



**Mónica Ari Sano**

**Avaliação metrológica de emissores e detectores ópticos  
aplicados à caracterização de poluentes particulados  
atmosféricos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes

Rio de Janeiro, abril de 2003.



**Mónica Ari Sano**

**Avaliação metrológica de emissores e detectores ópticos  
aplicados à caracterização de poluentes particulados  
atmosféricos.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. Maurício Nogueira Frota**

Programa de Pós-Graduação em Metrologia- PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Danays Morejón González**

Departamento de Física - PUC-Rio

**Prof. Ney Augusto Dumont**

Coordenador Setorial de Pós-graduação e Pesquisa do Centro Técnico Científico- PUC-Rio

Rio de Janeiro, 4 de abril de 2003

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### **Mónica Ari Sano**

Graduou-se (2000) em Engenharia Química, na Universidad Nacional San Agustín (UNSA) em Arequipa, Perú. Estudou Computação e Informática no Instituto Honorio Delgado Espinoza (IST. HDE), Arequipa, Perú.

#### Ficha Catalográfica

Ari Sano, Mónica

Avaliação metrológica de emissores e detectores ópticos aplicados à caracterização de poluentes particulados atmosféricos / Mónica Ari Sano; orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Metrologia para a Qualidade Industrial, 2003.

[17], 89 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Metrologia para a Qualidade Industrial.

Inclui referências bibliográficas.

1. Metrologia – Teses. 2. Concentração de poluentes. 3. Avaliação experimental. 4. Emissores ópticos. 5. Detectores ópticos. 6. Poluentes. I. Gomes, Marcos Sebastião de Paula. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Metrologia para a Qualidade Industrial. III. Título.

CDD: 389.1

A Dios por la vida que me da día a día,  
a mis padres Zenobio y Rosa por el apoyo incondicional,  
a mi hermana Elbinia por su amistad incomparable,  
a Jorge por todo el cariño que me brinda,  
y a mis amigos de siempre.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Marcos Sebastião de Paula Gomes pela parceria para a realização deste trabalho.

À Capes e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não teria sido realizado.

Ao meu coordenador, Professor Maurício Nogueira Frota, pela confiança e estímulo.

A Danays pelo estímulo e ajuda durante os testes realizados, e pela sua amizade.

A José Maurício pelo apoio técnico em todo momento.

Aos professores que participaram da banca examinadora.

A Eliane pela amizade, paciência e disposição.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Metrologia para a Qualidade Industrial e da Eng. Mecânica, pelos ensinamentos e pela ajuda.

Aos meus grandes amigos por todo apoio, paciência, compreensão, amizade e por todos os momentos compartilhados.

Aos meus amigos da UNICERJ pelas belas excursões que tivemos, e sobretudo pela amizade.

A todas aquelas pessoas que conheci aqui no Rio, que foram muito legais comigo e que trouxeram muita felicidade a minha vida.

A minha família pela atenção e carinho em todo momento, o que considero fundamental na minha vida.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam e me ajudaram.

## Resumo

Sano, Mónica Ari. **Avaliação metrológica de emissores e detectores ópticos aplicados à caracterização de poluentes particulados atmosféricos.** Rio de Janeiro, 2003. 106p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Metrologia para Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A poluição atmosférica é um problema mundial latente e é prejudicial à saúde, à visibilidade e ao clima. Devido a estes fatores, diversos estudos e pesquisas foram desenvolvidos para caracterizar a sua composição química, concentração, tamanho de partículas, etc. Com o objetivo de construir instrumentos adequados para o controle da qualidade do ar, mas estes instrumentos são sofisticados, complicados e de alto custo.

Esta dissertação refere-se ao estudo de viabilidade para a utilização de componentes optoeletrônicos simples, tais como diodos emissores de luz (LED) e fotodetectores ópticos, como sensores de medição da variação da concentração de poluentes particulados atmosféricos em relação ao tempo.

O princípio de medição baseia-se nas propriedades ópticas da luz: reflexão, refração e absorção que ocorre quando um feixe de luz incide sobre as partículas de um poluente qualquer, dando lugar à atenuação da intensidade do feixe incidente, que é proporcional à concentração de poluente.

