) (HARVEY, 2000)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-naQL}, \quad (3.6)$$

no qual:

n representa a concentração de partículas de fumaça (para fumaça preta, dada em g/m^3 de carbono);

a representa a área média das partículas em análise (m^2);

Q representa o coeficiente médio de absorção de luz do particulado (g^{-1});

L representa o comprimento do percurso da luz ao longo da amostra de fumaça (m).

A densidade de fumaça é então definida por

$$k = naQ, \quad (3.7)$$

e o parâmetro k pode ser referido como o "coeficiente de extinção" ou "coeficiente de absorção de luz" (expresso em m^{-1}). O parâmetro k , é chamado de coeficiente de absorção de luz, pois na análise baseada em turbidimetria, a luz espalhada pelo particulado não é levada em consideração.

Substituindo a equação (3.7) em (3.6) tem-se:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kL} \quad (3.8)$$

Substituindo a equação (3.8) na equação do cálculo da opacidade (3.5), tem-se que k está relacionado efetivamente com o comprimento do percurso da luz (L) e a opacidade (N). Deste modo a densidade da fumaça é representada pelo coeficiente de absorção de luz representada por k sendo calculada por

$$k = \frac{-1}{L} \ln \left(1 - \frac{N}{100} \right). \quad (3.9)$$

O parâmetro k apresenta em seus valores, resultados similares ao sistema de medição por acúmulo de particulado em um filtro, referido na seção 3.2 deste capítulo. De modo geral, a área média (a) e o coeficiente médio de absorção de luz (Q) são semelhantes para as partículas de carbono produzidas nos mais diversos regimes de operação (rotação e carga) do motor diesel. Considerando-se, então, a e Q constantes, k está linearmente relacionado com a concentração gravimétrica de carbono presente nos gases de exaustão. Deste modo k representa um parâmetro de densidade de fumaça independente da configuração do opacímetro. É importante ressaltar que o comprimento efetivo de L não é necessariamente a distância apresentada entre a fonte luminosa e a fotocélula, como mostrado na Figura 3.7, e sim o comprimento do percurso da luz ao longo da amostra.

Os opacímetros podem ser classificados em opacímetro de amostragem ou de fluxo contínuo.

3.4.1 Opacímetro de Amostragem

Nos opacímetros de amostragem, uma quantidade definida de fumaça é capturada para a análise. Na Figura 3.8 é mostrado o sistema completo de um opacímetro de amostragem. Além do opacímetro propriamente dito, este sistema utiliza um termômetro e um manômetro para monitorar respectivamente a temperatura e a pressão da fumaça em análise. Uma válvula de alívio de pressão é utilizada para atuar no controle da pressão interna dos gases no tubo de fumaça. O controle da pressão dos gases produz uma amostragem mais homogênea, visto que a turbulência do fluxo pode interferir na precisão das leituras.

O mecanismo de amostragem consiste em uma válvula de *by pass* que é aberta desviando o fluxo normal dos gases da exaustão. Sob pressão controlada, os gases de exaustão são canalizados para um tubo de fumaça, onde a fonte de luz e a fotocélula estão localizadas diametralmente opostas. Neste ponto é feita a leitura de I .

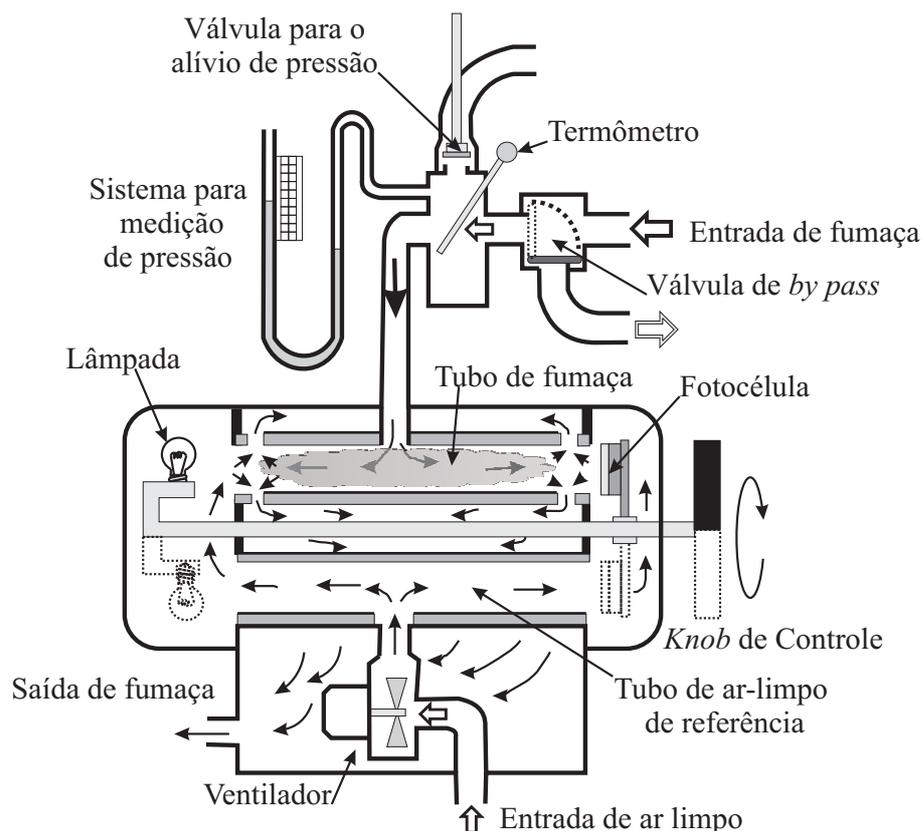


Figura 3.8: Sistema do opacímetro de amostragem.

A determinação de I_0 é dada quando o *knob* de controle é girado, posicionando a fonte de luz e a fotocélula no tubo de ar limpo de referência. O ar limpo proveniente da atmosfera local é canalizado para a câmara de amostragem através de um ventilador. Um controle da pressão não se faz necessário, visto que o ar atmosférico apresenta homogeneidade óptica e turbulências desprezíveis.

Feita a leitura dos valores de I e I_0 calcula-se a opacidade N através da equação (3.5). Tomando o valor do comprimento do tubo de fumaça L , o parâmetro k é, então, calculado através da equação (3.8), determinando, assim, a densidade do particulado de carbono presente na fumaça em análise (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.464).

O opacímetro de amostragem apresenta uma leitura bastante precisa, pois por possuir um sistema de controle de pressão, as turbulências da fumaça não alteram a concentração média de particulados de carbono da amostra. Entretanto, sua construção necessita de uma grande quantidade de partes mecânicas. Esta característica inviabiliza a utilização deste instrumento de forma embarcada em um veículo, visto que as condições ambientais (vibração e temperatura) podem diminuir sua vida útil. A válvula de controle de pressão de entrada de gases e a necessidade de girar o *knob* leva a necessidade de subsistemas auxiliares, o que encarece o equipamento.

3.4.2 Opacímetro de Fluxo Contínuo

O opacímetro de fluxo contínuo (*Full Flow*) foi desenvolvido com a finalidade de se embarcar o instrumento mais facilmente nos sistemas veiculares em análise. De maneira semelhante ao opacímetro de amostragem, o opacímetro de fluxo contínuo apresenta o posicionamento da fonte de luz e da fotocélula em lados opostos. Posicionado diretamente no cano de descarga, o fluxo da fumaça de exaustão passa através do caminho de luz, e a luz capturada pela fotocélula estará relacionada com a concentração de particulados de carbono conforme mostrado na Figura 3.9.

Por se tratar de um sistema de funcionamento contínuo, a fuligem proveniente da exaustão tende a se acumular nos componentes ópticos do sistema. Esta fuligem pode interferir completamente na precisão da leitura. Para solucionar esse problema, um sistema de ventilação deve ser utilizado, de modo que um fluxo contínuo de ar limpo impeça o acúmulo de fuligem nos componentes ópticos (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.465).

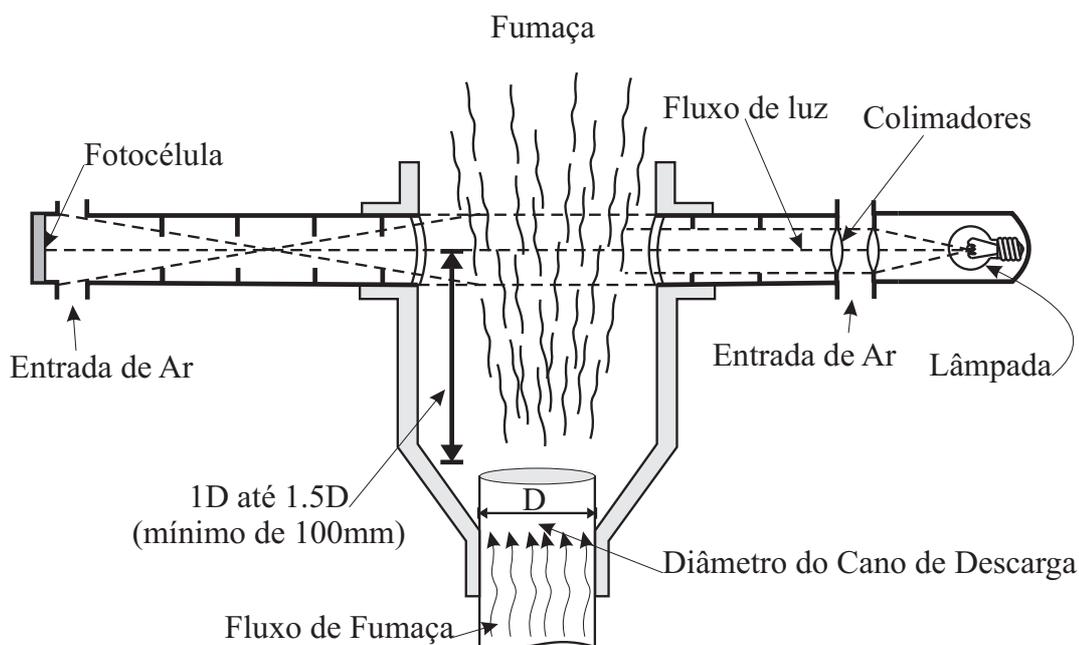


Figura 3.9: Medição da concentração de particulado com opacímetro de fluxo contínuo.

A possibilidade de se embarcar o opacímetro de fluxo contínuo em um sistema veicular ou estacionário é bem maior, uma vez que a quantidade de componentes mecânicos é menor do que o de amostragem. O sistema de ventilação pode ser implementado a partir de um pequeno ventilador, ou até mesmo aproveitando a pressão de ar do sistema pneumático de veículos pesados.

O opacímetro de fluxo contínuo possibilita uma análise de forma contínua das concentrações de particulados nos diferentes regimes de trabalho do motor diesel, visualizando assim as variações existentes.

Para minimizar o efeito da dispersão dos gases na atmosfera e até mesmo a turbulência, o caminho de luz do opacímetro deve ser posicionado a uma distância de 1 a 1,5 vezes o tamanho do diâmetro do cano de descarga (Figura 3.9).

A determinação de I_0 só é possível quando o motor estiver desligado, ou quando o opacímetro estiver desconectado do cano de descarga. Contudo, I_0 pode ser memorizado e o valor de N e k calculado continuamente a cada leitura de I . Um sistema embarcado pode atualizar o valor de I_0 do ar atmosférico local toda vez que detectar que o motor for desligado.

3.5 Metodologias Complementares para Medição da Concentração de Particulados

As metodologias apresentadas nas seções 3.1 a 3.4 se baseiam nas propriedades ópticas da amostra de fumaça em análise para determinação da quantidade e concentração de particulados de carbono. Estas técnicas clássicas são bastante difundidas e utilizadas por vários órgãos de regulamentação no mundo inteiro (CHALLEN; BARANESCU, 1999).

Nesta seção, são apresentadas duas técnicas que servirão de base metodológica para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

3.5.1 Sensor Baseado em Fibra Óptica para Medição de Fumaça de Motor Diesel

Os brasileiros Matias, Oliveira e Moschin (MATIAS; OLIVEIRA; MOSCHIM, 1997), desenvolveram um sistema de medição de concentração de particulados em fumaça baseado em fibra óptica. Uma amostra dos gases de exaustão do motor diesel analisado é direcionada para uma câmara de medição através de um duto conectado ao cano de descarga. Os gases de exaustão impregnam uma fita branca que é movimentada por um motor de passo. Na Figura 3.10 mostra-se o arranjo do sistema, onde uma célula de medição é posicionada em frente a fita já impregnada pela fuligem (particulados) da fumaça de exaustão.

Da mesma forma que o sistema de Acúmulo de Particulados em um Filtro (apresentado na seção 3.2), a concentração de particulados é proporcional a intensidade de cinza impregnada na fita.

Para evitar interferências térmicas e eletromagnéticas, um sensor a base de fibra óptica (célula de medição), reflete a luz emitida em função da tonalidade da escala de cinza na fita impregnada. Portanto, quanto maior a concentração de particulados, mais escura a fita estará. A luz de um led, devidamente controlada é, então, direcionada para a célula de medição por meio de um fio de fibra óptica, incidindo diretamente sobre a fita.

A luz refletida é conduzida a um foto sensor, para que a determinação da concentração de particulados seja medida em um sistema de instrumentação eletrônica.

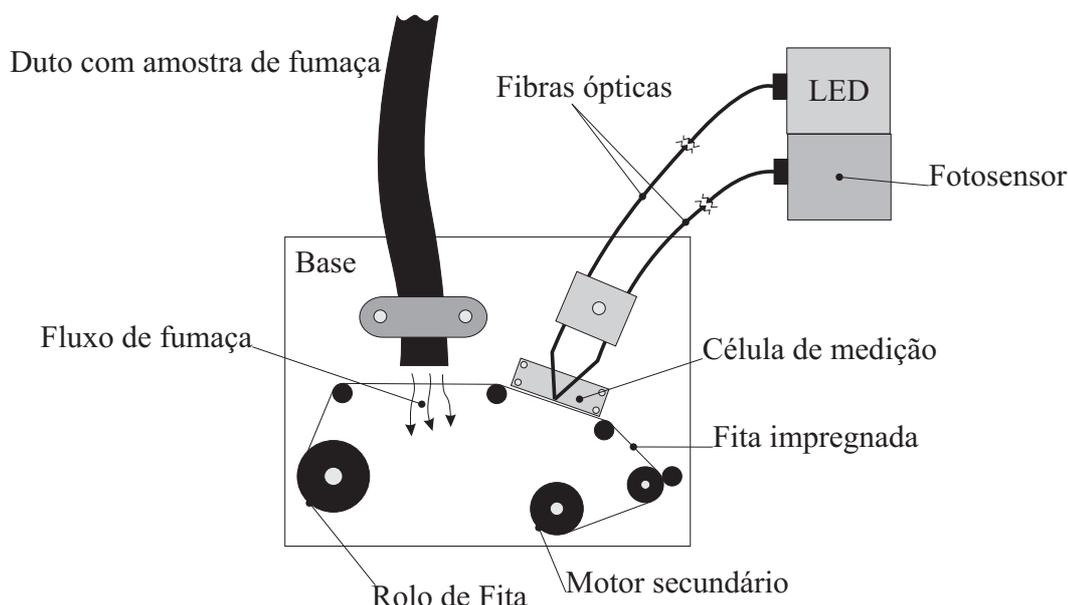


Figura 3.10: Diagrama esquemático da câmara de medição do sensor baseado em fibra óptica.

Mesmo não apresentando uma portabilidade para embarcar este sistema em plataformas veiculares, o sistema apresentado, permite que uma análise da concentração de particulados através do acúmulo de fuligem em um filtro seja realizada de forma contínua.

3.5.2 Metodologia para a Medição de Concentração de Fumaça em Gases de Exaustão em um Dispositivo Acoplado ao Cano de Descarga

Algumas técnicas mais recentes também se utilizam das propriedades ópticas dos particulados de carbono para se determinar sua quantidade. A metodologia desenvolvida por Drozd, Kugeiko e Firago (DROZD; KUGEIKO; FIRAGO, 2004), consiste em um sistema que concilia tanto a leitura da absorção como a do espalhamento luminoso provocado por um fluxo de fumaça em análise. Um dispositivo de prova é acoplado no ponto de saída do cano de descarga do motor analisado (podendo ser o motor de um veículo ou de um grupo gerador), faz a leitura da concentração de particulados do fluxo que transpassa o equipamento, conforme mostrado na Figura 3.11. Sua estrutura se assemelha a de um Opacímetro de Fluxo contínuo, apresentado na seção 3.4.2 deste capítulo (CHALLEN; BARANESCU, 1999).

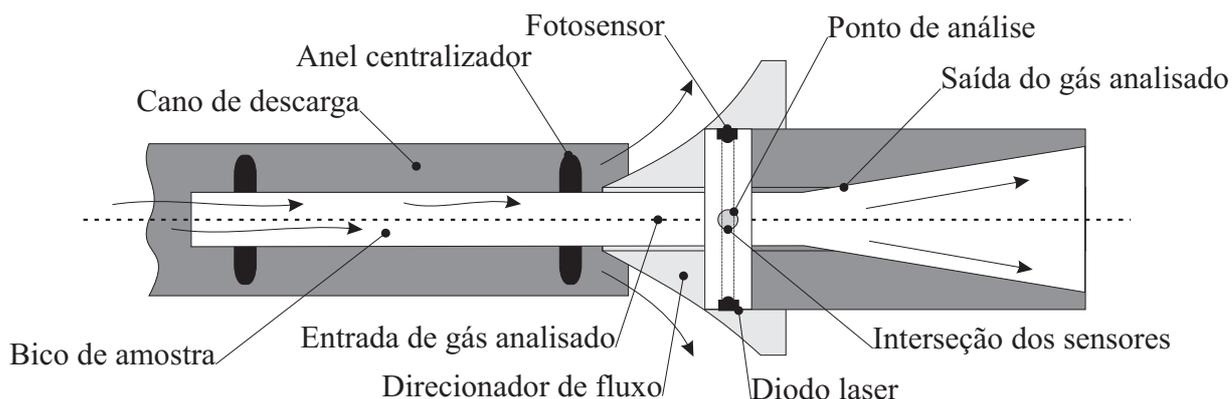


Figura 3.11: Diagrama funcional do dispositivo de medição de concentração de particulados.

Duas fontes de luz (diodos laser - 670nm) e dois fotosensores estão posicionados em duas direções perpendiculares que se intercedem exatamente no ponto de passagem da fumaça de exaustão de raio r . Nesta configuração os fotosensores captam tanto a luz atenuada (absorvida+espalhada), como a luz espalhada pela fumaça que atravessa o meio de análise, determinando-se então a concentração de particulados a partir de um sistema eletrônico de instrumentação. Através do controle e acionamento individual tanto das fontes de luz como dos fotosensores, o arranjo geométrico mostrado na Figura 3.12 possibilita a leitura individual dos efeitos de espalhamento e atenuação em dois pontos.

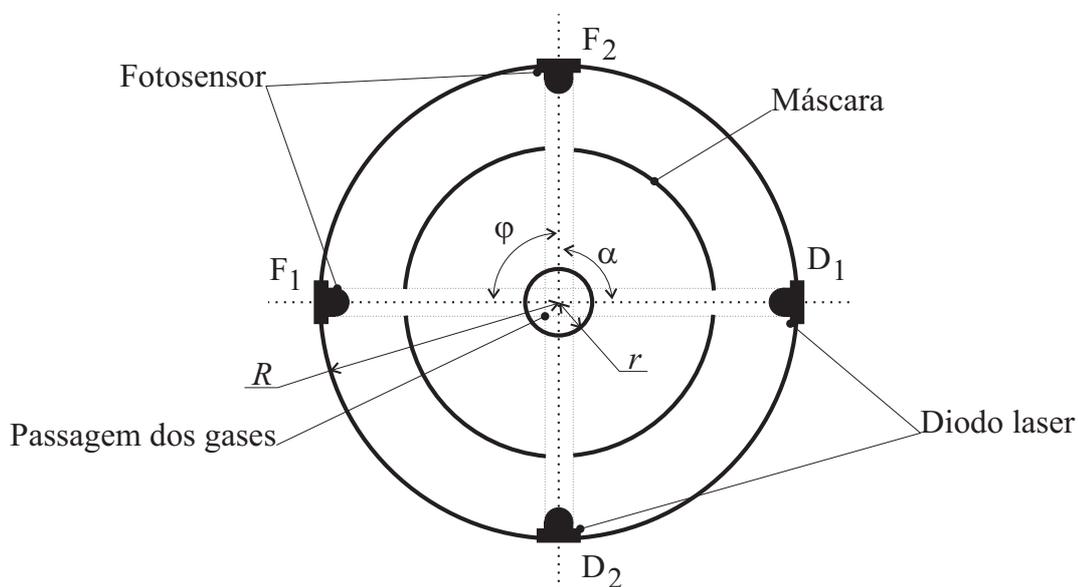


Figura 3.12: Arranjo óptico do dispositivo de medição de concentração de particulados.

Neste sistema tem-se, então, quatro expressões baseadas na intensidade de luz captada pelos fotosensores (F_1 e F_2) que são inseridas no algoritmo de cálculo da concentração de particulados, em função do nível de opacidade (atenuação) e reflexão (espalhamento) provocado pelos gases de exaustão. A medição da atenuação luminosa é feita com o

arranjo onde os fotosensores (F_1 e F_2) estão no lado oposto dos diodos laser (D_1 e D_2), onde as equações (3.10) e (3.11) expressam a luz captada pelos fotosensores.

$$P(F_1, D_1) = A_1 P_{01} T(F_1, r) T(r, D_1) \quad (3.10)$$

$$P(F_2, D_2) = A_2 P_{02} T(F_2, r) T(r, D_2) \quad (3.11)$$

No qual:

- $P(F_1, D_1)$ expressa a intensidade de luz atenuada de D_1 captada por F_1 ;
- $P(F_2, D_2)$ expressa a intensidade de luz atenuada de D_2 captada por F_2 ;
- A_1 e A_2 representam a constante de captação do fotosensor;
- P_{01} e P_{02} representam a intensidade luminosa emitida pelos diodos laser D_1 e D_2 respectivamente;
- $T(F_1, r)$ e $T(F_2, r)$ expressam o nível de atenuação na radiação luminosa nos percursos de r a F_1 e de r a F_2 ; respectivamente;
- $T(r, D_1)$ e $T(r, D_2)$ expressam o nível de atenuação na radiação luminosa nos percursos de D_1 a r e de D_2 a r respectivamente.

Para medir a intensidade da luz espalhada pela amostra de gás analisada, o arranjo é feito com os fotosensores (F_1 e F_2) posicionados perpendicularmente aos diodos laser (D_1 e D_2), onde a luz captada tem sua intensidade representada pelas equações (3.12) e (3.13).

$$P_\varphi(F_1, r, D_2) = A_1 P_{02} \delta_\varphi(r) T(F_1, r) T(r, D_2) \quad (3.12)$$

$$P_\varphi(F_2, r, D_1) = A_2 P_{01} \delta_\varphi(r) T(F_2, r) T(r, D_1) \quad (3.13)$$

No qual:

- $P_\varphi(F_1, r, D_2)$ expressa a intensidade de luz proveniente de D_2 espalhada pela amostra captada por F_1 a um ângulo φ (no caso 90°);
- $P_\varphi(F_2, r, D_1)$ expressa a intensidade de luz proveniente de D_1 espalhada pela amostra captada por F_2 a um ângulo φ ;
- $\delta_\varphi(r)$ expressa o coeficiente volumétrico para emissões luminosas espalhadas no ponto r a um ângulo φ .

Os níveis de atenuação da intensidade luminosa no percurso de r , $T(F_1, r)$, $T(F_2, r)$, $T(r, D_1)$ e $T(r, D_2)$ são expressos por:

$$T(F_1, r) = \exp \left\{ - \int_{F_1}^r \varepsilon(r) dr \right\}; \quad (3.14)$$

$$T(F_2, r) = \exp \left\{ - \int_{F_2}^r \varepsilon(r) dr \right\}; \quad (3.15)$$

$$T(r, D_1) = \exp \left\{ - \int_r^{D_1} \varepsilon(r) dr \right\}; \quad (3.16)$$

$$T(r, D_2) = \exp \left\{ - \int_r^{D_2} \varepsilon(r) dr \right\}. \quad (3.17)$$

O coeficiente de extinção do meio particulado no ponto r , representado por $\varepsilon(r)$ pode ser expresso por:

$$\varepsilon(r) = k(r) + \delta(r) \quad (3.18)$$

sendo $k(r)$ o fator de absorção da luz incidente sobre o material particulado em análise, e $\delta(r)$ o coeficiente volumétrico para emissões luminosas espalhadas no ponto r , que para um determinado ângulo φ é determinado por:

$$\delta_\varphi(r) = \frac{M}{\rho} \frac{d\delta}{d\varphi}. \quad (3.19)$$

Na expressão (3.19), M é a concentração de massa no aerosol de particulados (fuligem ou nuvem de particulados) contidos nos gases de exaustão em análise; ρ é a densidade das partículas de aerosol; $\frac{d\delta}{d\varphi}$ expressa a seção transversal de espalhamento luminoso no ângulo φ do aerosol de partículas analisado.

Dividindo-se o produto de (3.12) e (3.13) pelo produto de (3.10) e (3.11) obtém-se:

$$\delta_\varphi(r) = \frac{P_\varphi(F_1, r, D_1)P_\varphi(F_2, r, D_2)}{P(F_1, D_1)P(F_2, D_2)}. \quad (3.20)$$

Substituindo-se então (3.20) em (3.19) obtém-se (3.21), que expressa a concentração de massa no aerosol de particulados em função da intensidade de luz captada pelos foto-sensores (F_1 e F_2) nas condições de atenuação e espalhamento luminoso.

$$M = \frac{\rho}{d\delta/d\varphi} \frac{P_\varphi(F_1, r, D_1)P_\varphi(F_2, r, D_2)}{P(F_1, D_1)P(F_2, D_2)} \quad (3.21)$$

A metodologia para a medição de concentração de fumaça em gases de exaustão apresentada por Drozd, Kugeiko e Firago utiliza um sistema embarcado para o monitoramento da leitura múltiplos sensores, se destacando por associar tanto a atenuação como o espalhamento luminoso para determinar a concentração de particulados de carbono no gases analisados.

3.6 Espalhamento Luminoso (*Light Scattering*)

Como visto na seção 3.3, o processo de extinção de uma radiação luminosa que transpassa uma substância não homogênea é provocada pela absorção e pelo espalhamento desta luz devido às partículas em suspensão no meio em análise de modo que

$$\text{Extinção} = \text{Absorção} + \text{Espalhamento}. \quad (3.22)$$

No processo de turbidimetria, a análise da concentração de partículas é feita baseada na extinção da luz emitida como um todo, de modo que é possível apenas determinar a concentração de partículas no meio em análise. Assim, a forma como a luz é extinta (espalhamento ou absorção) não é considerada como é o caso dos opacímetros.

O estudo do espalhamento luminoso de um conjunto de partículas em uma substância pode revelar características importantes referentes à sua composição. O espalhamento de ondas eletromagnéticas incidentes em qualquer substância, está relacionado com a heterogeneidade na estrutura do sistema, tanto a uma escala molecular, como a uma escala de um agregado de moléculas (BERNE; PECORA, 2000).

Uma substância é composta por cargas elétricas discretas: elétrons e prótons. Caso um obstáculo, podendo ser: desde um átomo apenas, passando por uma molécula, ou até uma partícula, seja irradiada (iluminada) por uma onda eletromagnética, as cargas elétricas deste obstáculo entrarão em movimento oscilatório causado pelo campo elétrico da onda incidente conforme mostrado na Figura 3.13. As cargas elétricas aceleradas irradiarão energia eletromagnética em todas as direções, provocando uma irradiação secundária que é chamada de irradiação espalhada pelo obstáculo. Deste modo, o espalhamento luminoso é dado pela soma das energias de excitação e de reirradiação das partículas iluminadas.

A absorção de luz é a transformação da onda eletromagnética incidente em outras formas de energia, como a térmica, por exemplo. A absorção e o espalhamento de luz são processos mutuamente independentes (BOHREN; HUFFMAN, 1998, p.4).

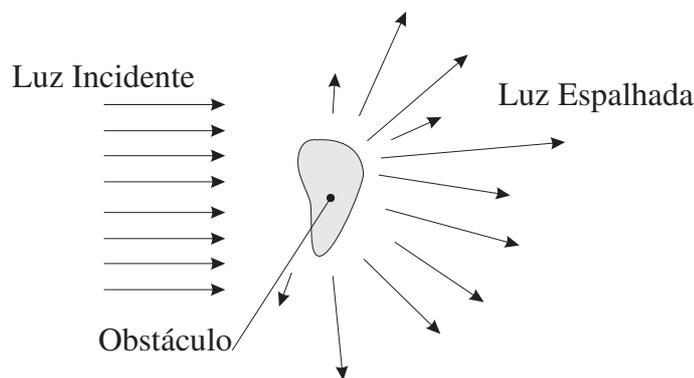


Figura 3.13: Espalhamento de luz por um obstáculo.

O estudo do espalhamento luminoso, apresentado neste trabalho assume que a onda eletromagnética espalhada pelo obstáculo tem a mesma frequência da onda incidente, sendo denominado de espalhamento elástico ou coerente.

Mesmo em meios considerados homogêneos como os gasosos, os líquidos ou sólidos puros, é possível distinguir-se heterogeneidades individuais (átomos e moléculas). Deste modo, qualquer meio pode espalhar uma radiação eletromagnética incidente (no estudo em particular, a luz). Em meios estatisticamente homogêneos, as flutuações de concentração apresentadas podem inferir de forma sutil na intensidade e na direção que a luz incidente é espalhada.

Um copo com água mineral ou o ar atmosférico em uma sala, podem ser considerados um meio estatisticamente homogêneo. Excetuando as flutuações de concentração de matéria, a luz que transpassa estes meios, não sofrerá interferência por espalhamento. Porém, qualquer tipo de partícula (por exemplo, um agregado bem definido de muitos átomos e moléculas) que por ventura esteja suspensa nestes meios, provocará o espalhamento da luz incidente. Vale salientar que a heterogeneidade molecular do meio e as flutuações de densidade podem ser consideradas desprezíveis quando comparada com a heterogeneidade causada pela partícula em suspensão.

O formato de uma partícula é bastante complexo. Deste modo a luz incidente será espalhada em diversas direções apresentando intensidades diferentes. Tanto a forma, como a composição molecular da partícula, pode interferir na intensidade e na direção que a luz incidente irá se espalhar (ângulos de espalhamento), conforme mostrado na Figura 3.14.

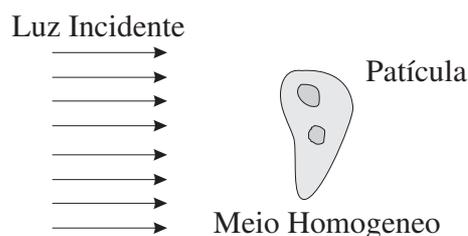


Figura 3.14: Interação da luz com uma partícula.

3.6.1 Intensidade da luz espalhada

O choque de uma radiação laser com uma macromolécula, induz um dipolo oscilatório na mesma frequência da oscilação da luz incidente, provocando assim, uma reirradiação do campo elétrico. De acordo com a Figura 3.15, a intensidade da luz reirradiada depende da magnitude do dipolo induzido na macromolécula. Quanto mais polarizada a macromolécula for, maior será o dipolo induzido, provocando conseqüentemente uma maior reirradiação da onda incidente, ou seja, a intensidade da luz espalhada está ligada diretamente ao nível de polarização da molécula em análise. No entanto, esta caracterização é dada de forma mais precisa quando o meio (solução) no qual as partículas estão suspensas, apresenta baixos índices de refração. Antes de se caracterizar uma solução através do espalhamento luminoso por ela provocado, é necessário conhecer seu nível de polarização, que é medido através de um refratômetro.

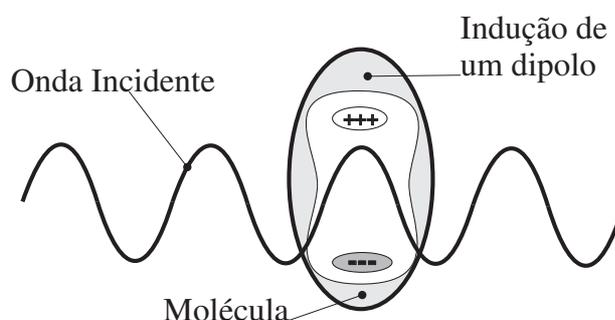


Figura 3.15: Interação da luz com uma partícula.

Quando duas moléculas (monômeros) estão agregadas formando um dímero, e cada uma delas desenvolve um movimento browniano independente da outra, a luz espalhada por este agregado apresentará uma fase (ângulo) de espalhamento diferente. Esta aleatoriedade de movimento das partículas caracteriza o espalhamento incoerente, ou seja, o comprimento de onda da radiação luminosa incidente sofre influência do meio particulado. No caso em que as moléculas do dímero movem-se juntas, cada um dos monômeros espalhará a luz incidente na mesma fase, caracterizando o espalhamento coerente. Além da não interferência na fase, no espalhamento coerente, a luz incidente não sofre influência

no seu comprimento de onda.

A intensidade do espalhamento provocado por um agregado de n moléculas que se move juntamente é n vezes maior do que a luz espalhada por n moléculas que se movem separadamente. A intensidade da luz espalhada por uma molécula é proporcional a sua massa molar. Assim, esta intensidade espalhada exprime diretamente a massa do agregado de moléculas (WYATT TECHNOLOGY, 2006).

3.6.2 Diagrama de Espalhamento e Função de Fase

A propriedade mais importante de uma onda espalhada é a intensidade de sua reirradiação. A onda incidente e a onda espalhada em qualquer ponto de seu campo são unidirecionais, ou seja, cada onda espalhada está confinada em sua respectiva fase e intensidade. Não só a intensidade caracteriza a natureza de uma molécula ou agregado de moléculas (partícula), como também as propriedades de polarização e fase também são importantes. A fase do espalhamento da luz não pode ser medida diretamente, pois é necessário o deslocamento da fotocélula para que seja possível a leitura da intensidade do espalhamento da luz ao redor do agregado de moléculas.

A luz espalhada em qualquer ponto distante do campo possui características de uma onda esférica, no qual sua energia flui diretamente a partir do choque com a partícula submetida a radiação incidente. A direção do espalhamento é definida por θ , que corresponde ao ângulo formado entre a direção da luz incidente e a direção da luz espalhada, como mostrado na Figura 3.16.

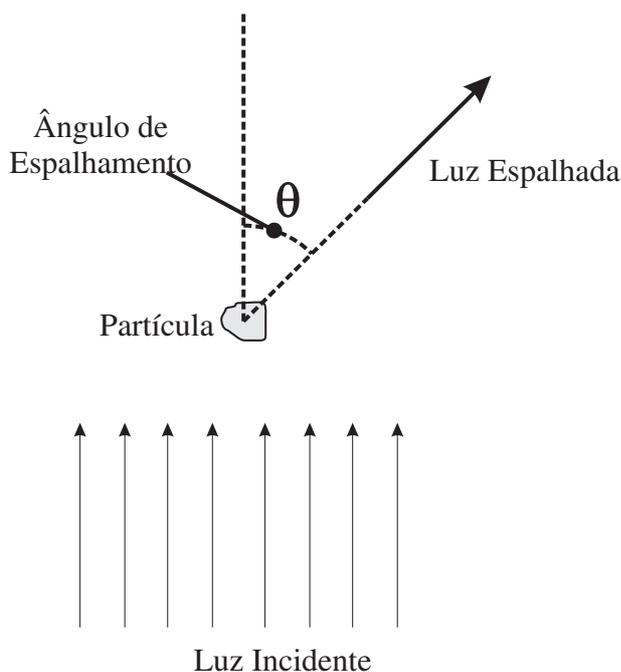


Figura 3.16: Definição do ângulo de espalhamento.

Considerando a intensidade da luz incidente como I_0 , a intensidade da luz espalhada ($I_{\text{espalhada}}$) dependerá da distância do ponto de medição à partícula (r) e do fator κ , que neste caso é definido por

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3.23)$$

no qual λ é o comprimento de onda da luz incidente.

Deste modo, $I_{\text{espalhada}}$ é definido pela equação

$$I_{\text{espalhada}} = \frac{I_0 F(\theta, \varphi)}{\kappa^2 r^2}, \quad (3.24)$$

no qual $F(\theta, \varphi)$ é adimensional e depende da orientação da partícula em relação à luz incidente e de seu ângulo de polarização (φ).

Os valores relativos de $I_{\text{espalhada}}$ ou de F podem ser representados em um diagrama polar em função do ângulo de espalhamento θ , formando uma representação do plano de espalhamento (espalhamento isotrópico). Este diagrama é chamado de diagrama de espalhamento de uma partícula (HULST, 1981)

3.7 Conclusão

Neste capítulo foram abordadas diversas técnicas para determinação da quantidade de particulados de carbono contida nos gases de exaustão de motores do ciclo diesel que serão base fundamental para a estruturação da plataforma apresentada neste trabalho.

A metodologia de análise a partir da escala de Ringelmann apresentada na seção 3.1, mesmo sendo bastante empregada por órgãos reguladores, como o COMTRAM (ABNT, 1986) se baseia em uma análise humana, que está sujeita a várias interferências do meio. Todavia, esta técnica mostra claramente que o nível de concentração de particulados de carbono (fuligem) está diretamente associado às propriedades luminosas da fumaça de exaustão de um motor diesel.

A partir do nível de impregnação de particulados em um filtro branco, a técnica apresentada na seção 3.2 mostra uma forma eletrônica de análise, onde através de uma fotocélula mede-se a quantidade o nível de concentração de particulados pela reflexão de uma fonte luminosa conhecida. Neste ponto pode-se identificar a necessidade de fotossensores para se estabelecer medições mais precisas.

O processo de extinção luminosa o qual se baseia o opacímetro apresentado na seção 3.4 apresenta uma metodologia para uma análise contínua do fluxo, além de se caracterizar pela portabilidade e capacidade de embarcar-se em veículos diesel.

A metodologia para a medição de concentração de fumaça em gases de exaustão em um dispositivo acoplado ao cano de descarga apresentado na seção 3.5.2 se caracteriza

como um ponto de partida fundamental para o desenvolvimento da plataforma apresentada neste trabalho, uma vez que a absorção e o espalhamento luminoso são associados em um único instrumento. Além da geometria utilizada para a concepção do dispositivo, a utilização de um sistema embarcado para monitoramento e controle dos sensores demonstra a necessidade de plataformas processadas para este tipo de análise.

O fenômeno de espalhamento luminoso (seção 3.6) caracteriza-se por ser uma das principais bases do arcabouço teórico que foi estudado para o desenvolvimento deste trabalho. A intensidade da luz reirradiada por um conjunto de partículas em suspensão em um meio translúcido, está diretamente ligada a concentração dessas partículas. O ângulo que esta luz é reirradiada, ou seja, espalhada, está diretamente ligado à natureza da composição química das partículas submetidas à radiação luminosa.

Como qualquer partícula em suspensão em um meio fluido, os particulados de carbono suspenso nos gases de exaustão de um motor diesel, apresentam um movimento aleatório ou browniano. A turbulência gerada pelo movimento de exaustão do cilindro e os diferentes tamanhos das partículas em análise tornam uma determinação precisa da composição dos particulados em função da luz espalhada tarefa não trivial (BERNE; PECORA, 2000).

Todavia, a análise da intensidade da luz espalhada em vários ângulos pode viabilizar uma determinação mais precisa da concentração dos particulados no meio analisado, uma vez que a atenuação da radiação luminosa incidente é função da absorção e do espalhamento.

Capítulo 4

Material e Métodos

Este capítulo tem como objetivo, descrever os sistemas implementados para os testes iniciais do Sistema Embarcado para Medição de Particulados de Carbono em Emissões de Motores do Ciclo Diesel. Na Seção 4.1, um sistema de aquisição de dados de baixo custo interligado a um PC é implementado a partir de uma placa de desenvolvimento para os microcontroladores ADuC (ANALOG DEVICES, 2003). Para tal aplicação, um *firmware* específico foi criado, possibilitando a comunicação do PC com o microcontrolador que, por sua vez, possui o programa em questão gravado, estabelecendo assim uma interface de alto nível.

A validação do espalhamento luminoso, como um parâmetro importante a ser medido é dada na Seção 4.2 a partir de uma plataforma de testes desenvolvida. A fonte de radiação luminosa consiste em um diodo laser pulsado. Um fotodiodo detecta a luz espalhada a 90° por um fluxo de fumaça, no qual um amplificador sintonizado seleciona o sinal correspondente. Todo o *hardware* da Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem está confinado em uma placa, sendo controlado pela placa de desenvolvimento para microcontroladores ADuC.

4.1 Módulo de Aquisição de Dados e Controle MADC

O sistema de aquisição de dados e controle utilizado para o desenvolvimento da prova do conceito do espalhamento luminoso para detecção de fumaça, foi todo baseado numa placa de desenvolvimento para microcontroladores ADuC (ARAUJO et al., 2005b), da *Analog Devices*. A Placa de Desenvolvimento para Microcontroladores ADuC (PD-ADuC), descrita em detalhes no apêndice A, caracteriza-se como uma plataforma de estudo e desenvolvimento de aplicações, cujos elementos primordiais são os microcontroladores ADuC. Devido à disponibilidade de recursos de hardware para aquisição de dados e controle, foi programado um *firmware* com a finalidade de transformar a PD-ADuC em uma interface com

sistemas externos para o PC. O *firmware* criado juntamente com a PD-ADuC formam uma nova ferramenta denominada Módulo de Aquisição de Dados e Controle ou MADC. Um diagrama esquemático com o *firmware* criado é mostrado na Figura 4.1.

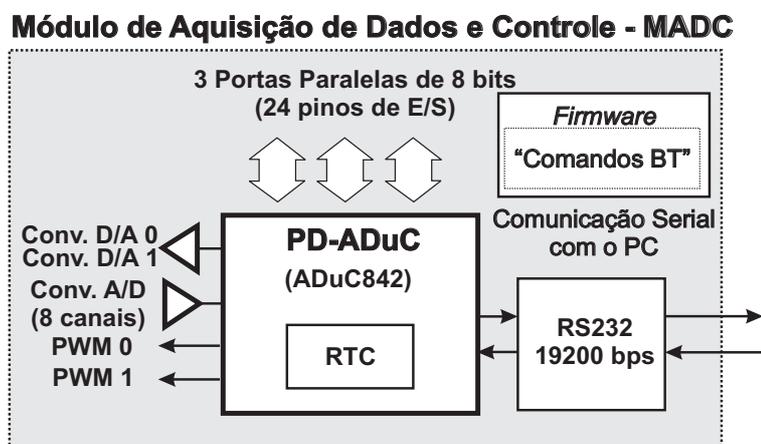


Figura 4.1: *Firmware* dos "Comandos BT" gravado na PD-ADuC formando o MADC.

A comunicação entre o MADC e o PC é feita de forma serial com um barramento RS232. Os "Comandos BT", consistem em um conjunto de comandos com caracteres em ASCII, que viabiliza a transferência de valores medidos e comandos entre PC e MADC (ARAÚJO et al., 2005a). Já gravados no *firmware* do MADC, os "Comandos BT" são implementados em rotinas de aquisição de dados e controle no MATLAB. Assim, o sistema de instrumentação pode ser implementado de forma que o processamento dos sinais de entrada e de saída fiquem no PC.

4.2 Plataforma de Testes

Um dos passos iniciais para a realização deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma plataforma de testes para validação do sistema de detecção de particulados de carbono baseado em espalhamento luminoso. Mesmo se tratando de uma prova de conceito a solução de *hardware* projetada encontra-se bem próxima da solução final.

A prova de conceito, no entanto detecta apenas a presença de fumaça através do espalhamento luminoso de uma luz laser incidente (SYSTEM SENSOR, 2006), de modo que o sistema não se caracteriza como um instrumento de medição. Porém o *hardware* desenvolvido apresenta circuitos, metodologias e componentes utilizados em sistemas de instrumentação eletrônica.

A plataforma desenvolvida utiliza um tubo de PVC para guiar o fluxo da fumaça de teste até o conjunto óptico, que consiste num apontador laser como fonte de luz incidente e um fotodiodo integrado OPT101 da *Burr-Brown* (BURR-BROWN, 1998b) para detectar a luz espalhada (Figura 4.2)

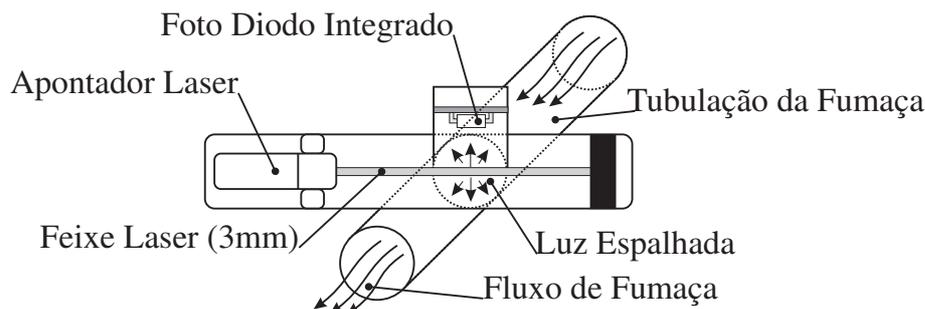


Figura 4.2: Diagrama do sistema óptico da plataforma de testes.

Quando o fluxo de fumaça atravessa o feixe laser, a luz será espalhada em várias direções, obedecendo a um diagrama polar de espalhamento que é característico para cada tipo de particulado componente da fumaça em análise (Figura 4.3 a). O fotodiodo está posicionado a 90 graus em relação ao feixe laser e captura a luz espalhada neste ângulo (Figura 4.3 b). De acordo com o arranjo montado, a partir de experimentos simples, observou-se que a intensidade luminosa é proporcional à quantidade de fumaça, ou seja, o número de partículas que farão o espalhamento luminoso é maior.

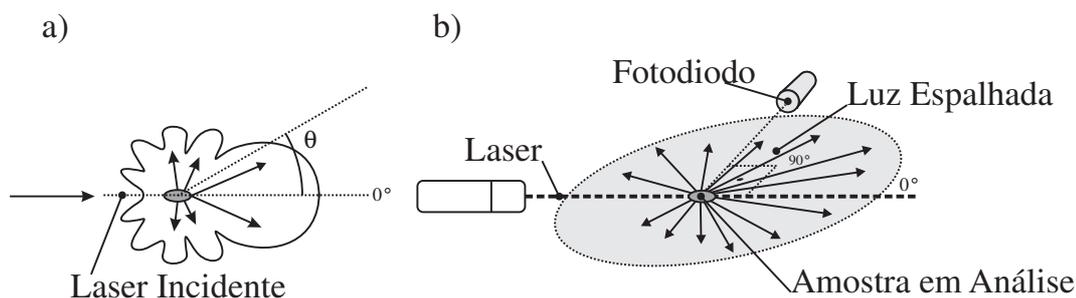


Figura 4.3: a) Diagrama Polar do espalhamento luminoso de uma amostra; b) Leitura da luz espalhada em 90°

A estrutura de aquisição de dados da plataforma de teste é baseada no MADC. Deste modo, os sinais analógicos referentes às leituras do fotodiodo, serão transmitidos para o PC, onde os dados serão analisados. Com o auxílio do MATLAB, os "Comandos BT" correspondentes são transmitidos para o MADC, solicitando a leitura do canal do conversor A/D do microcontrolador ADuC que corresponde ao sinal do fotodiodo. Na Figura 4.4 mostra-se o diagrama de conexão entre o PC, o MADC e a Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem.