Selecionaram-se LED e fotodetectores, segundo as informações dadas nas especificações fornecidas pelo fabricante. Formaram-se quatro tipos diferentes de Pares Emissores-Detectores, (Pares E-D), onde cada LED trabalhava com um fotodetector específico.

As avaliações foram feitas em função dos Pares E-D nas condições recomendadas pelo fabricante e, selecionaram-se dois tipos diferentes de Pares E-D, que apresentaram melhores características físicas, tempo de resposta (11 e 16 $\mu$ s), o nível do sinal gerado pelo fotodetector (entre 2,50V e 3,50V), e estabilidade em uma faixa de temperatura de 20°C à 30°C.

Para testar o funcionamento dos Pares E-D como sensores de medição da variação da concentração dos poluentes particulados atmosféricos foi construída uma maquete instrumentada com oito Pares (E-D), quatro de cada tipo dos Pares E-D selecionados previamente. Teve-se cuidado na disposição física dos Pares E-D para evitar interferências de luz. Para diminuir o ruído do circuito, a placa Protoboard foi substituída por uma placa impressa. A razão sinal/ruído foi de 3,242V/0,020V, (162:1).

Foi desenvolvido um programa específico no software LabVIEW, com o propósito de registrar os sinais gerados pelos fotodetectores a cada 10  $\mu$ s e armazená-los em uma base de dados para posterior análise.

A maquete instrumentada e o software de aquisição representam um sistema de medição para a caracterização da dispersão dos poluentes particulados atmosféricos.

Para verificar o desempenho da maquete instrumentada e do software de aquisição, foram feitas simulações de contaminação ambiental. Utilizando uma máquina geradora de fumaça, jogou-se fumaça sobre a maquete, foram obtidos resultados satisfatórios, já que trabalhando com os oito Pares E-D ativos, conseguiu-se obter 12500 dados por segundo para cada Par E-D. Estas quantidades de dados registrados pelo programa feito no software LabVIEW foram mais que suficientes para a construção das curvas de caracterização preliminares.

### **Palavras-chave**

Metrologia; concentração de poluentes; avaliação experimental; emissores ópticos; detectores ópticos; poluentes.

## Abstract

Sano, Mónica Ari. **Metrological evaluation of optical emitters and detectors applied to the characterization of atmospheric particulates pollutants.** Rio de Janeiro, 2003. 106p. Dissertation - Department of Metrology to Industrial Quality, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The atmospheric pollution is a latent world-wide problem, and it is harmful to the health, visibility and climate. For these factors, several studies and researches have been developed to characterize the chemical composition of the pollutants, concentration, size of particles, etc, with the objective of constructing adjusted instruments for the control of the air quality, but these instruments are sophisticated, complicated and very expensive.

This dissertation is a study about the feasibility to use simple optoelectronic components, such as light emitting diodes (LED) and optical photo detectors, as sensors for measuring the variation of the concentration of atmospheric particulate pollutants in relation to time.

The measurement principle is based on the optic properties of the light: reflection, refraction and absorption that occur when a light beam arrives on particles of any pollutant, taking place the attenuation of the intensity of the incident beam, which is proportional to the pollutant concentration.

LED and photo detectors were selected according to information given in the specifications supplied for the manufacturer. Four different types of Pairs formed Emitters-Detectors, (Pairs E-D), where each LED worked with a specific photo detector.

The evaluations were made in function of the Pairs E-D according to the recommendation of the manufacturer and two types different of Pairs E-D were selected, which presented better physical characteristics, time of response (11 and 16 $\mu$ s), level of the signal generated by the photo detector, (between 2,50V and 3,50V), and stability in a range of temperatures between 20°C to 30°C.

To test the functioning of the Pairs E-D as sensors for measuring of the variation of the concentration of the atmospheric particulate pollutants. It was built an instrumented reduced model with eight Pairs E-D was built, four of each type of the Pairs E-D selected previously. It was taken care of the physical disposition of the Pairs E-D to prevent light interferences. To reduce



the noise of the circuit, the Protoboard was substituted by a circuit board printed. The relation signal/noise was  $3,242V/0,020V$ , (162:1).

A specific program was developed in the software LabVIEW. The goal was to register the signals generated by photo detectors at each  $10\mu s$ , and to store the data for posterior analysis.