O diodo laser utilizado na plataforma é vermelho, e apresenta um comprimento de onda (λ) de 670 nm (TOSHIBA, 2002). Mesmo que a câmara de espalhamento esteja bem fechada, é necessário que a luz laser incidente seja modulada. Nesta situação a interferência da luz ambiente será a menor possível, uma vez que o sinal sensibilizado pelo fotodiodo é filtrado e apenas a frequência do sinal modulado é detectada. Para aumentar a sensibilidade do sistema, dois amplificadores de instrumentação estão ligados em cascata (PERTENCE, 2003).

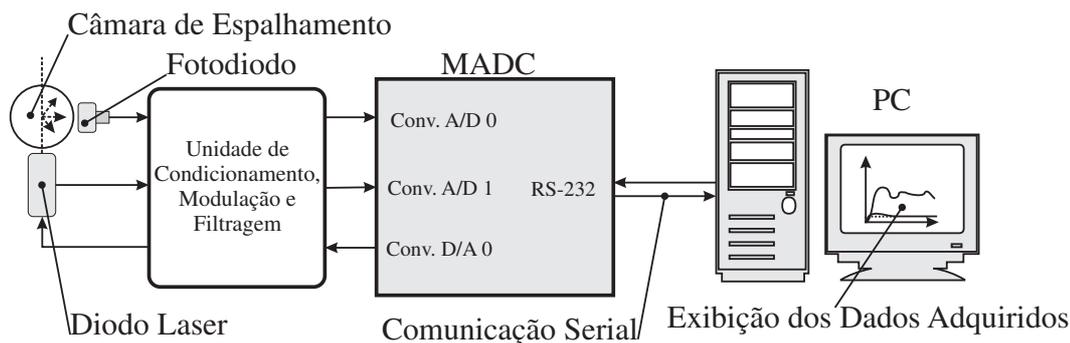


Figura 4.4: Conexão do Sistema de Leitura do Espalhamento Luminoso e o PC.

A intensidade da luz espalhada por uma amostra, é diretamente proporcional à luz incidente, assim, a qualidade da leitura do sistema depende da estabilidade da luz incidente. Para controlar o brilho do diodo laser, um sistema de controle de corrente foi implementado, visto que a intensidade luminosa da radiação laser emitida depende da intensidade de corrente que polariza o diodo. O programa executado no MATLAB possui uma rotina de controle, que através de "Comandos BT" realiza a leitura da corrente do laser e a escrita do valor que deve ser aplicado pela fonte de corrente a cada passo de aquisição dos dados da leitura do espalhamento luminoso.

A fumaça utilizada para os testes em laboratório foi produzida a partir da queima de pasta de soldagem com a ponta quente de um ferro de solda, onde através do duto de PVC a fumaça que sobe é direcionada para a câmara de espalhamento, conforme mostrado na Figura 4.5.

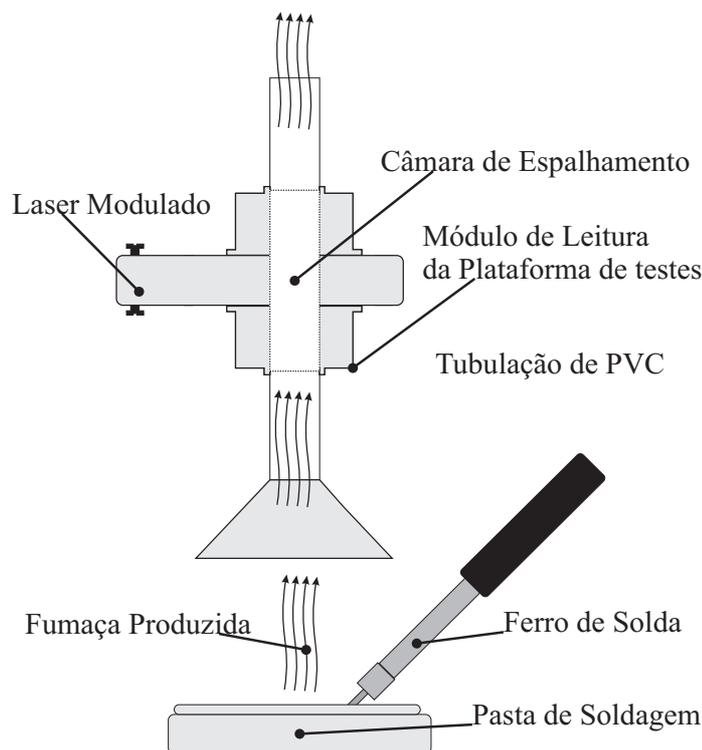


Figura 4.5: Procedimento experimental para medir-se a quantidade de fumaça a partir da queima de pasta de soldagem.

Quando o programa desenvolvido para o MATLAB está em execução, o valor da tensão na entrada do conversor A/D do microcontrolador do MADC (Volts) *versus* a quantidade de amostras é exibido em um gráfico na tela do PC. Com o aumento ou a diminuição da quantidade de fumaça percebe-se claramente que o nível da tensão de saída do sistema de detecção varia proporcionalmente (Figura 4.13).

4.2.1 Sistema de Condicionamento do Sinal de Leitura

O sistema de condicionamento do sinal proveniente do fotodiodo OPT101 consiste em:

- Primeiro estágio de amplificação;
- Filtro Passa Faixa (FPF) de com estágios e frequência central de 4800Hz;
- Segundo estágio de amplificação;
- Sistema de Retificação, Filtragem e *Buffer*;
- Ajuste de *Offset*.

O diagrama geral da Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem é apresentado na Figura 4.6.

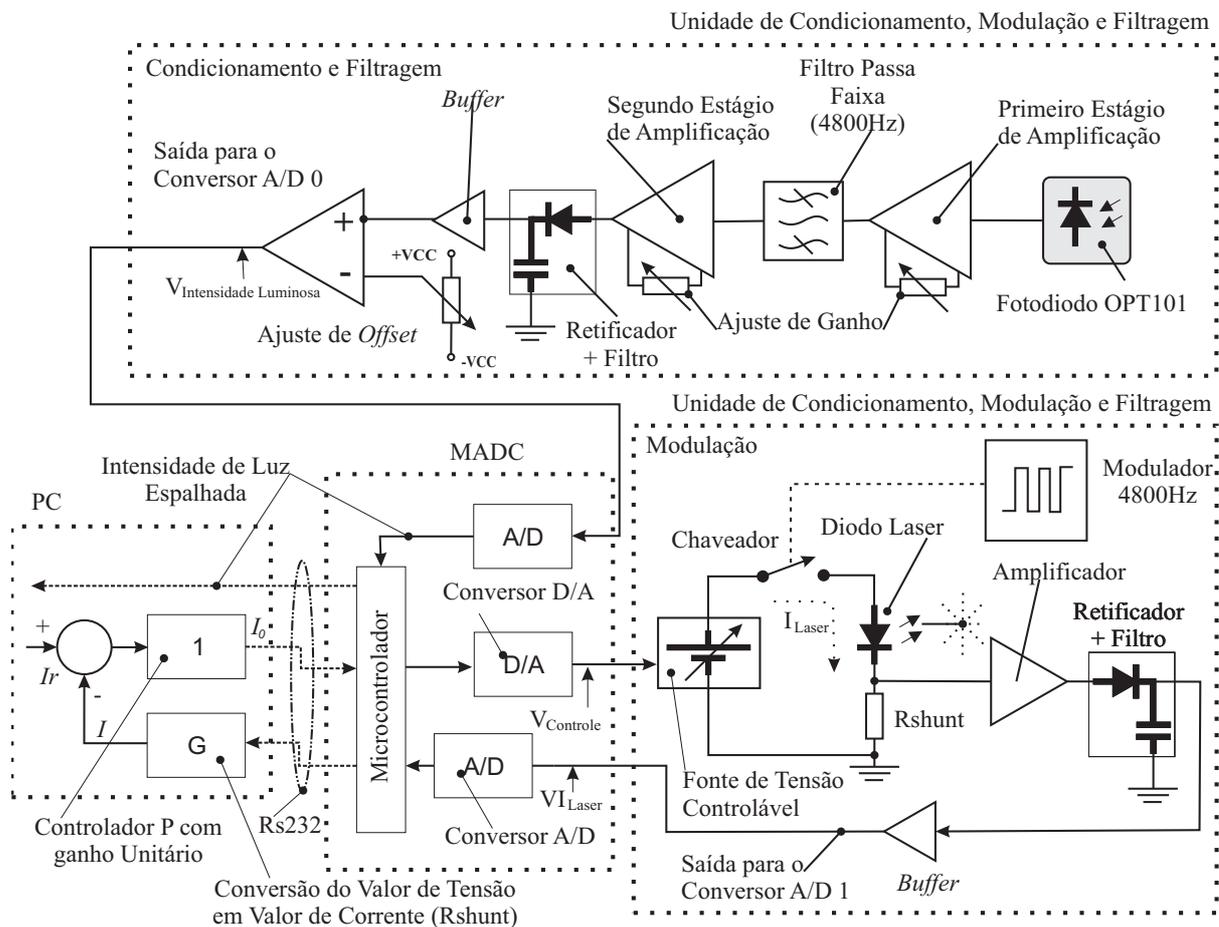


Figura 4.6: Diagrama de Blocos da Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem e Interconexão com o MADC.

O primeiro estágio de amplificação do sinal, trata-se de um amplificador de instrumentação INA101HP da Burr-Brown (BURR-BROWN, 1998a), configurado com um ganho é ajustável de 4,6 a 41. Este primeiro estágio amplifica todos os sinais captados dentro da faixa de comprimento de onda (λ) e de frequência elétrica do fotodiodo sem nenhuma seleção (Figura 4.7).

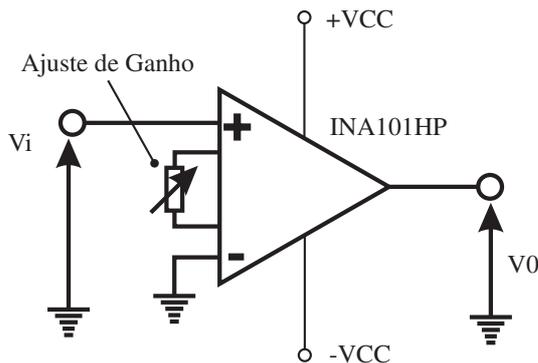


Figura 4.7: Circuito do Amplificador de Instrumentação INA101.

Devidamente pré-amplificado, o sinal do fotodiodo tem amplitude suficiente para passar no processo de filtragem que é feito por dois FPF em cascata com frequência central de 4800Hz, selecionando assim, apenas a componente referente ao sinal do diodo laser modulado. Os FPF estão ligados em cascata para que o fator de qualidade Q ou fator de seletividade aumente. O circuito é montado com base no amplificador operacional TL084 (ST-MICROELECTRONICS, 2001) e possuem uma estrutura MFB (*Multiple-Feedback*), onde o ganho de cada um é 2 e o fator Q é igual a 10 (PERTENCE, 2003, p.195), como mostrado na Figura 4.8.

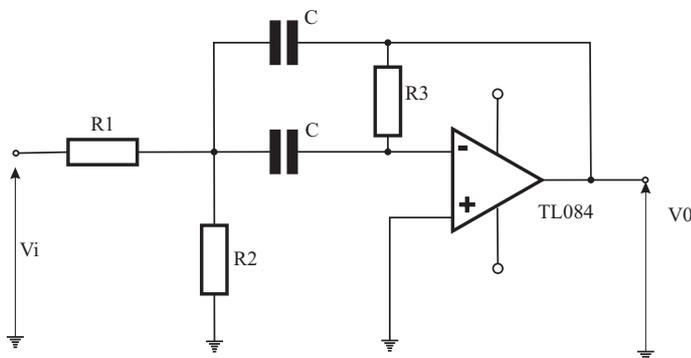


Figura 4.8: Filtro Passa Faixa MFB.

Após a filtragem, o sinal é novamente amplificado no segundo estágio de amplificação, que possui um circuito exatamente igual ao do primeiro estágio.

O processo de retificação e filtragem consistem basicamente em um circuito de demodulação de amplitude (AM), pois a intensidade da luz espalhada está "impressa" na amplitude do sinal filtrado. Um circuito de ajuste de *offset* utiliza um amplificador de instrumentação para fazer a correção do nível DC do sinal lido. Após todo este processamento analógico, um sinal contínuo variando de 0 a 2,5V é transferido para a entrada do conversor A/D do MADC.

4.2.2 Controle de Corrente do Laser

Para a uma análise inicial do desempenho da plataforma de testes, o controlador da intensidade da corrente do diodo laser foi totalmente implementado no PC. A cada amostragem realizada no processo de aquisição do sinal de leitura do foto diodo, uma interação de controle é feita. O controlador de corrente está projetado com o intuito de manter a corrente média que alimenta o diodo laser o mais estável possível, deste modo um controlador Proporcional com ganho unitário foi suficiente para mantê-la constante.

A corrente é medida através da tensão apresentada por um resistor em série (*Rshunt*) com o diodo laser (Figura 4.6). Por consequência da modulação da luz, a corrente do diodo laser é pulsada. Da mesma forma que no circuito condicionamento do sinal do fotodiodo, a tensão do resistor de *shunt* é amplificada, retificada e filtrada, de modo que a envoltória do sinal é proporcional à corrente em interesse. A tensão proporcional à corrente média é transmitida para o PC, onde o valor médio da corrente medida é calculada de acordo com o ganho dado pela etapa de condicionamento. No PC, o controlador toma o valor medido e calcula o sinal de correção que será aplicado na fonte de tensão ajustável que alimenta o diodo laser, e através dos "Comandos BT" transfere para o MADC.

A fonte de tensão ajustável do diodo laser é controlada pela saída do conversor D/A do MADC. O circuito consiste em um amplificador não inversor de ganho igual a 2 com um *driver* de corrente na saída (Figura 4.9).

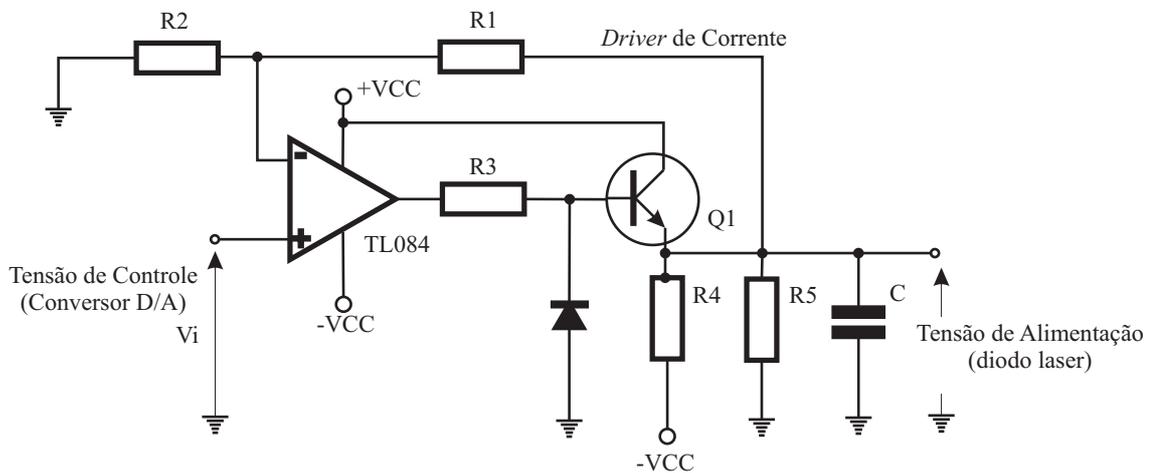


Figura 4.9: Fonte de Tensão Ajustável para o Diodo Laser.

Por se trabalhar na região linear de polarização do diodo laser, um controlador Proporcional (P) de ganho unitário, é suficiente para estabilizar a corrente de excitação. Durante os experimentos, é necessário que a intensidade de corrente seja o mais estável possível, de modo que não há variações no *set-point* de corrente.

4.2.3 Chaveamento do Laser

A luz incidente utilizada no experimento de espalhamento luminoso, precisa ser chaveada (modulada) para que o circuito de detecção faça a leitura apenas da luz do diodo laser. O sensor OPT101 utilizado na montagem é sensível a luz visível e infravermelha, assim qualquer radiação luminosa que esteja contida em sua banda passante será captada. As interferências externas se caracterizam basicamente por iluminação ambiente e radiações térmicas.

Na câmara de análise da plataforma de testes a fumaça em amostra fará o espalhamento de qualquer tipo de radiação luminosa que a atinja. O processo de seleção da fonte correta pode ser feito com relação ao comprimento de onda ou chaveamento (modulação) da radiação incidente.

A primeira delas consiste em selecionar a luz espalhada em função do comprimento de onda, onde apenas a "cor" referente à radiação incidente será analisada. Apesar de ser bastante utilizada em sistemas de espectroscopia, a separação por comprimento de onda é bastante complexa, e requer um conjunto óptico muito refinado e de difícil construção.

A seleção da radiação por chaveamento não precisa de um conjunto óptico muito preciso, uma vez que a separação da fonte de luz incidente é feita eletronicamente. De acordo com o diagrama da Figura 4.6 a medição da intensidade da luz desejada da plataforma de testes é feita por filtragem eletrônica.

O chaveamento do diodo laser é controlado por um oscilador de relaxação baseado em amplificador operacional (SEDRA; SMITH, 2000, p.929) com frequência de 4800Hz (Figura 4.10). Esta frequência foi escolhida sem base em nenhum método formal, porém a mesma encontra-se na faixa de maior sensibilidade do fotodiodo. Além disso, está em uma escala espectral de pulsação (chaveamento) bem mais alta do que qualquer interferência de luz ambiente (movimentações e sombras) e as cintilações das lâmpadas fluorescentes (60Hz). Lâmpadas eletrônicas, também não interferem no sistema, pois sua frequência de pulsação é da ordem de 200KHz (OSRAM, 2006).

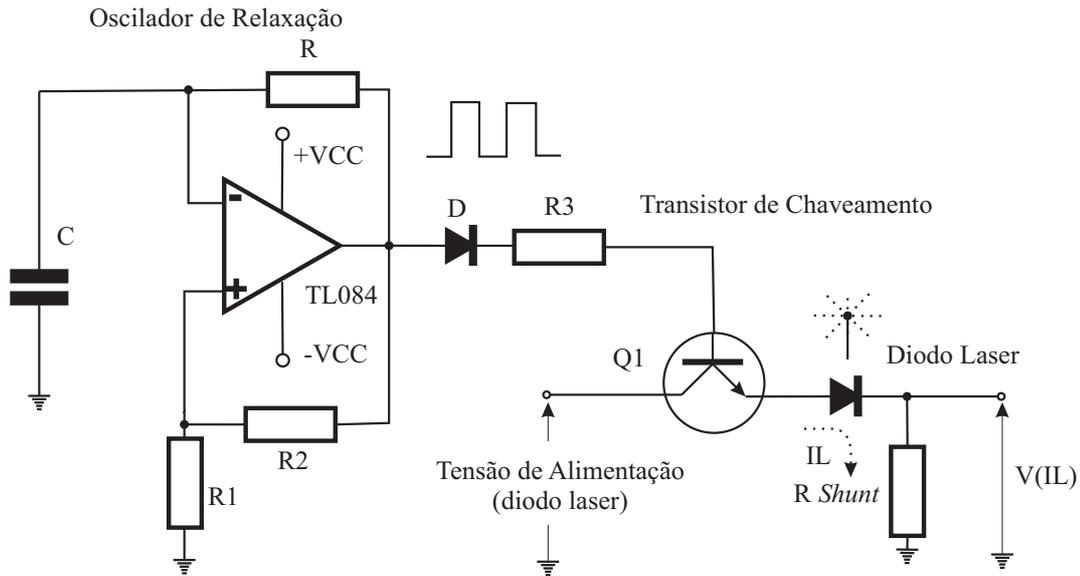


Figura 4.10: Circuito de Chaveamento do Diodo Laser.

O circuito do oscilador de relaxação possui um ajuste fino, de modo que a frequência de modulação fique centrada na faixa de passagem dos FPF do sistema de condicionamento de sinal e leitura. O chaveamento da corrente do diodo laser é feito através de um transistor NPN de uso geral BC337 (FAIRCHILD, 2002) controlado pelo oscilador.

4.2.4 Construção Mecânica do Sistema de Testes

A construção mecânica da plataforma de testes utiliza quatro pedaços de eletrodutos de PVC posicionados perpendicularmente e fixados por uma caixa de conexão feita de alumínio que abriga o fotodiodo. Na Figura 4.11 mostra-se uma vista superior do sistema, e a localização dos componentes eletrônicos. O diodo laser está posicionado logo acima da tubulação de fumaça (Figura 4.12). A luz espalhada é direcionada ao sensor através de um furo de 5mm de diâmetro. O alinhamento do feixe laser que está a 90° do sensor é feito através de quatro parafusos posicionados perpendicularmente (cruz), de modo que o feixe atravesse a tubulação de fumaça sem tocar os furos de 5mm. Caso o feixe que possui um diâmetro de aproximadamente 3mm não esteja perfeitamente alinhado, a radiação incidente tocará as paredes da tubulação, que espalhará luz em várias direções que pode ser captada pelo fotodiodo. O diâmetro do feixe produzido pelo diodo laser é ajustado através de um colimador posicionado em sua parte anterior.

Para evitar acidentes, onde o feixe laser possa ser direcionado aos olhos de alguma pessoa que esteja perto da plataforma de testes durante seu manuseio, um anteparo opaco foi posicionado no lado oposto ao apontador laser. Por ser feito de uma esponja fosca, este anteparo evita que o feixe saia do sistema e "aprisiona" (absorve) uma parte considerável da radiação incidente (*Light Trap*).

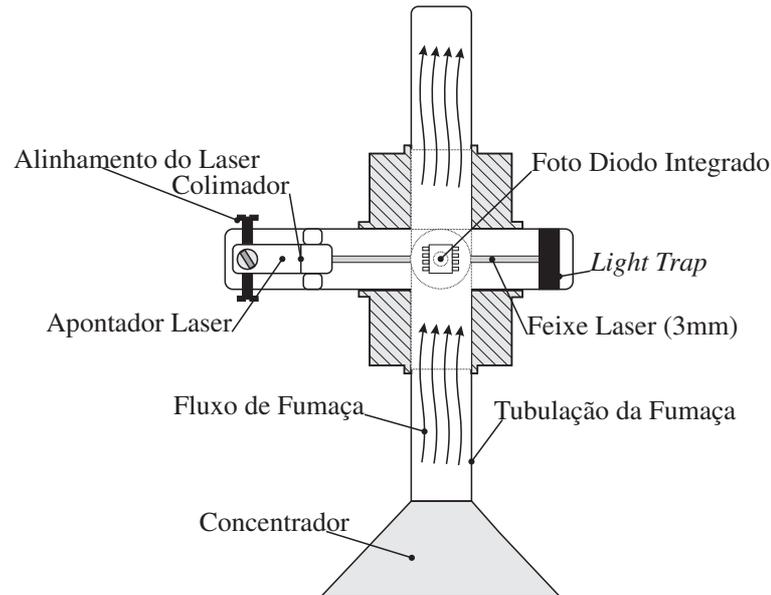


Figura 4.11: Vista Frontal do Módulo de Leitura da Plataforma de Testes.

Para facilitar os testes um concentrador de papel foi posicionado na entrada do tubo, onde a fumaça toda produzida pela queima da pasta de solda era direcionada para a câmara de espalhamento.

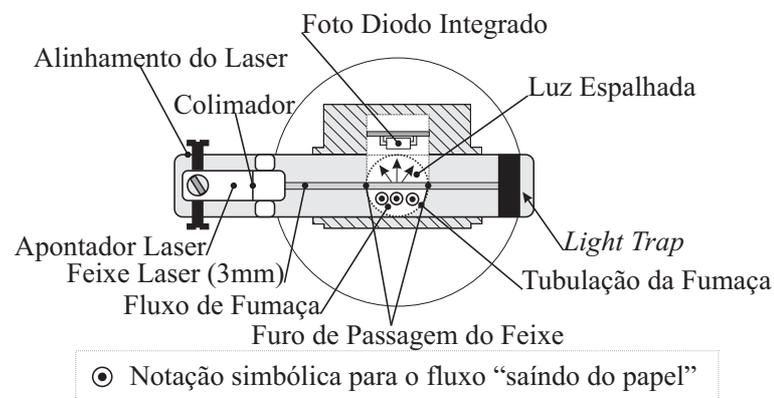


Figura 4.12: Vista Superior do Módulo de Leitura da Plataforma de Testes.

4.2.5 Resposta do Sistema

A plataforma de testes desenvolvida apresentou a validade do espalhamento luminoso para a detecção de níveis de fumaça que passam através de uma tubulação. Onde na Figura 4.13 mostra-se um gráfico referente a variação da intensidade luminosa espalhada a 90° (Volts) proporcional a quantidade de fumaça que atravessa a tubulação. Além da performance do controlador de corrente para o diodo laser.

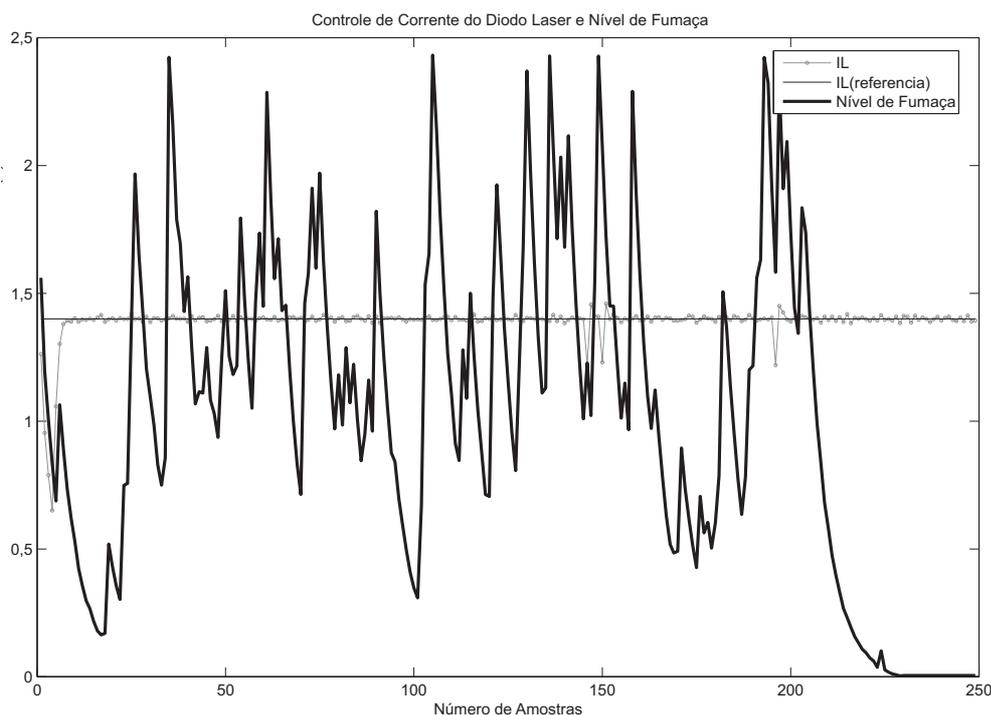


Figura 4.13: Gráfico de Resposta da Plataforma de Testes através do programa de interface com o MADC no MATLAB.

Conforme o gráfico apresentado na Figura 4.13 (IL e $IL_{referência}$), o controlador da corrente P do diodo laser apresentou bom resultado, de modo que o valor ajustado no *set point* manteve-se estável durante os experimentos.

O processo de aquisição de dados e controle do sistema é feito a partir do PC se comunicando com o MADC, onde a placa de desenvolvimento ADuC faz a interface com a unidade de condicionamento de sinal de leitura e controle do laser. O controlador da corrente do laser apresentou bom funcionamento, porém o mesmo está sendo executado no PC, através do programa em MATLAB que faz a aquisição e as iterações de controle. O passo de amostragem do sistema utiliza um tempo de $200ms$.

Para que o sistema apresentado possa fazer uma medição da concentração de fumaça, é necessário aumentar a precisão do arranjo óptico e mecânico. No arranjo óptico, os índices de reflexão das paredes da tubulação, por exemplo, devem ser calculados de modo que reflexões espúrias não interfiram no resultado final da análise. A intensidade de espalhamento luminoso está diretamente ligada ao comprimento de onda da luz incidente, deste modo, um sistema de estabilização desta grandeza deve ser incorporado ao instrumento final. Um conjunto de lentes para focalizar a luz espalhada para a área sensível do fotodiodo, aumentaria significativamente a sensibilidade do sistema.

No que diz respeito à construção mecânica, uma modelagem da dinâmica de escoamento da fumaça deve ser feita de modo que uma estrutura bem projetada minimize as turbulências e descontinuidades no fluxo.

O sistema eletrônico utilizado está bem próximo da versão definitiva, uma vez que os ajustes de polarização e ganho podem ser adaptados a uma nova conformação óptica e mecânica da plataforma.

4.3 Conclusão

O experimento realizado com base na plataforma de testes desenvolvida mostrou que o espalhamento luminoso pode ser utilizado como metodologia de detecção de níveis de partículas contidas em um fluxo de gases provenientes de uma queima. Para a elaboração de um sistema mais confiável, será necessária a construção de um sistema óptico-mecânico refinado o suficiente para realizarem-se medições de forma precisa.

Os principais aspectos que devem ser considerados para a elaboração de um sistema de medição de particulados baseado em espalhamento luminoso são:

- Construção mecânica: precisão e geometria;
- Propriedades ópticas dos materiais utilizados para a construção do sensor: o material deve ser fosco de maneira que a luz refletida pelas paredes da tubulação, por exemplo, não interfira na leitura do sinal espalhado;
- Dinâmica dos gases em amostra na câmara de espalhamento: O nível de concentração de particulados depende da velocidade do fluxo dos gases, além disso, turbulências e descontinuidades no fluxo gasoso podem causar interferências nas leituras;
- Escolha do ângulo de análise do espalhamento: O diagrama polar de uma partícula apresenta os níveis de espalhamento de luz em várias direções que apresenta características específicas de acordo com o material a compõe;
- Comprimento de onda da luz incidente: da mesma forma que o digrama polar, cada partícula tem uma resposta característica ao comprimento de onda em função de seu material.

A PD-ADuC desenvolvida apresenta-se como um recurso de capacidades híbridas, pois permite o desenvolvimento de controladores através do PC, sistemas embarcados (*stand alone*) e sistemas de aquisição de dados. Equipamentos de laboratório como osciloscópio e multímetro podem ser dispensados dos experimentos desenvolvidos, pois os sinais de

entradas, saídas e variáveis intermediárias são observados diretamente na tela do PC (ARAUJO et al., 2005b).

Neste capítulo apresentou-se o MADC construído a partir da PD-ADuC, que consiste no elemento centralizador dos processos de aquisição de dados e controle dos elementos envolvidos. Tanto a plataforma de testes como o sistema embarcado para monitoramento de particulados de carbono, têm como base a utilização do MADC para o sequenciamento das operações de leitura, disponibilização e distribuição dos dados lidos.

A validação do processo de espalhamento luminoso como um sistema de medição do nível de fumaça, foi efetivada a partir da construção de uma plataforma de testes. Esta plataforma caracterizou-se como um passo fundamental na definição da estrutura do Sistema Embarcado de Monitoramento de particulados de carbono, uma vez que a geometria proposta apresentou boa sensibilidade na detecção de fumaça. Realizar o processo de modulação e controle da intensidade de luz emitida (laser) influencia de forma significativa na qualidade da leitura, uma vez que, a luz espalhada pela amostra e capturada pelo fotodiodo (OPT101) deve sofrer influência apenas da fumaça em amostra.

O movimento browniano¹ da fumaça utilizada no teste afeta diretamente o processo de medição de seu nível baseado no espalhamento luminoso provocado. Isto se deve a uma orientação desordenada do fluido. Deste modo as flutuações de concentração dificultam uma determinação precisa da quantidade que atravessa a câmara de espalhamento. Para uma determinação mais exata, percebe-se então, a necessidade de ordenar-se o fluxo do gás em análise, de forma que o mesmo se apresente de forma laminar.

¹O movimento browniano é o movimento aleatório de partículas macroscópicas num fluido como consequência dos choques das moléculas do fluido nas partículas (FERREIRA, 2004).

Capítulo 5

Sistema Embarcado para Monitoramento de Particulados de Carbono

Baseado na metodologia de desenvolvimento apresentada no Capítulo 4, pretende-se então determinar para um protótipo definitivo, um arranjo em que seja possível medir a luz espalhada em diversos ângulos. Nesta situação será então possível levantar-se um diagrama de espalhamento característico para as emissões de particulados de carbono.

5.1 Geometria

Quando o fluxo de fumaça atravessa o feixe laser, a luz é espalhada em várias direções, obedecendo a um diagrama polar de espalhamento que é característico para cada tipo de particulado componente da fumaça em análise conforme mostrado na Figura 5.1 (BOHREN; HUFFMAN, 1998).

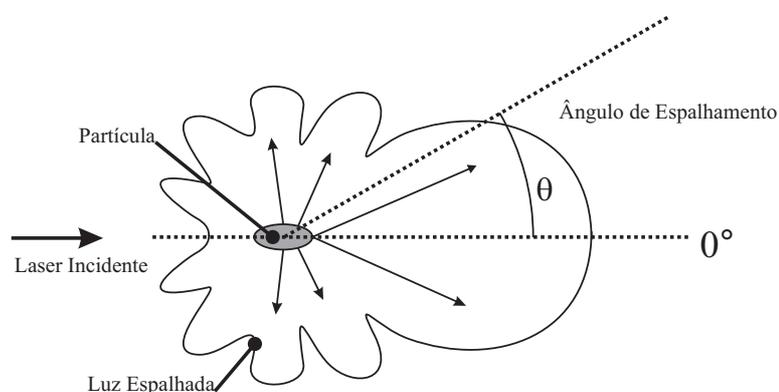


Figura 5.1: Diagrama Polar do espalhamento luminoso de uma amostra.

Em virtude da necessidade de se analisar múltiplos ângulos utiliza-se normalmente equipamentos com a estrutura do *Large Agglomerate Optical Facility* (LAOF) (WEINERT et al., 2002), que consiste em um equipamento com apenas um fotosensor fixado em uma base móvel. De acordo com a Figura 5.2 a base móvel do LAOF permite uma varredura de quase 360° ao redor da amostra em análise.

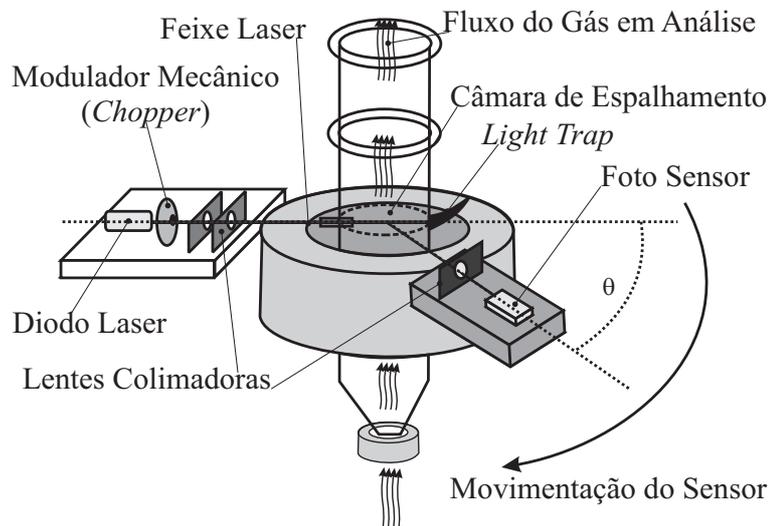


Figura 5.2: Sistema de análise de espalhamento luminoso com fotosensor móvel (LAOF)

Ao movimentar-se a base móvel onde está posicionado o fotosensor do LAOF é possível, então, analisar-se a intensidade da luz espalhada em cada ângulo. Entretanto, esta análise depende de uma estrutura mecânica móvel que está susceptível a falhas de alinhamento e folgas. Além disso, apenas um ângulo é amostrado por vez. A geometria proposta neste trabalho apresenta uma configuração com múltiplos sensores, de forma que vários ângulos sejam cobertos sem a necessidade de peças mecânicas móveis.

Na Figura 5.3 mostra-se a seção transversal da câmara de espalhamento, onde os sensores posicionados em diferentes ângulos, fariam a medição da intensidade da luz espalhada, mediante a quantidade e a qualidade da fumaça em análise (ARAUJO et al., 2006). Esta estrutura foi concebida baseada no trabalho de Charles D. Litton, que apresenta uma câmara de espalhamento luminoso com leituras da intensidade de espalhamento em pontos fixos (LITTON, 2002).

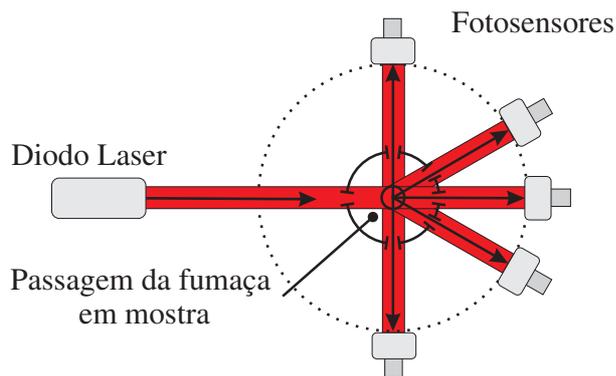


Figura 5.3: Fotosensores posicionados em diversos ângulos para a medição da luz espalhada.

Os sinais de cada um dos sensores são adquiridos por uma plataforma eletrônica (MADC) e transferidos para um sistema de armazenamento e exibição dos valores em um PC. A Plataforma Eletrônica é baseada no MADC, conectada a um sistema de condicionamento de sinal controlado digitalmente, de modo que rotinas para ajustes de *offset* e Controle Automático de Ganho podem ser implementadas junto ao *firmware* do sistema.

5.1.1 Plataforma Mecânica Construída

As plataformas (mecânica e eletrônica) desenvolvidas, tem o propósito de realizar-se o monitoramento da luz espalhada por uma seção transversal de um fluxo contínuo de gases de exaustão do motor diesel estacionário utilizado no laboratório de geração termo-elétrica (SILVA et al., 2005). O sistema constitui-se de uma tubulação em cano PVC (40 mm) que apóia um disco de náilon (160 mm), no qual posiciona-se 23 sensores e um diodo laser. Na Figura 5.4 mostra-se a seção transversal do disco de apoio dos fotossensores e do diodo laser espaçados entre si em 15° .

Todos os 23 sensores e o diodo laser convergem no ponto central do tubo de passagem do fluxo da fumaça de exaustão (Seção Transversal Espalhamento Luminoso). Cada um dos furos que faz o direcionamento da luz espalhada para cada sensor é revestido com um pequeno tubo de de aço inox, minimizando a interferência da luz externa à câmara de espalhamento. A pintura externa da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono, em preto fosco, auxilia também na minimização da interferência de luz externa.

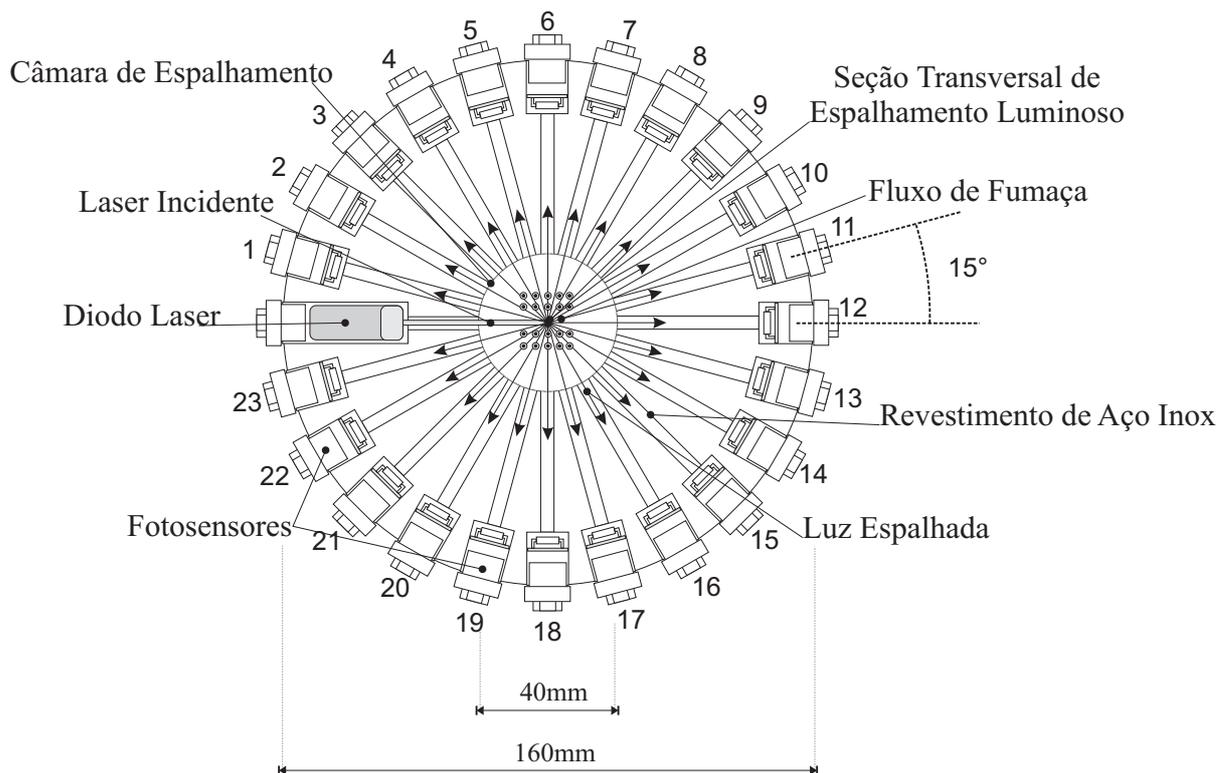


Figura 5.4: Posicionamento dos fotossensores e do diodo laser no disco de náilon da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.

A Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono é dividida em duas partes, a primeira consiste na entrada dos gases analisados (a montante), no qual um tubo de 400 mm de comprimento direciona o fluxo de fumaça até a câmara de espalhamento. O comprimento de tubo é equivalente a 10 vezes o seu diâmetro. O comprimento do tubo após a câmara de espalhamento (a jusante) é de 800 mm, como mostrado na Figura 5.5. A combinação das dimensões a montante e a jusante, permite que o fluxo turbulento se torne o mais próximo possível do fluxo laminar na passagem da câmara de espalhamento (POZRIKIDIS, 2001). Evitando as interferências causadas pela turbulência (oscilações de concentração), pode-se então caracterizar a luz espalhada pelo material particulado em análise de forma mais precisa.

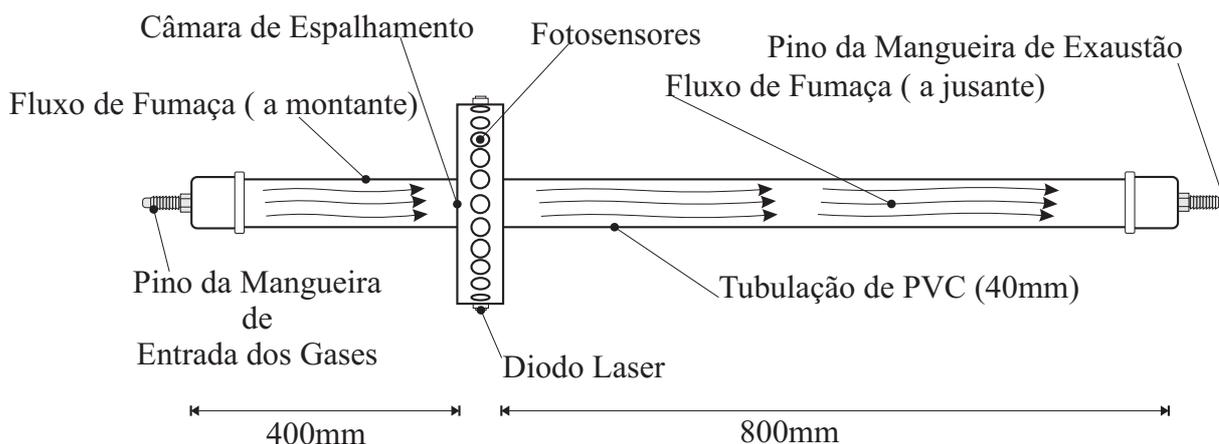


Figura 5.5: Visão lateral da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.

Os fotosensores utilizados para medir a intensidade da luz espalhada dos ângulos determinados pela estrutura da câmara de espalhamento são OPT101 (BURR-BROWN, 1998b), que estão montados em uma pequena placa circular. A fixação tanto dos sensores utilizados como a do diodo laser é feita através de tampas hidráulicas de 3/4", no qual cada uma possui um furo no centro para a passagem do fio de conexão. Na Figura 5.6 mostra-se a fixação dos sensores juntamente com o diodo laser na Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.

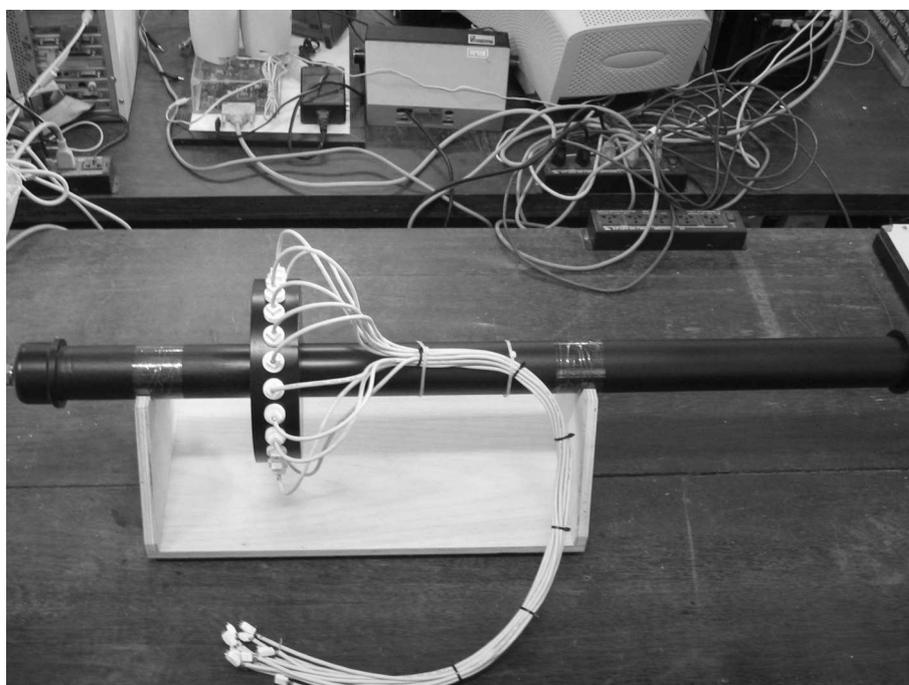


Figura 5.6: Fotografia da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono com os sensores posicionados.