The instrumented reduced model and the software to the data acquisition represent a system for measurement and the characterization of the dispersion of the atmospheric particulate pollutants.

To verify the performance of the instrumented reduced model and the software for acquisition, simulations of ambient contamination were made. A FOG machine was used to generate smoke on the reduced model, The results were satisfactory. Working with the eight active E-D Pairs, it was possible to get 12500 data per second for each Pair E-D. This amount of registered data by the acquisition program in LabVIEW was enough for the construction of the preliminary curves of characterization for the E-D Pairs.

## **Keywords**

Metrology; concentration of pollutants; evaluation; optical emitters; optical detectors; pollutants.

# Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
1.1. Poluição Atmosférica	18
1.2. Aerossóis	19
1.3. Qualidade do ar	20
1.4. Objetivos da dissertação	21
1.5. Organização do documento	22
2 PROPRIEDADES ÓPTICAS	23
2.1. Luz	23
2.2. Espectro eletromagnético	23
2.3. Absorção	24
2.4. Refração	24
2.5. Reflexão	25
2.6. Espalhamento	25
2.7. Extinção	27
2.7.1. Eficiência da extinção	28
3 DISPOSITIVOS OPTOELETRÔNICOS	30
3.1. Dispositivos Optoeletrônicos Básicos	30
3.2. Diodo Emissor de Luz (LED)	30
3.2.1. Eficácia Quântica Interna ( $Q_s$ )	32
3.2.2. Eficácia Quântica Externa ( $Q_{ext}$ )	32
3.2.3. Materiais utilizados nos LED	33
3.2.4. Padrões fotométricos do Diodo Emissor de Luz (LED)	34
3.3. Diodos LASER	35
3.4. Fotodetectores	36
3.4.1. Fotorresistores	37
3.4.2. Fotodiodos	37
3.4.3. Fototransistores	38
3.5. Características dos dispositivos fotossensíveis	38
3.5.1. Resposta Espectral	38
3.5.2. Sensibilidade	39

3.5.3. Resposta em frequência	40
3.6. Unidades Ópticas	41
4 ABORDAGENS METROLÓGICAS	42
4.1. Conceitos Metrológicos Básicos	42
4.1.1. Grandeza Mensurável [VIM 1.1]	42
4.1.2. Medição [VIM 2.1]	42
4.1.3. Princípio de medição [VIM 2.3]	42
4.1.4. Procedimento de medição [VIM 2.5]	42
4.1.5. Mensurando [VIM 2.6]	43
4.1.6. Sinal de medição [VIM 2.8]	43
4.1.7. Resultado de uma medição [VIM 3.1]	43
4.1.8. Indicação de um Instrumento de Medição [VIM 3.2]	44
4.1.9. Exatidão da Medição [VIM 3.5]	44
4.1.10. Repetitividade [VIM 3.6]	44
4.1.11. Reprodutibilidade [VIM 3.7]	45
4.1.12. Desvio Padrão Experimental [VIM 3.8]	45
4.1.13. Incerteza de Medição [VIM 3.9]	46
4.1.14. Incerteza Padronizada	46
4.1.15. Incerteza Padronizada Combinada	47
4.1.16. Incerteza Expandida	47
4.1.17. Erro [VIM 3.10]	47
4.1.18. Erro aleatório [VIM 3.13]	48
4.1.19. Erro sistemático [VIM 3.14]	48
4.1.20. Instrumento de medição [VIM 4.1]	48
4.1.21. Sistema de medição [VIM 4.5]	49
4.1.22. Instrumento de medição indicador [VIM 4.6]	49
4.1.23. Instrumento de medição registrador [VIM 4.7]	49
4.1.24. Sensor [VIM 4.14]	49
4.1.25. Detector [VIM 4.15]	50
4.1.26. Faixa nominal [VIM 5.1]	50
4.1.27. Faixa de medição [VIM 5.4]	50
4.1.28. Condições de utilização [VIM 5.5]	50
4.1.29. Condições limites [VIM 5.6]	51
4.1.30. Condições de referência [VIM 5.7]	51
4.1.31. Sensibilidade [VIM 5.10]	51