5.2 Sistema de Condicionamento de Sinais

Os sinais de cada um dos sensores são adquiridos por uma plataforma eletrônica (Figura 5.7) e transferidos para um sistema de armazenamento e exibição dos valores em um PC, que consiste em uma rotina em MATLAB.

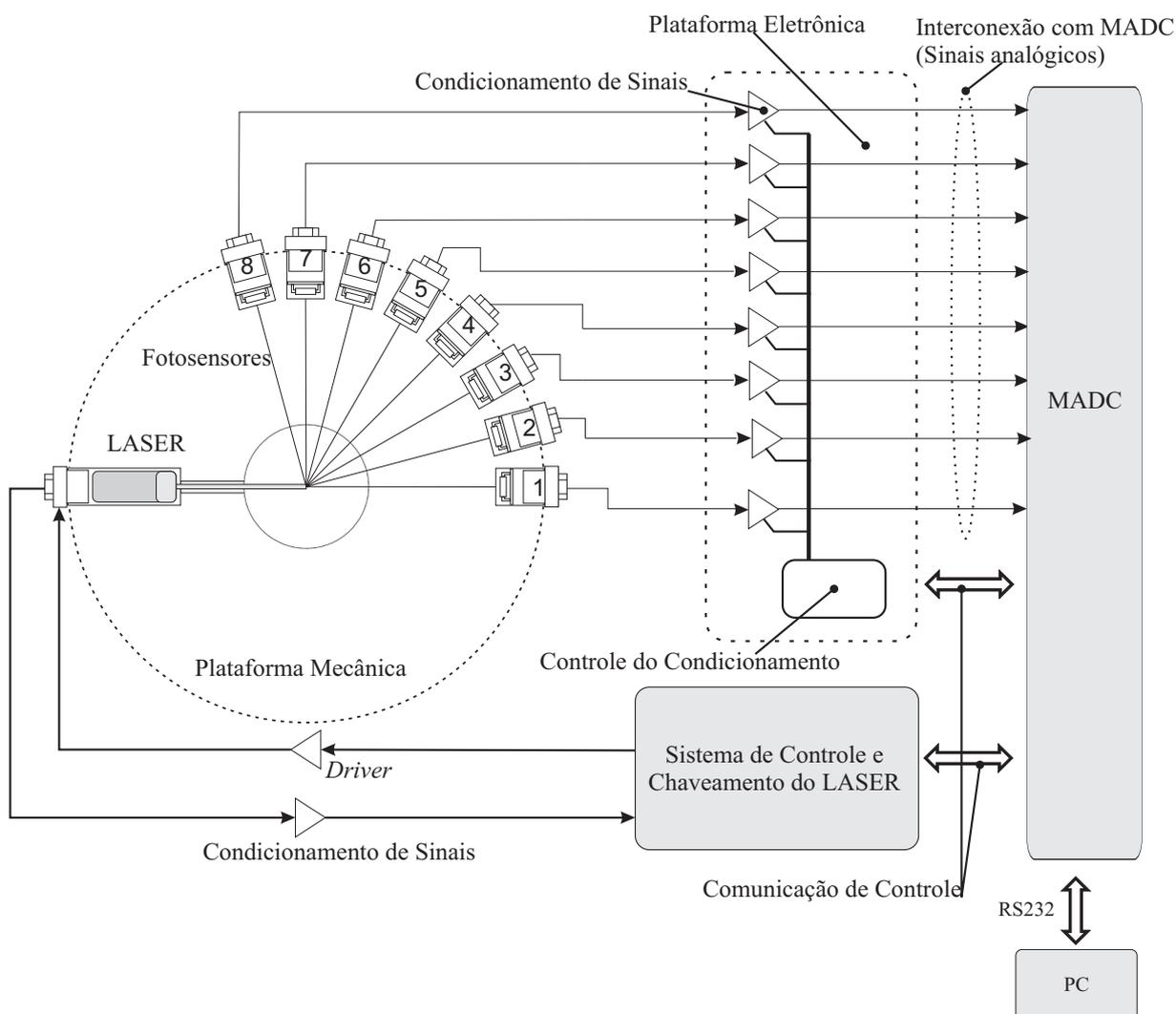


Figura 5.7: Diagrama de Blocos do Sistema Embarcado para Monitoramento de Particulados de Carbono.

Para o desenvolvimento da Plataforma Eletrônica de Monitoramento de Particulados de Carbono, utilizou-se apenas 8 sensores, uma vez que o MADC possui apenas 8 canais analógicos de entrada disponíveis. O Sistema Embarcado é baseado inteiramente no MADC, conectado à Plataforma de Monitoramento de Particulados de Carbono, que consiste em um sistema de condicionamento de sinal controlado digitalmente para cada um dos oito fotosensores (ARAÚJO et al., 2007). As rotinas para ajustes de *offset* e Controle Automático de Ganho podem ser implementadas diretamente no *firmware* do sistema (MADC).

O circuito de sinal da Plataforma Eletrônica de Monitoramento de Particulados de Carbono trata-se de uma placa, onde o condicionamento de sinal das tensões lidas pelos fotosensores é realizado. Funções como ajuste automático de *offset* e ganho são desempenhadas pelos amplificadores de ganho programável, potenciômetro digital, relés e conversores D/A. Para cada sensor, tem-se um circuito de condicionamento de sinal (Figura 5.8).

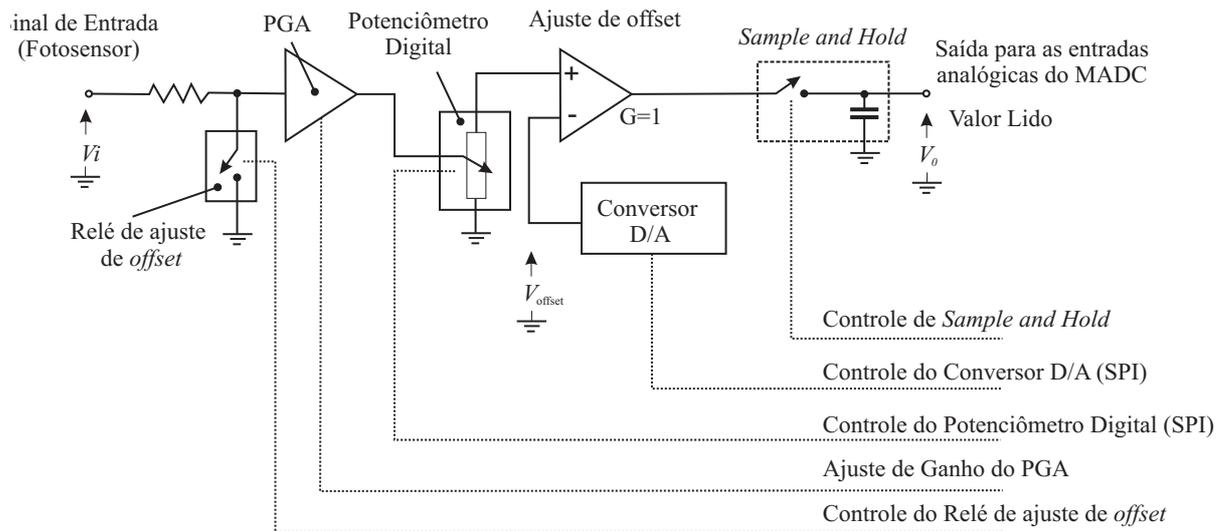


Figura 5.8: Diagrama de Blocos do circuito de condicionamento dos sinais da Plataforma Eletrônica de Monitoramento de Particulados de Carbono.

O circuito de condicionamento de sinal da Plataforma Eletrônica de Monitoramento de Particulados de Carbono possui os seguintes blocos com as respectivas funções:

- O Relé de Ajuste de *offset*, quando acionado, garante que zero *Volt* será aplicado à entrada do Amplificador de Ganho Programável, sendo ele acionado apenas nas etapas precedentes a leitura do valor do sensor.
- O PGA (*Programmable Gain Amplifier*, ou Amplificador de Ganho Programável) é baseado no PGA202 (BURR-BROWN, 1993) que pode ter ganhos de 1, 10, 100 e 1000. O ganho é escolhido a partir da combinação binária de duas linhas de controle (Ajuste de Ganho do PGA).
- O Potenciômetro Digital (AD5206) (ANALOG DEVICES, 1999) possui 256 posições ajustáveis a partir de uma linha de comunicação SPI. Sua finalidade é atenuar o sinal amplificado pelo PGA de entrada, de modo que a associação dos dois elementos proporciona 1024 combinações de ganho conforme a expressão

$$A = \frac{G_{PGA}}{(256 - P_{Pot.Digital})}; \quad (5.1)$$

Onde, A é o Ganho da associação entre o PGA e o Potenciômetro Digital, G_{PGA} é o ganho do PGA (1, 10, 100 ou 1000) e $P_{Pot.Digital}$ é a posição do cursor do potenciômetro digital (0 a 255).

- O ajuste de *offset* é feito com o conversor D/A com interface SPI TLV5618 (TEXAS INSTRUMENTS, 2002) combinado com o relé de ajuste na entrada do circuito. Antes de se realizar as medições, o relé de ajuste garante zero *Volt* na entrada do sistema ($V_i = 0V$). Com o ganho selecionado para a leitura desejada, aplica-se uma tensão de *offset* (V_{offset}) através do conversor D/A, de modo que o valor da tensão de saída após o circuito de *Sample and Hold* seja zerado ($V_0 = 0V$). Este algoritmo (Figura 5.9) pode ser implementado no MADC de modo que seja executado automaticamente durante a aquisição de dados. Na Figura 5.10 tem-se a os passos realizados pelo MADC para o ajuste da tensão de *offset* com o reflexo direto no valor da tensão de saída (V_0);
- O circuito de *Sample and Hold*, baseado no LF398 (NATIONAL SEMICONDUCTORS, 2000) mantém o valor de tensão capturado no mesmo instante para todas as entradas. Com o valor de tensão fixo na saída do sistema, pode-se então garantir que o MADC fará a aquisição dos valores capturados em um mesmo instante, uma vez que o conversor A/D utilizado é multiplexado em 8 canais.

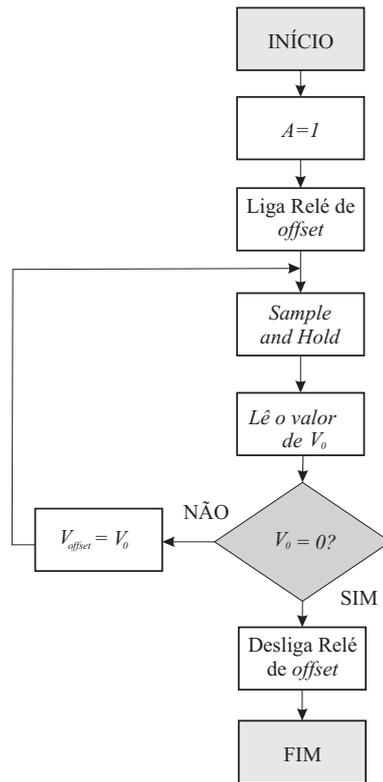


Figura 5.9: Fluxograma do algoritmo de Correção da tensão de *offset* em V_0 .

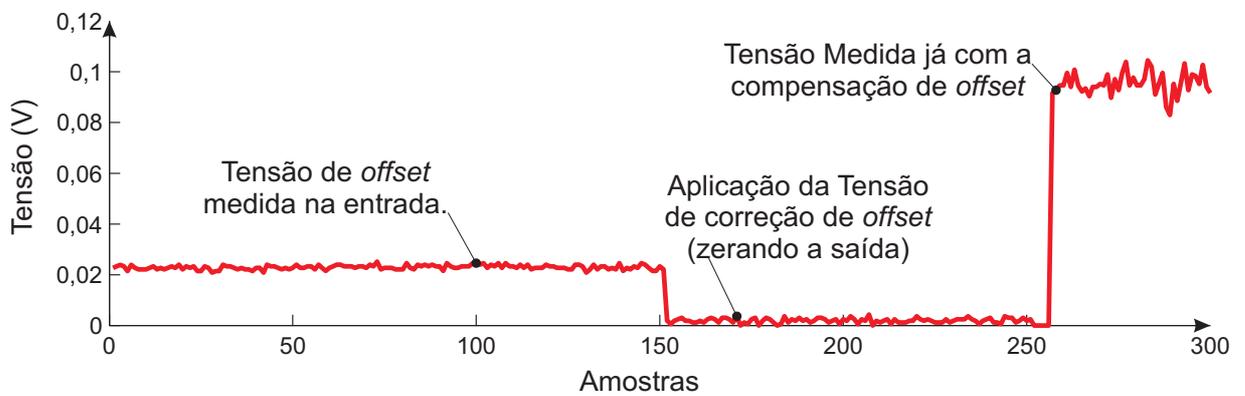


Figura 5.10: Correção da tensão de *offset* em V_0 .

5.2.1 Algoritmo de Média Móvel

A média móvel consiste em uma técnica matemática utilizada primariamente para eliminar interferências e revelar a tendência real de convergência em um conjunto de dados adquiridos. Mais comumente utilizado em economia e finanças, a média móvel revela as tendências de crescimento ou decrescimento de um determinado mercado a partir de um conjunto de indicadores coletados ao longo do tempo. As flutuações oscilantes existentes entre os períodos de amostragem dos valores dos índices de mercado não permitem uma análise direta desta tendência. Deste modo, pode-se interpretar o algoritmo da média móvel como um filtro que irá retirar as oscilações existentes entre as leituras (amostras) revelando a tendência real do conjunto de dados coletados.

Como a média móvel é uma ferramenta estatística para análise de tendências, pode ser facilmente adaptada para um sistema de aquisição de dados digital. Fazendo um comparativo com a interpretação dada em finanças, os indicadores diários de mercado podem ser vistos como uma amostra de leitura de um canal analógico, o período de verificação deste indicador (normalmente em dias) é analisado como o período de amostragem da leitura do canal. Deste modo, o algoritmo de média móvel pode ser aplicado às leituras adquiridas eliminando suas oscilações, ou seja, ruídos contidos no sinal de interesse.

O algoritmo de média móvel (5.2) caracteriza-se como um protótipo de um filtro FIR (*Finite Impulse Response*) comumente utilizado em sistemas de instrumentação digital. Nos casos em que uma determinada forma de onda está sofrendo interferências de ruídos, onde a informação relevante deve ser extraída de um sinal periódico, ou em casos em que um sinal com uma determinada frequência sofre a interferência de um sinal com uma frequência maior, um filtro com o algoritmo de média móvel deve ser aplicado para extrair o resultado desejado (DATAQ INSTRUMENTS, 2005).

$$MM(t) = V(t)K + MM(t - 1)(1 - K) \quad (5.2)$$

Onde:

$MM(t)$ Média Móvel da amostra atual (t);

$V(t)$ Valor medido da amostra atual;

K é coeficiente da Média Móvel;

$MM(t - 1)$ Média Móvel da amostra anterior (t-1).

O coeficiente da Média Móvel K é definido por

$$K = \frac{2}{(j + 1)}, \tag{5.3}$$

onde j é o período da média móvel, ou seja, o número de amostras utilizadas para definir a largura da média móvel.

Na Figura 5.11 tem-se uma representação gráfica do algoritmo de média móvel e sua estrutura.

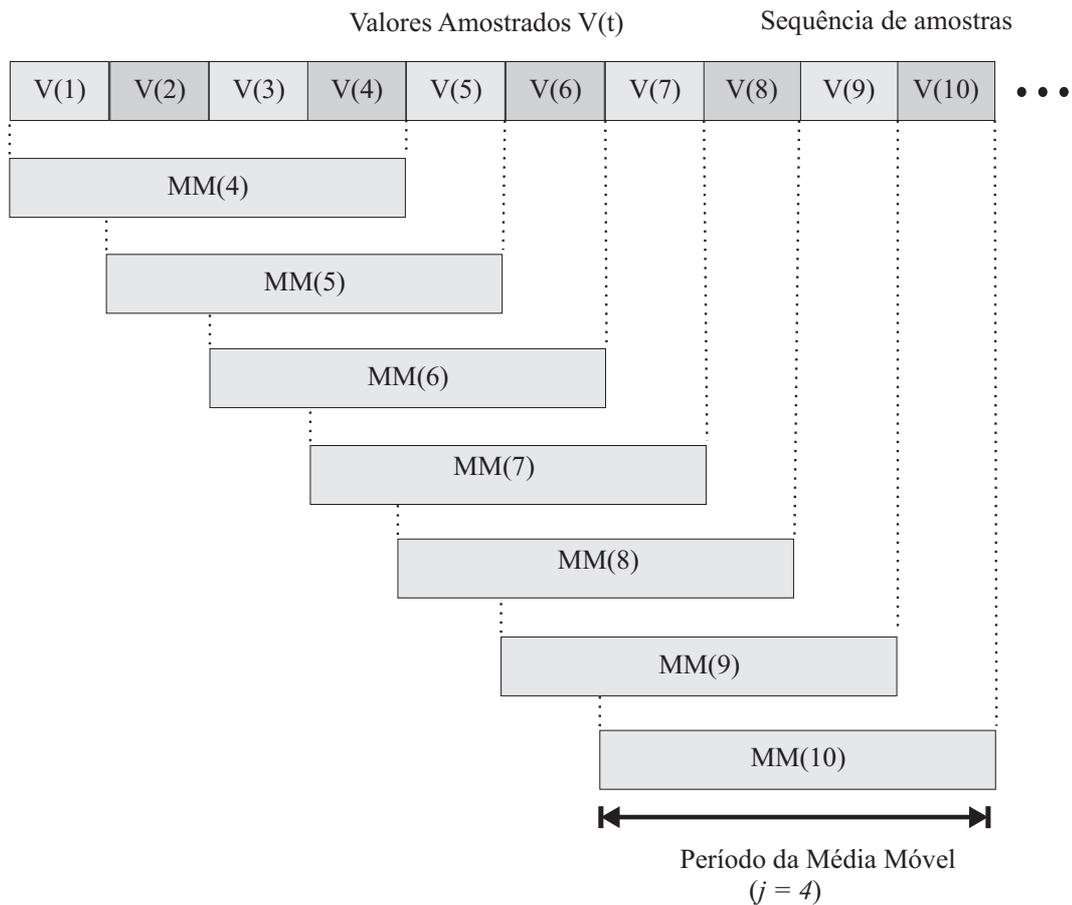


Figura 5.11: Algoritmo para o cálculo da média móvel.

O algoritmo de média móvel foi implementado no *firmware* do MADC de modo que os valores lidos já são transferidos ao PC devidamente filtrados. Através de um experimento de aquisição de dados, o MADC realizou 150 leituras de V_0 , onde armazenou em um vetor os valores puros sem nenhum tratamento (Figura 5.12 a) e em outro os valores filtrados com o algoritmo de média móvel com período de 8 amostras (Figura 5.12 b), ou seja, $j = 8$.

No conjunto de dados sem tratamento com a média móvel obteve-se um desvio padrão de $0,87mV$, enquanto que no vetor onde o algoritmo da média móvel foi aplicado, obteve-se um desvio padrão de $0,45mV$. A medida que o período da média móvel for aumentando, menor será a interferência da variação dos valores adquiridos, proporcionando um sinal sem interferência de ruídos alta frequência.

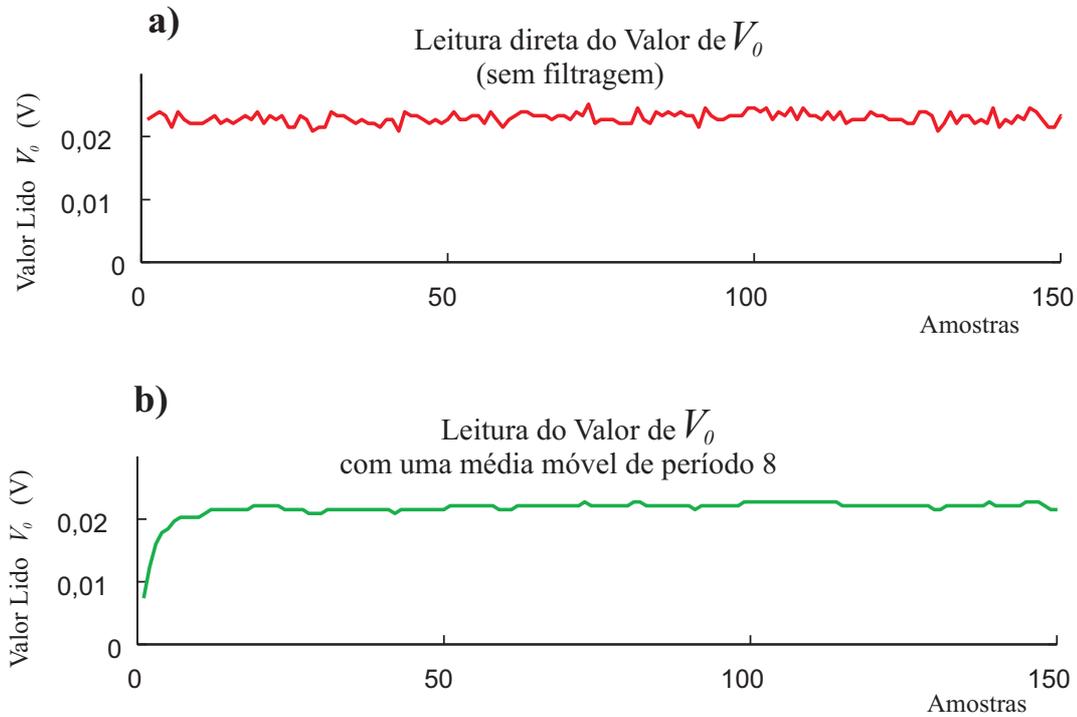


Figura 5.12: a) Leitura de V_0 sem filtragem; b) Leitura de V_0 filtrada com o algoritmo de média móvel de período 8.

A frequência de corte F_c em Hz para o filtro passa baixas com o algoritmo de média móvel apresentado pode ser expresso por

$$F_c = \frac{10\pi}{jt_s} , \quad (5.4)$$

onde, t_s é o período de amostragem do sinal em segundos (DATAQ INSTRUMENTS, 2005).

O algoritmo de média móvel se constitui-se em um filtro bastante eficaz para amostragem de sinais de baixa frequência, uma vez que as ondulações (*ripples*) são minimizadas diretamente no processo de leitura de um sinal. Além disso, a equação (5.2) é implementada no *firmware* do sistema de aquisição de dados, neste caso no MADC, sem solicitar muitos recursos de *hardware* (memória RAM) e código.

5.3 Estrutura de montagem do Sistema de Monitoramento de Particulados de Carbono

O grupo gerador instalado no Laboratório de Geração Termo-Elétrica é constituído por um motor diesel turbo comprimido de 6 cilindros e potência nominal de 250 HP acoplado a um gerador elétrico com capacidade de 150KW (Figura 5.13).

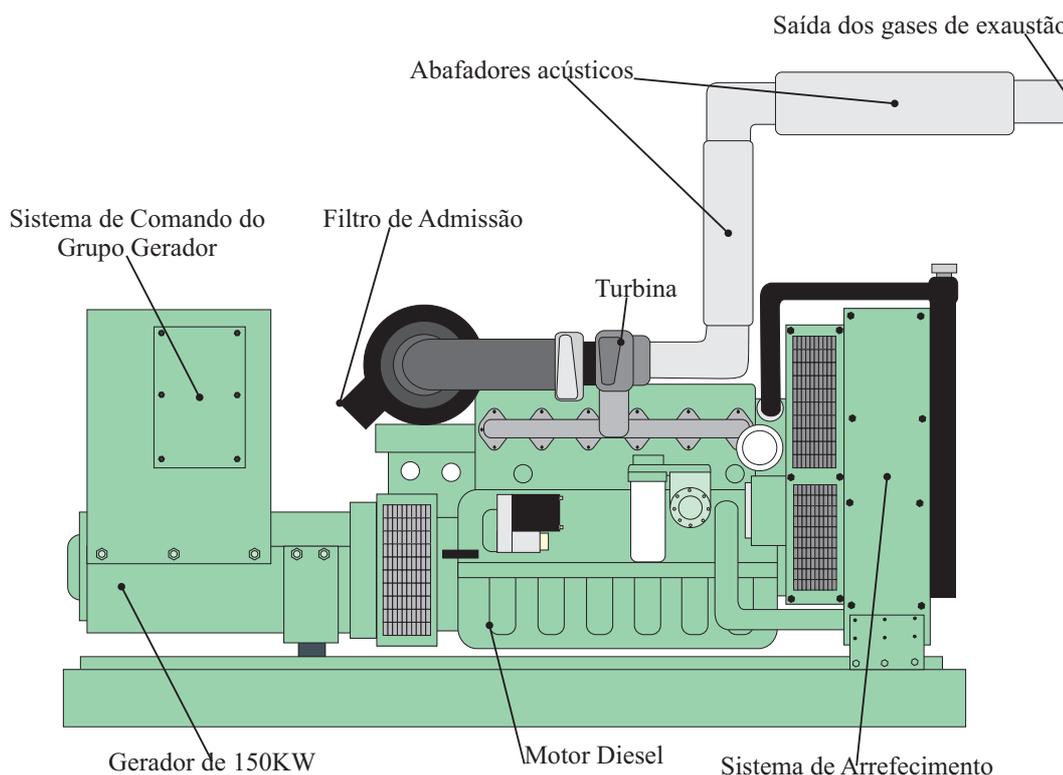


Figura 5.13: Estrutura do grupo gerador instalado no Laboratório de Geração Termo-Elétrica.

Para simular várias condições de solicitação no sistema, um banco de cargas de 150KW totalmente controlado está conectado ao gerador, no qual pode-se variar a carga acoplada em passos de 5KW (SILVA et al., 2005). Neste trabalho em particular, o banco de cargas é utilizado para variar as condições de emissões do motor diesel. Uma vez que a rotação permanece constante em 1800 RPM (Rotações Por Minuto)¹, a medida que as cargas são ligadas ao gerador, um torque proporcional é aplicado ao eixo do motor diesel.

As leituras relativas às análises dos Particulados de Carbono contidos nas emissões do motor diesel são realizadas a partir da Plataforma Mecânica e Eletrônica de Monitoramento de Particulados de Carbono conectada à tubulação de descarga. Uma amostra do gás de exaustão é direcionada através de uma mangueira até a Câmara de Espalhamento,

¹Girando a 1800RPM o gerador que possui 4 pólos, produzirá uma frequência elétrica na tensão de saída de 60Hz (KOSOW, 2000).

onde se encontram os fotosensores que irão captar a luz espalhada e atenuada nas direções correspondentes (Figura 5.14).

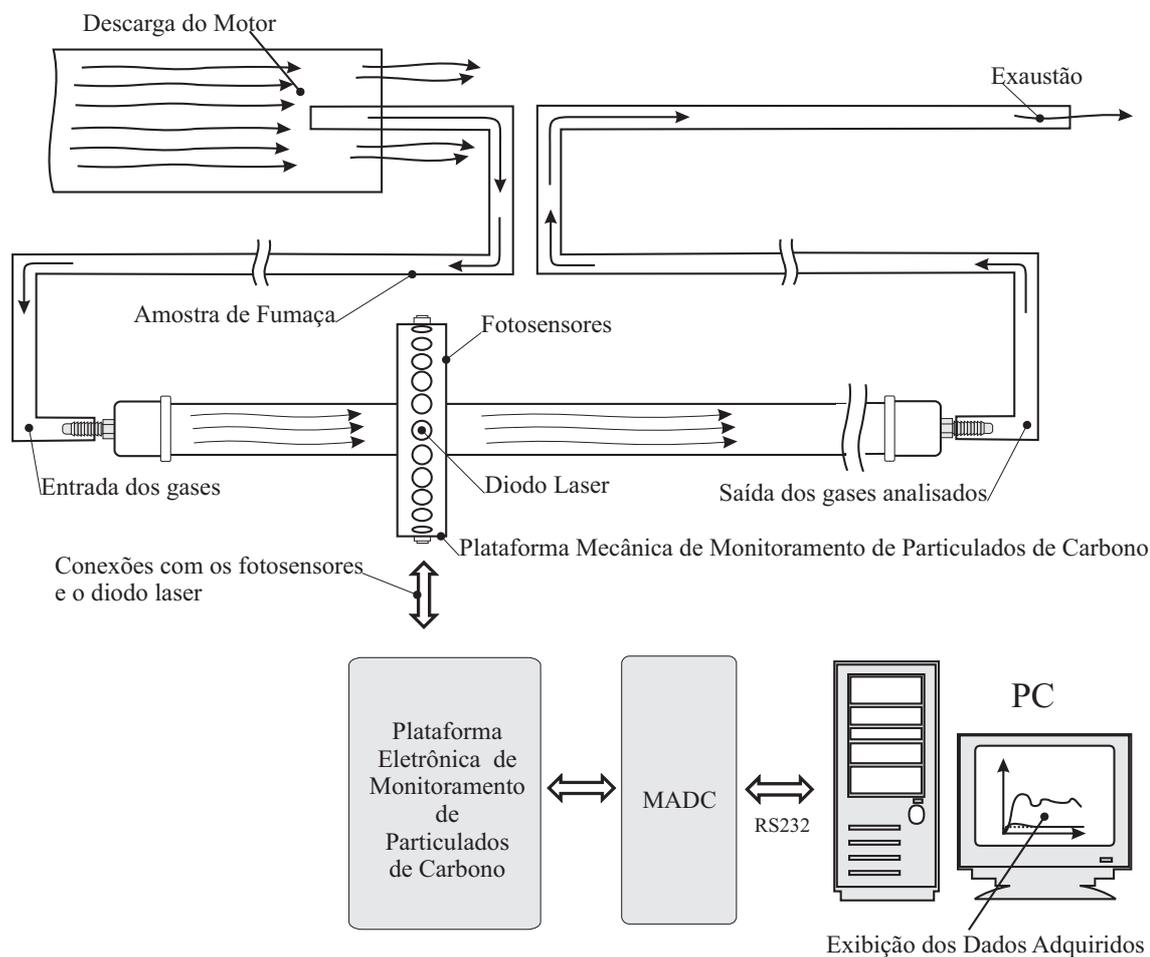


Figura 5.14: Sistema de Monitoramento de Particulados de Carbono Instalado no Grupo Gerador.

5.4 Resultados Experimentais

O experimento realizado nesta pesquisa constituiu na verificação do espalhamento luminoso obtido através da captura da luminosidade emitida pelas amostras e coletadas por meio de uma estrutura experimental. Tal estrutura foi composta pela Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono, pela Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem e pelo sistema de aquisição de dados já montado no laboratório (SILVA et al., 2005). Com o objetivo de analisar a intensidade de luz espalhada nos ângulos determinados pela própria estrutura mecânica, cada sensor teve a leitura de seu valor realizada de forma individual. A análise da luz espalhada é feita de acordo com a potência acoplada pelo banco de cargas no grupo gerador. Sendo assim, a intensidade de

luz espalhada em cada um dos ângulos analisados compõem o diagrama polar de espalhamento característico dos gases em análise em função da quantidade emitida. Por fim, analisando a luz atenuada pelas amostras dos gases de exaustão no sensor que está posicionado em frente a fonte emissora de luz (Diodo Laser), determinou-se a concentração de particulados através do princípio da opacimetria. Em outras palavras, a estrutura experimental para coleta de dados apresentou valores da intensidade de luz espalhada em ângulos definidos para compor o diagrama polar, além de uma análise baseada na extinção luminosa (opacimetria).

A captura da luminosidade emitida foi realizada com o auxílio de sensores dispostos em seis ângulos variados. Os ângulos de análise foram definidos com base na própria estrutura da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono, uma vez que há 24 cavidades, nas quais um diodo laser e 23 fotosensores são igualmente espaçados (15°). Neste experimento foram utilizados os seis primeiros sensores do primeiro quadrante do disco da Plataforma Mecânica. Assim, os ângulos contemplados com as medições são: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° e 75° (Figura 5.15). Esta escolha se deu pelo fato de o segundo e o terceiro quadrante apresentarem baixos valores de espalhamento luminoso em relação ao primeiro (BOHREN; HUFFMAN, 1998). Contudo, o segundo e o terceiro quadrantes podem ser contemplados em análises futuras. As potências que o banco de cargas acopla no gerador, resulta em um sistema de variação de regime de funcionamento, uma vez que, o motor diesel trabalha em rotação constante. Deste modo, é possível então variar a quantidade de emissões em função da carga ligada ao gerador, de modo que quanto maior a potência acoplada ao motor gerador, maior será a concentração de particulados, resultando em uma escala direta (PEREIRA, 2000).

Quanto aos valores coletados em cada ângulo, estes representam a composição dos gases em análise, de modo que alterações são percebidas em função do regime de operação (carga acoplada) do motor diesel. O diagrama polar de espalhamento luminoso da amostra possui geometria simétrica em relação ao eixo do fluxo luminoso (Figura 5.1). Devido a esta simetria, os valores medidos no primeiro quadrante podem ser espelhados para o quarto quadrante. Assim, os valores lidos nos ângulos de 0° , 15° , 30° , 45° , 60° e 75° são iguais aos valores de 360° , 345° , 330° , 315° , 300° e 285° respectivamente.

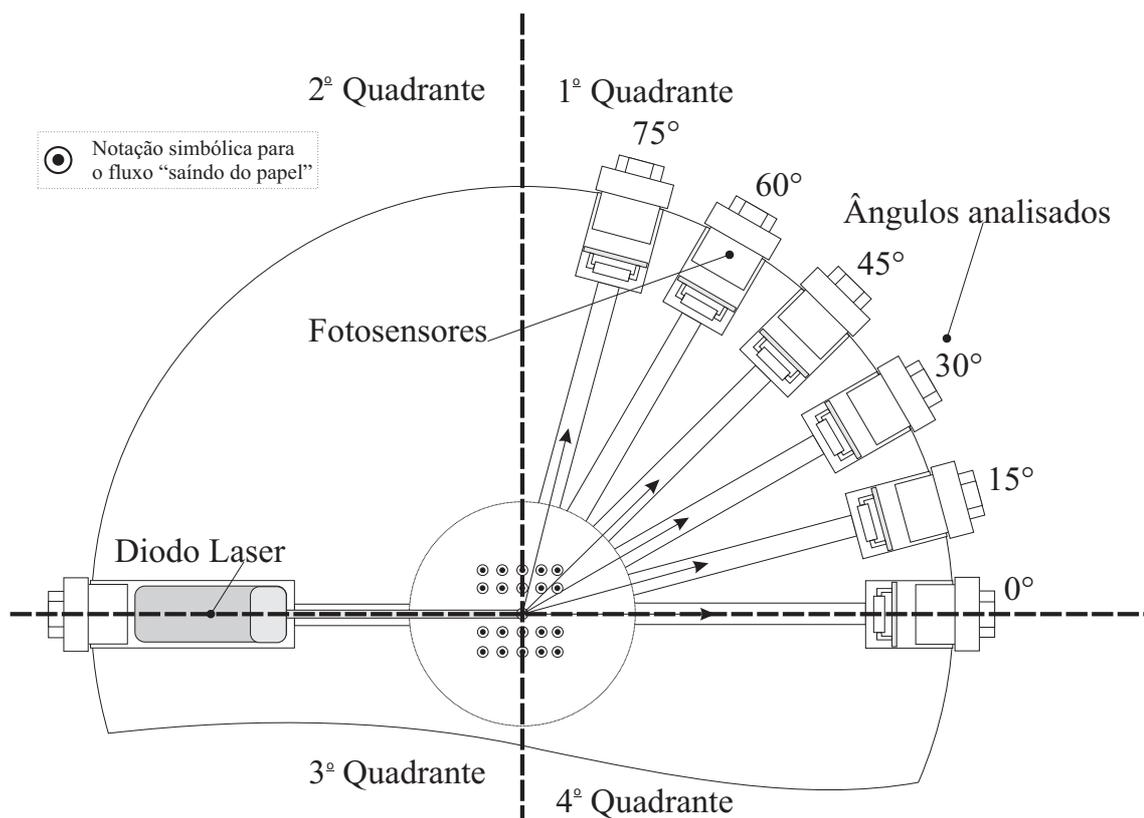


Figura 5.15: Posicionamento dos sensores no primeiro quadrante da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono.

Os valores de tensão lidos em cada um dos sensores referentes ao ângulo de espalhamento e a potência acoplada ao gerador são mostrados na Tabela 5.1. Devido a boa resposta dos sensores à intensidade luminosa refletida, o ganho do amplificador da Unidade de Condicionamento, Modulação e Filtragem foi ajustado em 1. Os valores capturados para avaliação analítica correspondem à média de 20 amostras da leitura de cada um dos sensores.

Potência	V0°(mV)	V15°(mV)	V30°(mV)	V45°(mV)	V60°(mV)	V75°(mV)
0 KW	2116,4825	270,372	107,068	67,46415	137,676	73,40565
10 KW	1876,99	235,232	100,76025	64,0885	119,256	73,34455
20 KW	1621,63	234,6	92,74185	66,97515	2713,415	73,4973
30 KW	1477,34	190,91	88,9844	73,314	73,314	66,746
40 KW	1240,165	174,99	76,82665	73,314	152,63255	71,6336
50 KW	1014,355	154,25	73,314	73,2987	151,642	73,314
60 KW	946,9855	151,5505	73,2987	73,2987	346,042	72,84015
70 KW	874,7255	151,458	73,34455	73,25285	1218,969	73,2987
80 KW	755,0105	150,3695	73,314	156,312	1935,295	73,9097
90 KW	643,94	141,7095	70,3201	151,52	1962,645	73,6042

Tabela 5.1: Valores de tensão medidos nos fotosensores em relação a potência acoplada pelo banco de cargas.

Os valores coletados em 0KW representam que o sistema de monitoramento está acoplado à tubulação de exaustão e o motor diesel está ligado, porém sem nenhuma carga aplicada ao gerador.

I_0 corresponde à intensidade da luz capturada com a presença de ar limpo na tubulação leitura. Antes de acoplar-se a tubulação de amostragem de fumaça no cano de descarga do motor diesel, verificou-se que $V(I_0) = 2654mV$. Para então facilitar a representação gráfica das leituras, os valores de tensão de cada um dos fotosensores $V(\theta)$ foram normalizados em função de I_0 segundo

$$I(\theta) = \frac{V(\theta)}{V(I_0)} . \tag{5.5}$$

Nesta equação, $I(\theta)$ representa a intensidade luminosa capturada pelo fotosensor posicionado no ângulo θ em relação a amplitude máxima I_0 . Desta forma, sendo $I_0 = 1$ na Tabela 5.2, é apresentado os valores de $I(\theta)$ normalizados.

Potência	$I(0^\circ)$	$I(15^\circ)$	$I(30^\circ)$	$I(45^\circ)$	$I(60^\circ)$	$I(75^\circ)$
0 KW	0,797	0,101	0,040	0,025	0,052	0,027
10 KW	0,707	0,088	0,037	0,024	0,044	0,027
20 KW	0,611	0,088	0,034	0,025	1,022	0,027
30 KW	0,556	0,071	0,033	0,027	0,027	0,025
40 KW	0,467	0,065	0,028	0,027	0,057	0,026
50 KW	0,382	0,058	0,027	0,027	0,057	0,027
60 KW	0,356	0,057	0,027	0,027	0,130	0,027
70 KW	0,329	0,057	0,027	0,027	0,459	0,027
80 KW	0,284	0,056	0,027	0,058	0,729	0,027
90 KW	0,242	0,053	0,026	0,057	0,739	0,027

Tabela 5.2: Valores Normalizados de $I(\theta)$ em relação a potência acoplada pelo banco de cargas.

Os dados da Tabela 5.2 são referência à composição do diagrama polar de espalhamento luminoso de uma amostra. Devido a pequena quantidade de pontos de análise, para uma visualização mais detalhada do diagrama de espalhamento, é necessário fazer um ajuste de função, na qual com um polinômio de grau 6, pode-se expressar a tendência da função formada pelos pontos (Figura 5.16). A representação gráfica das potências acopladas pelo banco de cargas ao gerador são 0KW, 40KW e 90KW, deste modo, pode-se ter uma visão completa entre as condições máximas e mínimas deste experimento.

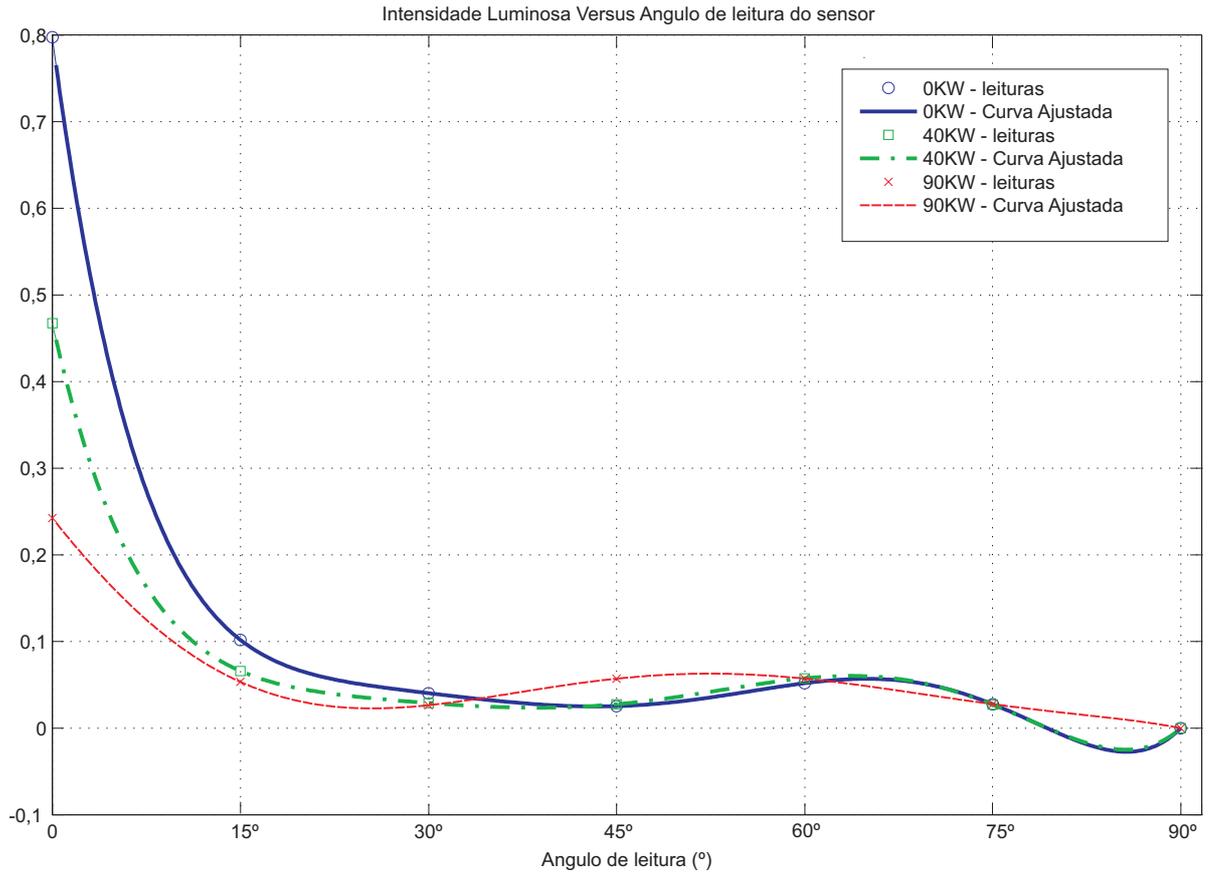


Figura 5.16: Determinando a função de ajuste através de um polinômio de grau 6 no intervalo de 0 a 90° para as cargas de 0KW, 40KW e 90KW acopladas ao gerador.

Tomando como base a leitura dos valores quando tem-se 0KW de carga acoplada ao gerador, tem-se então o diagrama polar apresentado na Figura 5.17. Assim, percebe-se então a formação dos lóbulos ao redor dos pontos medidos no diagrama polar conforme a representação da Figura 5.1. A geometria do diagrama polar de espalhamento luminoso para as demais potências acopladas apresenta a mesma forma, onde muda-se apenas os valores da intensidade capturada em cada ângulo.

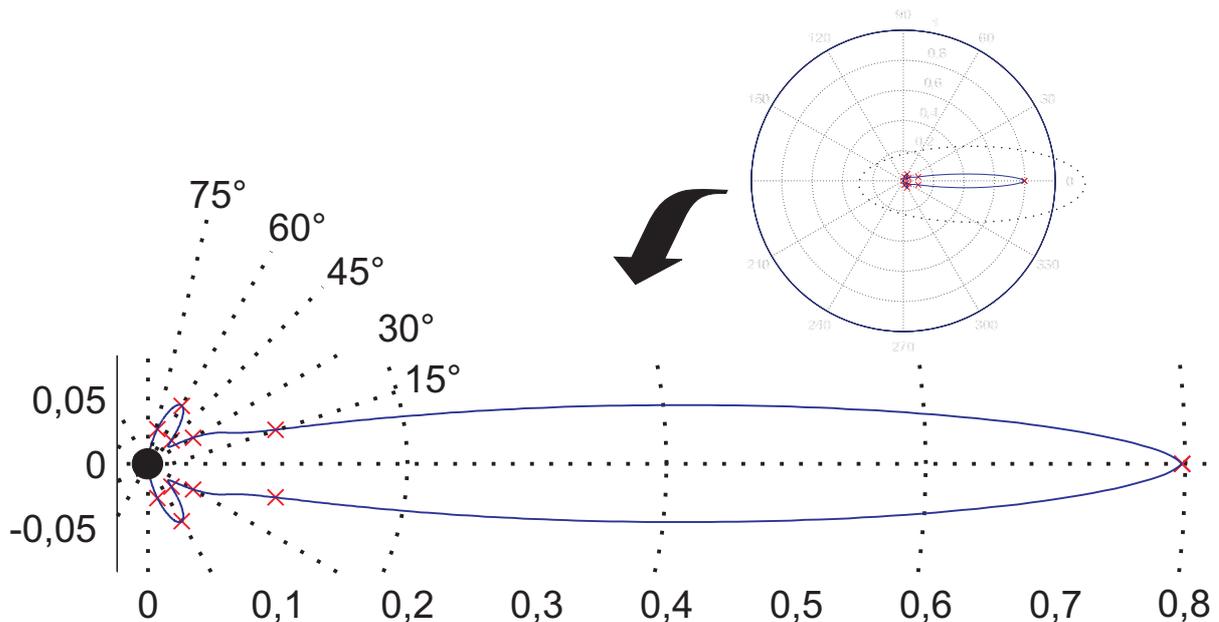


Figura 5.17: Diagrama Polar do espalhamento luminoso causado por uma amostra de gases de exaustão do motor diesel sem carga acoplada.

Os gráficos apresentados na Figura 5.17 é relativo relativos às amostras feitas com o motor diesel girando em vazio, ou seja, sem nenhuma carga acoplada (0KW). Para as demais potências, o diagrama de espalhamento segue o mesmo padrão, mudando apenas a amplitude dos lóbulos.

Na Tabela 5.2 quando analisada no sentido vertical, ou seja, quanto se toma como referência apenas um ângulo de análise, verifica-se a intensidade luminosa espalhada ou absorvida em diferentes regimes de operação do motor. Em outras palavras, na posição de 0° a luz capturada pelo fotosensor, de fato é atenuada pela amostra de gás que transpassa a Plataforma de monitoramento. Assim, a estrutura apresenta a funcionalidade de um opacímetro de fluxo contínuo (CHALLEN; BARANESCU, 1999), com o qual é possível se determinar a concentração de particulados presente na amostra através da atenuação luminosa provocada pela mesma (HARVEY, 2000). Tomando-se então os valores de $I(0^\circ)$ nas diferentes potências acopladas ao gerador pelo banco de cargas (0KW a 90KW), é possível determinar a concentração de particulados em função da potência aplicada.

Na Figura 5.18 mostra-se os pontos medidos juntamente com a curva referente a função de ajuste (polinômio de grau três)

Tomando como base as equações do Opacímetro apresentadas na seção 3.4 tem-se que o coeficiente de absorção de luz (k) é determinado por

$$k = naQ . \tag{5.6}$$

Desta forma a concentração de particulados presente no gás em análise será dada por

$$n = \frac{k}{aQ} . \tag{5.7}$$

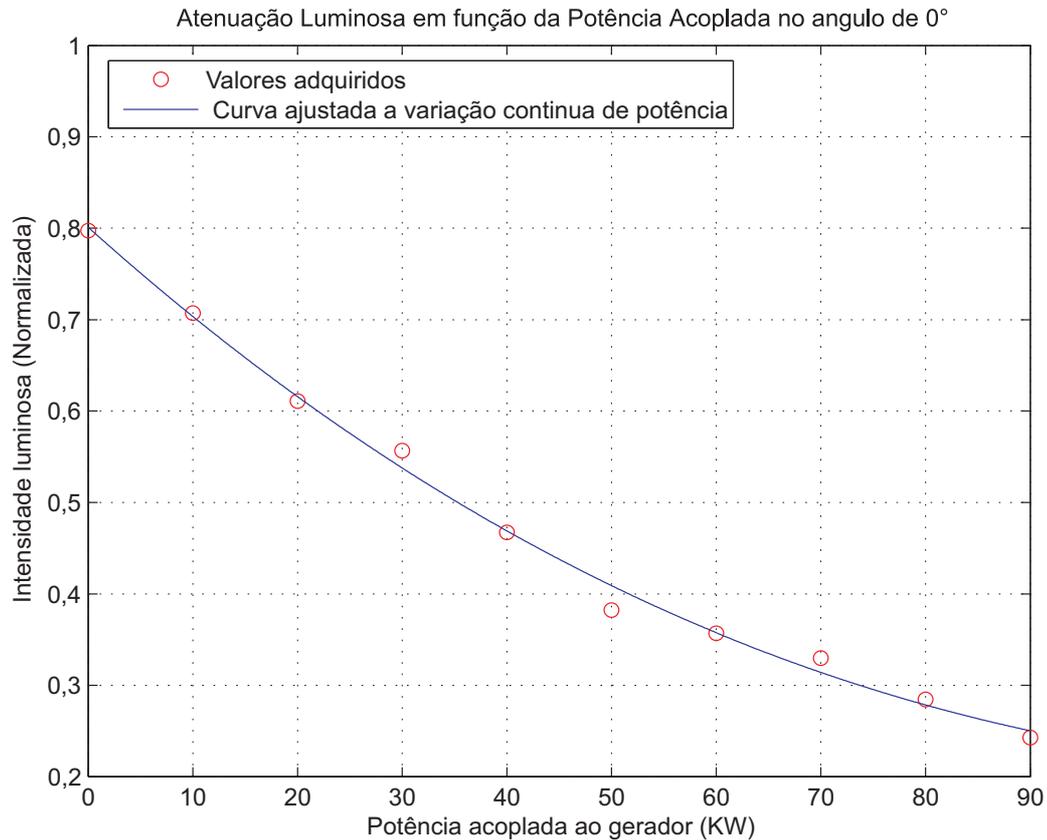


Figura 5.18: Atenuação luminosa em função da potência acoplada ao gerador.

Os coeficientes a (área média das partículas em análise) e Q (coeficiente de absorção de luz do material particulado), para toda análise são constantes, uma vez que a natureza dos particulados é a mesma para os vários regimes de carga do motor. Lembrando que os dados foram coletados com o motor já aquecido e estabilizado em cada passo de carga acoplado ao gerador.

De acordo com (CHALLEN; BARANESCU, 1999, p.467) a relação aQ média para motores do ciclo diesel é de $6,0496m^2/g$, de modo que a partir de (5.8) pode-se determinar a concentração de particulados (n) em função do coeficiente de absorção de luz (k).

$$n = \frac{k}{6,0496} \tag{5.8}$$

O coeficiente k também é expresso pela equação (3.9), que é função da opacidade (N) dada pela equação (3.5) e do comprimento do percurso de luz do opacímetro (L). No caso da Plataforma Mecânica de Monitoramento de Particulados de Carbono o comprimento L é de $80mm$. A equação

$$n = \frac{-1}{0,012322} \ln \left(1 - \frac{N}{100} \right) , \quad (5.9)$$

expressa o calculo da concentração de particulados n em função da opacidade.

Deste modo, a partir da equação (5.9), obtém-se o gráfico da Figura 5.19, que representa a concentração de particulados de carbono presente na fumaça de exaustão do motor diesel, em função da potência acoplada ao gerador.

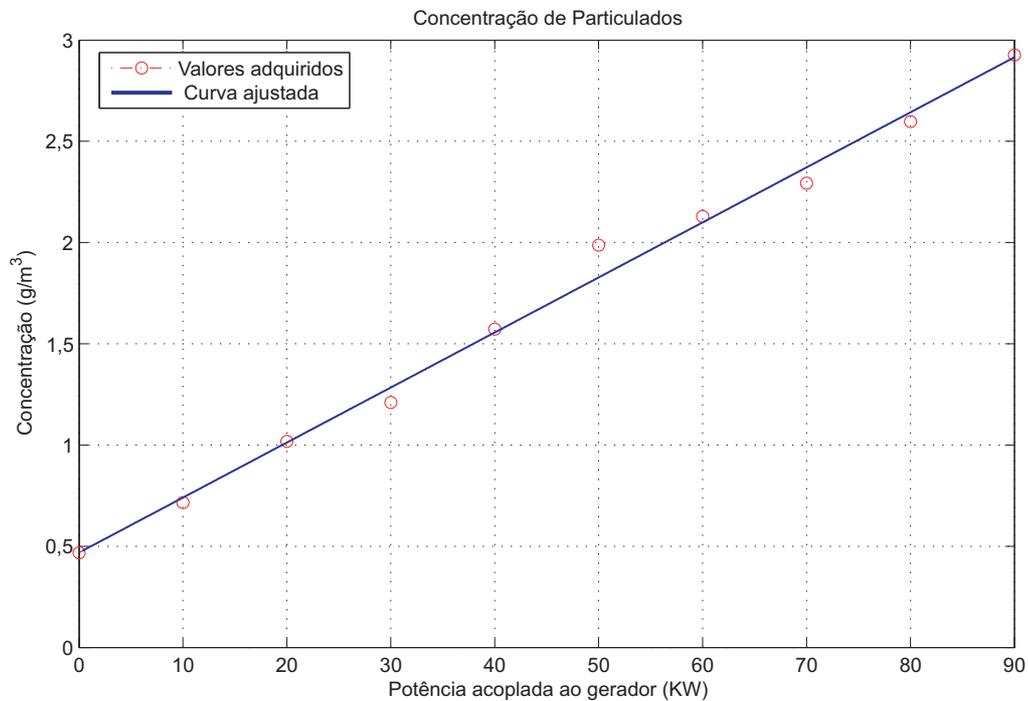


Figura 5.19: Concentração de Particulados de Carbono em função da potência acoplada ao gerador.

Ajustando-se o conjunto de dados a uma função contínua, obtém-se uma relação de primeira ordem

$$n = 0,0272Pot + 0,4686 . \quad (5.10)$$

No qual, Pot é o valor numérico da potência elétrica da carga acoplada ao gerador em KW. Desta forma, então, é possível estimar a concentração de particulados de carbono lançados nos gases de exaustão em função da potência elétrica da carga acoplada ao grupo gerador do Laboratório de Geração Termo-Elétrica do DEE.

5.5 Conclusão

Este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um sistema embarcado para o monitoramento dos particulados de carbono emitido por motores diesel, mais especificamente motores estacionários utilizados para geração termo elétrica. Este sistema de geração de energia está localizado no Laboratório de Geração Termo Elétrica do DEE da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande). A utilização de um motor estacionário possibilita a instalação uma plataforma experimental necessária para validar o sistema. Deste modo, equipamentos de instrumentação de laboratório, sistema de aquisição de dados, PC e demais acessórios podem ser conectados ao protótipo sem maiores problemas no que diz respeito às condições estruturais para os ensaios. Ao contrário dos motores veiculares, um motor diesel estacionário utilizado em sistemas de geração de energia trabalha em um regime constante de rotação e torque. Estas características favorecem os ensaios iniciais, visto que os níveis de emissão serão aproximadamente constantes.

A geometria de análise de vários ângulos de espalhamento sem a necessidade de uma célula móvel, utilizando uma plataforma multi-sensor, permite que uma análise simultânea da condição de espalhamento em cada ângulo selecionado (*Sample and Hold*). A desvantagem da geometria multi-angular em relação à que utiliza um fotosensor em uma plataforma móvel consiste justamente em não se analisar ângulos intermediários. Entretanto, em um passo mais adiante toda a seção interna da câmara de espalhamento poderia ser incorporada com sensores do tipo APS (*Active Pixel Sensor*) (FILHO, 2006) ou CCD (*Charge Coupled Device*) em uma linha que seguisse a circunferência da tubulação. Nesta situação o passo entre os fotosensores seria em escala microscópica, o que permitiria um caracterização do diagrama de espalhamento bem próxima da linear.

Além do processamento do sinal e interconexão, a unidade de processamento adotada será responsável pelo monitoramento dos sub-sistemas que compõem o instrumento para medição dos particulados de carbono.

O processo automático de condicionamento de sinais consiste em uma ferramenta útil não só para a aplicação apresentada neste capítulo. Qualquer tipo de sinal de baixa amplitude e baixa frequência (e.g. sinais miométricos) podem ser adquiridos e analisados com a plataforma eletrônica apresentada.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

O trabalho desenvolvido nesta dissertação apresentou uma visão geral do funcionamento do motor diesel, bem como suas conseqüências ao meio ambiente. O principal resíduo contido nos gases de exaustão de um motor diesel são os Particulados de Carbono (CHALLEN; BARANESCU, 1999), e sua quantidade reflete suas condições de funcionamento. Estudar formas de monitoramento e minimização dos níveis de emissão em motores a combustão se faz cada vez mais necessário, à medida que as conseqüências ao meio ambiente ficam mais graves.

A liberação de gases que contribuem com o efeito estufa, procede em sua maioria de veículos automotores e sistemas de geração de energia baseado em combustão. Esta conseqüência já pode ser percebida no aumento da temperatura média do planeta. O material particulado, lançado diariamente na atmosfera representa além de uma ameaça ao equilíbrio térmico do planeta é um forte elemento causador de doenças.

O motor Diesel é largamente empregado nas atividades humanas de transporte e geração de energia elétrica. O processo de queima do óleo diesel realizado dentro da câmara de combustão do motor, por mais bem controlado que seja, libera impurezas que vão além do produto da queima. Isto ocorre, uma vez que a combustão não é perfeita. As condições de pressão e temperatura internas à câmara de combustão são fatores determinantes na quantidade de particulados de carbono emitidos na atmosfera. Processos como recirculação de gás (DIESELNET, 2007), filtros catalíticos (BOSCH, 2005) e a utilização de turbo compressores (PEREIRA, 2000), ajudam significativamente na diminuição dos níveis de emissões. As legislações no mundo inteiro estão atuando fortemente na regulamentação desses níveis (CONAMA, 2004; IBAMA, 2004; CHALLEN; BARANESCU, 1999), desencadeando vários projetos de pesquisa e desenvolvimento de técnicas de controle e monitoramento de motores diesel. Estes estudos são realizados tanto nos centros de pesquisa acadêmicos, como nas empresas automotivas, que neste caso sofrem maior pressão dos órgãos reguladores.

No capítulo 3 foram abordadas diversas técnicas para determinação da quantidade de particulados de carbono contida nos gases de exaustão de motores do ciclo diesel. As propriedades ópticas da fumaça são peças chave para o desenvolvimento de um sistema de análise de suas características.

A metodologia apresentada na seção 3.5.2 apresenta-se como a principal base de estudo para o desenvolvimento deste trabalho, pois utiliza tanto o espalhamento como a extinção luminosa para determinar-se o nível de particulados contidos nos gases de emissão. Além disso, trata-se de uma plataforma embarcada que poderia ser facilmente integrada em sistemas veiculares.

O espalhamento luminoso se caracteriza por ser uma das principais bases do arcabouço teórico que foi estudado para o desenvolvimento deste trabalho. A intensidade da luz reirradiada por um conjunto de partículas em suspensão em um meio translúcido, está diretamente ligada a sua concentração dessas partículas. O ângulo que esta luz é reirradiada, ou seja, espalhada, está diretamente ligado à natureza da composição química das partículas submetidas à radiação luminosa.

A análise da intensidade da luz espalhada em vários ângulos pode viabilizar uma determinação mais precisa da concentração dos particulados no meio analisado, uma vez que a atenuação da radiação luminosa incidente é função da absorção e do espalhamento.

O experimento realizado com base na plataforma de testes desenvolvida no capítulo 4 mostrou que o espalhamento luminoso pode ser utilizado como metodologia de detecção de níveis de partículas contidas em um fluxo de gases provenientes de uma queima.

A PD-ADuC desenvolvida apresenta-se como um recurso de capacidades híbridas, pois permite o desenvolvimento de controladores através do PC, sistemas embarcados (*stand alone*) e sistemas de aquisição de dados. Equipamentos de laboratório como osciloscópio e multímetro podem ser dispensados dos experimentos desenvolvidos, pois os sinais de entradas, saídas e variáveis intermediárias são observados diretamente na tela do PC (ARAUJO et al., 2005b).

A validação do processo de espalhamento luminoso como um sistema de medição do nível de fumaça, foi efetivada a partir da construção de uma plataforma de testes. Esta plataforma caracterizou-se como um passo fundamental na definição da estrutura do Sistema Embarcado de Monitoramento de Particulados de Carbono, uma vez que a geometria proposta apresentou boa sensibilidade na detecção de fumaça.

O desenvolvimento da Plataforma Embarcada para Monitoramento de Particulados de Carbono, caracteriza-se como um passo incipiente para um instrumento que possa ser utilizado em veículos equipados com motores diesel. Por se tratar de uma estrutura que não precisa de peças móveis para monitorar o nível de particulados de carbono contidos nos gases de exaustão, esta plataforma poderia ser integrada em um equipamento que,

assim como a sonda *lambda* (Anexo A), fizesse o monitoramento direto da qualidade dos gases exauridos. A informação lida poderia então sinalizar para o usuário do veículo que há a necessidade de ajustes no motor. Além disso, dependendo da estratégia de controle adotada pelo ECM a informação do nível de particulados pode servir como entrada no controle do processo de injeção de combustível. Para um sistema de controle então, esta informação poderia intervir diretamente na quantidade de combustível injetada e quantidade de ar admitida de modo a melhorar os parâmetros da combustão bem como diminuir-se o nível de emissões de particulados (BOSCH, 2005).

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Por se tratar de um passo incipiente no estudo desenvolvimento de um sistema embarcado de monitoramento de particulados de carbono, este trabalho pode culminar em algumas seqüências voltadas para esta área. A plataforma apresentada consiste em um sistema de monitoramento e não um instrumento de medição em si. Neste sentido, trabalhos referentes à caracterização e modelagem do dispositivo poderiam ser feitos visando melhoria da estrutura e definição da precisão do instrumento. Deste modo podem-se citar as seguintes propostas:

- Caracterização e Modelagem do Sistema Embarcado de Monitoramento de Particulados de Carbono de modo a defini-lo como um instrumento produzindo grandezas absolutas;
- Aproveitamento da geometria da estrutura óptica desenvolvida de modo que se contemplassem todos os 23 sensores. Nesta situação seria possível a análise do diagrama de espalhamento completo ao redor da seção transversal da câmara de espalhamento, além de se desenvolver uma expansão para o sistema de condicionamento de sinais;
- Desenvolvimento de uma câmara de espalhamento utilizando de sensores do tipo CCD, de modo cada ângulo da luz espalhada seja analisado;
- Desenvolvimento de uma estrutura integrada de modo que o Sensor de Particulados de Carbono baseado em espalhamento luminoso pudesse ser incorporado em uma plataforma veicular, integrando-se ao sistema de controle de *Powertrain*¹ (*PCM - Powertrain Control Module*).

¹Powertrain, no mundo automotivo, consiste em um sistema constituído por: motor, transmissão, cardã e diferencial. Normalmente a expressão se refere a motor e transmissão (BOSCH, 2005).

Apêndice A

Módulo de Aquisição de Dados e Controle MADC

A.1 Microcontroladores ADuC

Um microcontrolador é um dispositivo programável que pode ser destinado para vários propósitos, sendo o *firmware* gravado em sua memória responsável pela característica de sua aplicação. Os microcontroladores constituem uma ferramenta versátil e de baixo custo para o projeto de sistemas embarcados (*Embedded Systems*), tais como: acessórios de informática, produtos de consumo, equipamentos industriais e acessórios automotivos.

Com base na arquitetura do 80C52 da *Intel*, a *Analog Devices* desenvolveu uma série de microcontroladores destinados a sistemas de instrumentação. Por se tratarem de dispositivos com tal função, ou seja, para trabalhos com o processamento de informações analógicas, a *Analog Devices* denomina os componentes da família ADuC de Microconversores ou Microcontroladores Analógicos. Os Microcontroladores ADuC possuem uma série de recursos que possibilitam sua aplicação em várias modalidades de instrumentação, podendo desta forma serem utilizados para desenvolver desde sistemas de controle integrados a sensores inteligentes (*Intelligent sensors*).

A família ADuC possui dispositivos com vários itens de *hardware* no próprio Circuito Integrado, especialmente projetados para sistemas de controle e processamento de informações analógicas. Para o desenvolvimento da PD-ADuC (Placa de Desenvolvimento para microcontroladores ADuC) empregada neste projeto, o microcontrolador utilizado foi o ADuC842, nos quais suas principais características são:

- Conversor A/D de 12 bits com 8 canais;
- 2 Conversores D/A de 12 bits;
- 2 Geradores PWM (*Pulse Width Modulation*);

- Comunicação serial UART;
- RTC (*Real Time Clock*);
- Arquitetura de alta velocidade 20 MIPS, onde o núcleo do 80C52 foi modificado para trabalhar com apenas um ciclo de *clock* por instrução;
- Memória RAM de 2304 *Bytes*;
- Memória de Programa de 62K *Bytes*;

A.2 Placa de Desenvolvimento para microcontroladores ADuC (PD-ADuC)

A maioria das atividades de pesquisa no LIEC (Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle) está focada no desenvolvimento de técnicas e equipamentos para sistemas de instrumentação, controle de processos e sistemas embarcados. Devido à necessidade da criação de protótipos para várias pesquisas em andamento, a PD-ADuC se apresenta como uma alternativa viável, pois é flexível e de baixo custo.

Os recursos do microcontrolador ADuC montado estão disponibilizados para qualquer sistema externo, através de uma placa de uso geral denominada de PD-ADuC. Devido a uma modificação na arquitetura do núcleo do 80C52, os microcontroladores da série ADuC84x possuem cada instrução executada com apenas um ciclo do *clock* principal. Esta modificação promove um aumento de doze vezes na velocidade de processamento comparando com o ADuC83x utilizando o mesmo *clock*. A PD-ADuC é compatível com: ADuC812, ADuC816, ADuC824, ADuC832, ADuC841 e ADuC842, de forma que a escolha do microcontrolador é feita face à necessidade da aplicação. Para o desenvolvimento da PD-ADuC foi escolhido o ADuC842, que pode atingir 20 MIPS (*Mega Instruction per Second*), de modo que o estudante possa realizar diversos experimentos que utilizam os microcontroladores da linha ADuC. A placa possui comunicação serial RS-232, que conectada ao PC, possibilita a gravação do *firmware*, além de permitir aplicações de aquisição de dados, nos quais os valores lidos no conversor A/D são transferidos ao PC.

Abaixo, encontram-se listados os recursos da PD-ADuC:

- Acesso aos recursos internos do microcontrolador montado na placa (RTC - *Real Time Clock*, memórias EEPROM, FLASH e RAM);
- 8 canais do Conversor A/D, cada um com *buffers* de proteção;

- Circuito ajustável para o fornecimento de uma tensão de referência externa ao ADuC842 para o conversor A/D;
- 2 Conversores D/A;
- 2 Geradores PWM (*Pulse Width Modulation*);
- 24 pinos de E/S disponibilizados nas portas (P0, P2 e P3);
- Comunicação serial RS 232;
- Comunicação serial RS 485;
- Controlador para conexão com uma rede CAN;
- Leds indicadores de recepção (RX) e transmissão (TX) para a porta serial;
- Leds indicadores de RX e TX para a rede CAN;
- Led indicador de alimentação da PD-ADuC;
- Sensor de temperatura LM35 (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000);
- Sensor de luminosidade LDR (*Ligth Dependent Resistor*);
- 8 leds de sinalização para a porta P0;
- Comunicação síncrona SPI (*Serial Peripheral Interface*) e I2C (*Interconnect Integrated Circuit*);
- Disponibilidade de pinos de alimentação para acessórios externos.

Todos os recursos do ADUC842 estão acessíveis através de conectores que são utilizados de acordo com as necessidades do projeto em estudo. Com a PD-ADuC é possível identificar-se as características da arquitetura e exercitar a utilização dos recursos dos microcontroladores. Como a placa é de uso universal, a criação de protótipos embarcados torna-se de fácil execução, de forma que o usuário concentrará seus esforços em desenvolver o *firmware* apropriado antes da elaboração do projeto final.

Todos os recursos da PD-ADuC estão acessíveis diretamente na placa. Na Figura A.1 tem-se um mapa completo dos recursos e seus respectivos locais na placa, que estão listados na Tabela A.1.

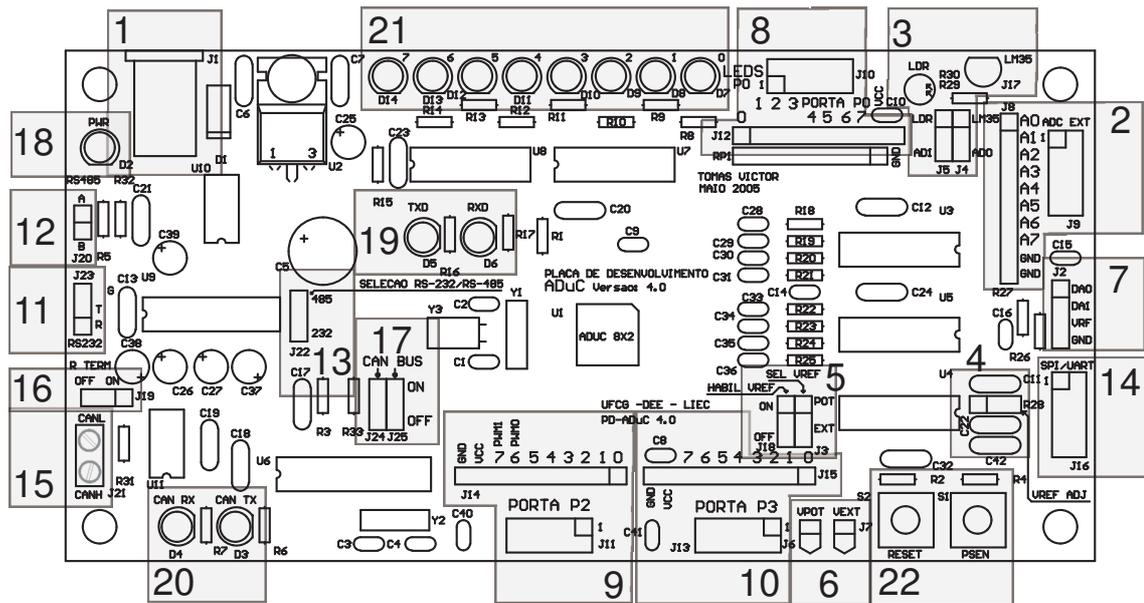


Figura A.1: Disposição dos recursos da PD-ADuC.

Número	Nome do Recurso
1	Conexão da alimentação da Placa.
2	Conexão das 8 entradas analógicas do conversor A/D do ADuC842.
3	Seleção para utilização dos sensores LDR e LM35 através de <i>straps</i> .
4	Potenciômetro multivoltas para o ajuste da tensão de referência na PD-ADuC.
5	<i>Straps</i> para seleção da tensão de referência externa ao ADuC842.
6	Pontos de teste para a medição das tensões de referência externas ao ADuC842 utilizadas.
7	Conexão para as saídas de tensão dos conversores D/A e entrada da tensão de referência externa à PD-ADuC.
8	Conexão da porta P0 do ADuC842.
9	Conexão da porta P2 do ADuC842.
10	Conexão da porta P3 do ADuC842.
11	Conexão para comunicação serial através do barramento RS-232.
12	Conexão para comunicação serial através do barramento RS-485.
13	Strap para a seleção do barramento de comunicação serial (RS-232 ou RS-485).
14	Entradas e Saídas auxiliares.
15	Conexão da PD-ADuC com uma rede CAN.
16	Strap de habilitação do resistor terminador da rede CAN.
17	<i>Straps</i> para a habilitação e conexão da interface CAN com o ADuC842.
18	Led para indicação de fonte de alimentação conectada.
19	Leds para indicação de comunicação serial do ADuC842 (TX e RX).
20	Leds para indicação de comunicação na interface CAN da PD-ADuC.

Tabela A.1: Identificação dos recursos da PD-ADuC referentes à Figura A.1.

Cada um dos oito canais do conversor A/D possui um pré-condicionamento de sinal, sendo este composto por um *buffer* externo que minimiza o erro de carregamento no ponto de medição. Além disso, possui um filtro passa-baixas (frequência de corte $\approx 160\text{KHz}$) destinado a eliminar ruídos de alta frequência. Os sinais de entrada devem compreender uma faixa de valores entre 0 e 2,5V. Um sensor de temperatura LM35 e um sensor de luminosidade com LDR estão conectados aos canais 0 e 1 respectivamente do conversor A/D do microcontrolador. Estes sensores permitem um contato inicial do usuário com a leitura do conversor A/D, sem a necessidade de montagens externas, além de possibilitar a leitura da temperatura do ambiente no qual a PD-ADuC está inserida. Caso a leitura do LM35 e do LDR da PD-ADuC não seja necessária, os canais 0 e 1 podem ser liberados para a leitura de tensões externas, mudando *straps* de seleção.

Objetivando a possibilidade de expansão, todas as conexões externas da placa estão padronizadas, de forma que equipamentos adicionais quando conectados à PD-ADuC, aumentam sua gama de aplicações. Os oito pinos de cada uma das portas de E/S do microcontrolador estão disponíveis em conectores individuais, juntamente com a tensão de alimentação (5V e GND). Deste modo, as placas suplementares se conectam a PD-ADuC sem a necessidade de alimentação externa. Estas placas adicionais (compatíveis com a PD-ADuC) constituem o que designamos de "KIT-ADuC". A seguir são listadas as placas que o compõem o sistema:

- Placa de Leds: permite a visualização dos valores das portas de E/S;
- Placa de Relés: onde quatro relés estão disponíveis, com os drivers de acionamento para conexão em qualquer uma das portas;
- Driver PWM: amplifica os sinais PWM com nível TTL produzidos pelo microcontrolador, podendo acionar cargas de até 80W;
- Placa de *Encoders*: possibilita a alimentação e a leitura dos sinais de dois *encoders* ópticos;
- Mux Analógico: permite a conexão de 32 canais de entrada analógicos com o qual são multiplexados e transferidos à PD-ADuC;
- Módulo de RF: estabelece a comunicação serial sem fios entre duas PD-ADuC ou com o PC.

A disposição dos pinos e dos conectores está organizada de forma que futuras placas de expansão projetadas, sejam compatíveis com a PD-ADuC, desde que sigam o padrão de conexão estabelecido.

A.3 Convertendo a PD-ADuC no Módulo de Aquisição de Dados e Controle (MADC)

Como descrito até então, a PD-ADuC se caracteriza apenas por ser uma plataforma de estudo e desenvolvimento de aplicações, cujos elementos primordiais são os microcontroladores ADuC. Devido à disponibilidade de recursos de hardware para aquisição de dados e controle, foi programado um *firmware* com a finalidade de transformar a PD-ADuC em uma interface com sistemas externos para o PC. O *firmware* criado juntamente com a PD-ADuC formam uma nova ferramenta denominada Módulo de Aquisição de Dados e Controle ou MADC. Um diagrama esquemático com o *firmware* criado é mostrado na Figura A.2.

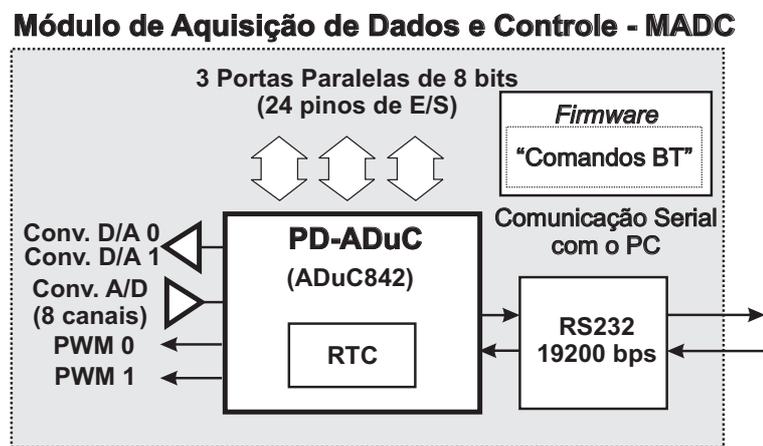


Figura A.2: *Firmware* dos "Comandos BT" gravado na PD-ADuC formando o MADC.

A necessidade de comunicação serial direta entre o MADC e o PC culminou na criação dos "Comandos BT". A origem do nome BT é uma referência para comandos básicos para interface (*Basic Transmission*). As letras T e V demarcam o início e o fim de um quadro de comando, respectivamente. A letra A é um indicador para o comando da leitura de um valor de tensão dos conversores A/D, ao passo que as letras B e C são indicadores do comando de escrita de um valor de tensão nos conversores D/A.

O quadro de um "Comando BT" é formado por uma sequência de até sete caracteres ASCII que são interpretados pelo MADC. Como cada caractere possui oito bits, o quadro de um comando BT pode ter até 56 bits. O quadro de um "Comando BT" é apresentado na Figura A.3.

Os "Comandos BT" (ARAÚJO et al., 2005a) utilizam caracteres ASCII para facilitar a criação de aplicações através de softwares como o MATLAB e o LabVIEW, nos quais operações com *strings* podem ser realizadas diretamente na porta serial do PC. Assim, vários sistemas podem ser implementados de forma que o processamento dos sinais de

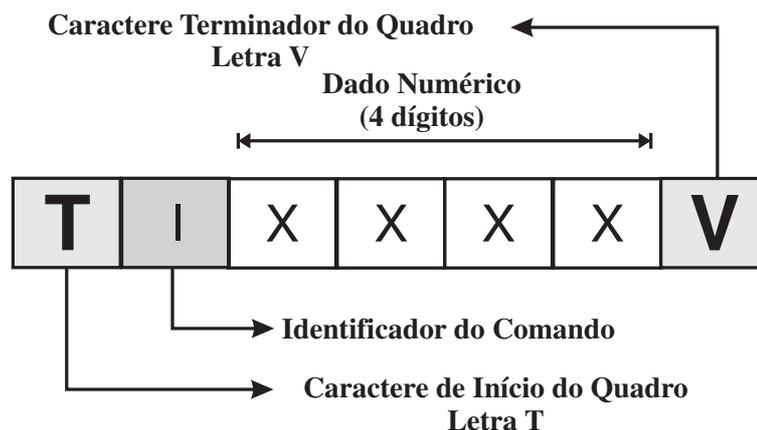


Figura A.3: Quadro de um "Comando BT".

entrada e de saída ficará com o PC.

O *Baud Rate* da comunicação pode ser ajustado conforme a aplicação em questão. Contudo, o valor *default* dos "Comandos BT" é de 19200 bps. O propósito MADC é o apoio didático e à pesquisa, cuja instalação é mais adequada em ambiente de laboratório. Assim, devido à curta distância (aproximadamente 1 m) entre o PC e o MADC, o que minimiza a possibilidade de erros, não foi implementado nenhum protocolo com correção, tornando o desenvolvimento da aplicação mais simplificado. Porém, para determinadas aplicações em que o conteúdo da informação transmitida é crítico, como sistemas industriais ou automotivos, por exemplo, um protocolo com correção de erro se faz necessário de forma a aumentar a robustez do sistema.

O conjunto de "Comandos BT" listado na Tabela A.2 permite acesso aos dispositivos de hardware existentes no MADC, nos quais os valores numéricos também são transmitidos como caracteres ASCII. Os comandos que solicitam a leitura de determinado recurso, como o conversor A/D ou o porta de E/S, recebem como resposta uma sequência de caracteres numéricos ASCII com o valor correspondente a leitura solicitada. Estes são seguidos de um caractere de controle ($\backslash n$)¹ sinalizando para o PC o final da transmissão da resposta.

¹O comando ASCII $\backslash n$ representa o retorno do cursor para o começo da linha (CR - *Carriage Return*)(SA, 2005).

"Comando BT"	Id	Função	Faixa de Valores
TA _x V	A	Leitura do canal x do Conversor A/D	0 a 9
TB _{xxxx} V	B	Escrita do valor xxxx em mV no Conversor D/A 0	0000 a 2499
TC _{xxxx} V	C	Escrita do valor xxxx em mV no Conversor D/A 1	0000 a 2499
TD _{yxxxx} V	D	Escreve o valor xxx na porta de E/S y	xxx – 000 a 255; y – 0 a 3
TE _y V	E	Leitura do valor da porta de E/S y	y – 0 a 3
TF _{zyx} V	F	Escrita do valor binário x no bit y da porta z	x – 0 ou 1; y – 0 a 7; z – 0 a 3
TG _{zy} V	G	Leitura do valor binário do bit y da porta x	y – 0 a 7; z – 0 a 3
TH _{hhmm} V	H	Acerta o RTC do MADC	hh – 00 a 23; mm – 00 a 59
THORAV	-	Leitura do RTC do MADC	-
TP _{xxxx} V	P	Escrita do valor xxxx no gerador PWM	xxxx – 0000 a 9999
TR _{xxxxx} V	R	Escrita da referência para o controlador do MADC na forma Normalizada	xxxxx – 00000 a 10000
Tr _{xxxxx} V	r	Escrita da referência para o controlador do MADC no valor da grandeza em controle	xxxxx – 00000 a 99999
TI _x V	I	Solicita a leitura do valor de uma variável do sistema de controle (Resposta do MADC dada em valores normalizados compreendidos entre 0 e 1)	x = R - Referência para o controlador; x = E - Sinal de erro; x = U - Sinal de controle; x = Y - Saída do sistema.
TI _x V	I	Solicita a leitura do valor de uma variável do sistema de controle (A resposta do MADC dada em valores na grandeza em controle)	x = r - Referência para o controlador; x = e - Sinal de erro; x = y - Saída do sistema.

Tabela A.2: Lista dos "Comandos BT".

O MADC apresenta-se como um recurso de capacidades híbridas, pois permite o desenvolvimento de controladores através do PC, sistemas embarcados (*stand alone*) e sistemas de aquisição de dados. Equipamentos de laboratório como osciloscópio e multímetro podem ser dispensados dos experimentos desenvolvidos, pois os sinais de entradas, saídas e variáveis intermediárias são observados diretamente na tela do PC.

Apêndice B

Publicações em Congressos

- ARAUJO, T.V.G.P.; LIMA, A. M. N.; NEFF F. H.; SÁ, J. da S.; ROCHA NETO, J. S. da ; "Sistema de Condicionamento de Sinais Multi-sensor para Análise de Espalhamento Luminoso em Emissões de Motores do Ciclo Diesel", 1^o Colóquio SAE Brasil de Eletro-Eletrônica Embarcada, Resende - RJ, maio de 2007.
- ARAUJO, T.V.G.P.; LIMA, A. M. N.; NEFF F. H.; COSTA, Y. J. R. da; SÁ, J. da S. "Proposta de um Sistema Embarcado para Monitoramento de Particulados de Carbono em Emissões de Motores do Ciclo Diesel", Congresso SAE Brasil 2006, São Paulo - SP, novembro de 2006.
- SILVA, L. P.; ARAUJO, T.V.G.P.; FILHO, E. B. S.; LIMA, A. M. N.; COSTA, Y. J. R. da; LUCENA, L. R. R. de "Sistema de Aquisição de Dados de Baixo Custo para um Grupo Gerador do Ciclo Diesel". Congresso SAE Brasil 2005, São Paulo - SP, novembro de 2005.
- ARAUJO, T.V.G.P.; FILHO, C. A. de S.; LIMA, A. M. N.; BARROS, P. R. "Plataforma de estudo para aplicações de controle inteligente e sistemas embarcados". VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, São Luis - MA, setembro de 2005.
- ARAUJO, T.V.G.P.; FILHO, C. A. de S.; LIMA, A. M. N.; BARROS, P. R. "Kit de desenvolvimento para microcontroladores aduc aplicado ao ensino de controle e automação". XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia - COBENGE, Campina Grande - PB, setembro de 2005.

Referências Bibliográficas

ABNT. *NBR 6016 - Gás de Escapamento de Motor Diesel: Avaliação do Teor de Foligem com a Escala de Ringelmann*. Rio de Janeiro, Agosto 1986.

ANALOG DEVICES. *4-/6-Channel Digital Potentiometers*. Endereço eletrônico: <http://www.analog.com>, 1999.

ANALOG DEVICES. *ADUC 812 - MicroConverter, Multichannel 12-Bit ADC with Embedded Flash MCU*. Endereço eletrônico: <http://www.analog.com/>, Outubro 2003.

ARAUJO, T. V. G. P. et al. Kit de desenvolvimento para microcontroladores aduc aplicado ao ensino de controle e automação. setembro 2005. XXXIII Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia.

ARAUJO, T. V. G. P. et al. Plataforma de estudo para aplicações de controle inteligente e sistemas embarcados. setembro 2005. VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente.

ARAUJO, T. V. G. P. et al. Proposta de um sistema embarcado para monitoramento de particulados de carbono em emissões de motores do ciclo diesel. novembro 2006. Congresso SAE Brasil 2006.

ARAUJO, T. V. G. P. et al. Sistema de condicionamento de sinais multi-sensor para análise de espalhamento luminoso em emissões de motores do ciclo diesel. maio 2007. I Colóquio SAE Brasil de Eletro-Eletrônica Embarcada.

BERNE, B. J.; PECORA, R. *Dynamic Light Scattering*. First edition. Mineola, NY, USA: Dover Publications, Inc, 2000.

BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*. Paperback edition. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, Inc, 1998.

BONNICK, A. W. M. *Automotive Computer Controlled Systems*. First edition. London, Great Britain: Butterworth-Heinemann, 2001.

BOSCH, R. *Manual de Tecnologia Automotiva*. 25.^a edição. São Paulo, SP, Brasil: Editora Edgard Blücher, 2005.

BOSH. *Dieselauch Tester: Fur den Test bei konstanter Belastung des Motors*. Otelfingen, Germany, 2000.

BOYES, W. *Instrumentation Reference Book*. 3rd edition. ed. Burlington, MA, USA: Elsevier Science, 2003.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A eliminação catalítica dos particulados de diesel. <http://www.icp.csic.es/cyted/>, 1998. Resumos das Monografias do Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo - CYTED.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - a questão dos particulados. estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. São Paulo, SP, Brasil, Maio/Junho 2004. Revista Quinica Nova, Vol. 27 N^o. 3.

BURR-BROWN. *Digitally Controlled Programmable-Gain Instrumentation Amplifier*. Endereço eletrônico: <http://www.burr-brown.com>, Março 1993.

BURR-BROWN. *INA101 - High Accuracy Instrumentation Amplifier*. Endereço eletrônico: <http://www.burr-brown.com>, Julho 1998.

BURR-BROWN. *Monolithic Photodiode and Single-Supply Transimpedance Amplifier*. Endereço eletrônico: <http://www.burr-brown.com>, Março 1998.

CHALLEN, B.; BARANESCU, R. *Diesel Engine Reference Book*. 2nd edition. ed. Delhi, India: Butterworth-Heinemann, 1999.

CONAMA. *Resolução Normativa N^o 299*. Brasília, Outubro 2001.

CONAMA. *Resolução N^o 354*. Brasília, Dezembro 2004.

CORRIGAN, S. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. Endereço eletrônico: <http://www.ti.com/>, Agosto 2002.

DATAQ INSTRUMENTS. *A Closer Look Advanced CODAS Moving Average Algorithm*. Endereço eletrônico: <http://www.dataq.com/>, Novembro 2005.

DIESELNET. *DieselNet: Emissions Online*. Endereço eletrônico: <http://www.dieselnet.com/>, Fevereiro 2007.

DROZD, S. N.; KUGEIKO, M. M.; FIRAGO, V. A. Method for measuring the smokines of the exhaust gases and a device for accomplishing it. July 2004. Measurement Techniques, Vol 47, No. 7.

- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - UNITED STATES. *2006 Discretionary Budget Authority*. Endereço eletrônico: <http://www.whitehouse.gov/omb/budget/fy2006/epa.html>, Janeiro 2007.
- FAIRCHILD. *BC337/BC337 - Switching and Amplifier Applications*. Endereço eletrônico: <http://www.fairchildsemi.com/>, Agosto 2002.
- FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. *Internal Combustion Engines*. 2nd edition. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2000.
- FERREIRA, A. B. de H. *Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa*. Versão 5.0 - edição eletrônica. São Paulo, SP, Brasil: Editora Positivo, 2004.
- FILHO, C. A. de S. *Desenvolvimento de um Sistema Eletrônico de Aquisição e Processamento para Biosensores*. Dissertação — Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande - PB - Brasil, Novembro 2006.
- HARVEY, D. *Modern Analytical Chemistry*. First edition. USA: McGraw-Hill, 2000.
- HULST, H. C. van de. *Light Scattering by Small Particles*. First edition. Mineola, NY, USA: Dover Publications, Inc, 1981.
- IBAMA. *Instrução Normativa N^o 55/04*. Brasília, Novembro 2004.
- KOSOW, I. I. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. 14.^a edição. Rio de Janeiro, Brasil: Editora Globo, 2000.
- LITTON, C. D. The use of light scattering and ion chamber responses for the detection of fires in diesel contaminated atmospheres. 2002. *Fire and Safety Journal*, 37 (409-425).
- MATIAS, F. A. A.; OLIVEIRA, W. A. de; MOSCHIM, E. Fibre optic sensor for diesel engine smoke measurement. February 1997. Elsevier Science - Sensor and Actuators.
- NATIONAL SEMICONDUCTOR. *LM35 - Precision Centigrade Temperature Sensors*. Endereço eletrônico: <http://www.national.com/>, Novembro 2000.
- NATIONAL SEMICONDUCTORS. *Monolithic Sample and Hold Circuit*. Endereço eletrônico: <http://www.national.com>, Julho 2000.
- OSRAM. *Lâmpadas Fluorescentes Compactas*. Endereço eletrônico: <http://www.osram.com.br/produtos/ilumgeral/compact/index.html>, Fevereiro 2006.

PEREIRA, J. C. Motores e geradores - princípio de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores. 2000. [Http://www.joseclaudio.eng.br/](http://www.joseclaudio.eng.br/).

PERTENCE, A. *Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos*. Sexta edição. Porto Alegre, RS, Brasil: Bookman, 2003.

POZRIKIDIS, C. *Fluid Dynamics Theory, Computation, and Numerical Simulation*. 1st edition. Norwell, Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 2001.

REEVE, R. N. *Introduction to Environmental Analysis*. First edition. Chippenham, Wiltshire: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

SA, M. C. de. *Programação C para Microcontroladores 8051*. 1.^a edição. São Paulo, SP, Brasil: Editora Érica, 2005.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*. Quarta edição. São Paulo, SP, Brasil: Makron Books, 2000.

SILVA, L. P. da et al. Sistema de aquisição de dados de baixo custo para um grupo gerador do ciclo diesel. novembro 2005. Congresso SAE Brasil 2005.

ST-MICROELECTRONICS. *TL084 General Purpose J-FET Operational Amplifiers*. Endereço eletrônico: <http://www.st.com>, Março 2001.

SYSTEM SENSOR. *System Smoke Detector*. Endereço eletrônico: <http://www.systemsensor.com>, Fevereiro 2006.

TEXAS INSTRUMENTS. *TLV5618A 2.7-V to 5.5-V Low-power dual 12-bit digital to analog converter with power down*. Endereço eletrônico: <http://www.ti.com>, 2002.

TOSHIBA. *Toshiba Laser Diode - TOLD9221M*. Endereço eletrônico: <http://www.semicon.toshiba.co.jp/eng/index.html>, Julho 2002.

U.S. Bureau of Mines. *Ringelmann Smooke Chart*. Washington, May 1967.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Mechanical Science Volume 1 of 2; DOE Fundamentals Handbook*. Washington, D.C., January 1993. DOE-HDBK-1018-1-93.

WEINERT, D. W. et al. Light scattering characteristics and size distribution of smoke and nuisance aerosols. 2002. Fire Safety Science-Proceedings Of The Seventh International Symposium.

WEISSENSTEIN, M. Pollution fighters take close look at diesel fumes. Endereço eletrônico: <http://www.reviewjournal.com>, September, 2nd 2001. Las Vegas Review-Journal.

WYATT TECHNOLOGY. *Intensity of Scattered Light and Molar Mass*. Endereço eletrônico: <http://www.wyatt.com/theory/rayleighscattering/mass.cfm>, Fevereiro 2006.