4.1.32. Resolução [VIM 5.12]	51
4.1.33. Estabilidade [VIM 5.14]	51
4.1.34. Tempo de resposta [VIM 5.17]	52
4.2. Cálculos estatísticos	52
4.2.1. Comparação entre duas médias aritméticas:	52
5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	54
5.1. Seleção dos emissores e detectores ópticos.	54
5.2. Formação dos Pares E-D.	55
5.3. Avaliação dos Pares E-D	56
5.3.1. Avaliação do tempo de resposta dos Pares E-D	56
5.3.2. Equipamento utilizado	57
5.4. Construção da maquete instrumentada	60
5.5. Circuito Eletrônico com os Pares E-D	61
5.6. Desenvolvimento do programa de aquisição de dados.	62
5.7. Simulação de contaminação ambiental	65
6 RESULTADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	66
6.1. Avaliação do tempo de resposta	66
6.1.1. Tempo de resposta do Par E-D 1	67
6.1.2. Tempo de resposta do Par E-D 2	70
6.1.3. Tempo de resposta do Par E-D 3	72
6.1.4. Tempo de resposta do Par E-D 4	76
6.2. Estabilidade do Tempo de resposta dos Pares E-D em relação à Temperatura	79
6.2.1. Estabilidade do Tempo de resposta do Par E-D 2	79
6.2.2. Estabilidade do Tempo de resposta do Par E-D 3	80
6.2.3. Estabilidade do Tempo de resposta do Par E-D 4	80
6.3. Variação do sinal de saída do Fotodetector	81
6.4. Nível de ruído	83
6.5. Simulação de contaminação ambiental	84
6.5.1. Utilizando os Pares E-D 2	85
6.5.2. Utilizando os Pares E-D 4	85
6.5.3. Utilizando os Pares E-D 2 e Pares E-D 4	86
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
9 BIBLIOGRAFIA	94
10 ANEXOS	96
10.1. Características das partículas atmosféricas.	96
11 APÊNDICE	97
11.1. Descrição do Programa de Aquisição no Software LabVIEW.	97
11.1.1. Painel Frontal	97
11.1.2. Diagrama de blocos	98
11.1.3. Instruções para a operação do programa de aquisição	99
11.2. Cálculo da incerteza do tempo de Resposta e da constante de tempo dos Pares E-D	100
11.2.1. Incerteza tipo A	100
11.2.2. Incerteza tipo B	100
11.2.3. Incerteza padronizada combinada	101
11.2.4. Incerteza Expandida	102
11.3. Avaliação da potência de saída do LED em relação à distância, Tensão e Intensidade de corrente fornecida.	104

## Lista de figuras

Figura 1 - Tamanho mais comuns de partículas da natureza.	19
Figura 2- Fontes de poluentes atmosféricos.	20
Figura 3- Espectro eletromagnético mostrando a faixa da luz visível (a figura não está em escala).	23
Figura 4- Absorção da luz.	24
Figura 5- Refração da luz.	24
Figura 6- Reflexão da luz.	25
Figura 7- Plano de espalhamento e o ângulo de espalhamento da luz.	26
Figura 8- Decremento da amplitude da onda incidente devido à absorção.	27
Figura 9- Instrumento de medição da atenuação do feixe de luz incidente que atravessa as partículas do aerossol.	28
Figura 10- Absorção e espalhamento do feixe de luz incidente numa partícula.	28
Figura 11- Diodos emissores de luz (LED).	31
Figura 12- Junção p-n – Polarização direta.	31
Figura 13- Gama de cores segundo o material semicondutor do LED.	33
Figura 14- Intensidade da luz em função do comprimento de onda para diodos LED.	36
Figura 15- Espectro emitido por um LED e espectro emitido por um LASER.	36
Figura 16- Variação da resistência em função do comprimento de onda da radiação.	37
Figura 17- Resposta espectral do fotodetector. Comprimento de onda x Eficiência quântica.	38
Figura 18- Resposta espectral relativa para Si, Ge e Se, comparada ao olho humano.	39
Figura 19- Resposta em frequência.	40
Figura 20- Circuito dos Pares Emissores – Detectores.	56
Figura 21- Sinal do LED e sinal de resposta do Fotodetector.	57
Figura 22- Fonte digital de alimentação PS-5000D -ICEL-GUBINTEC.	58
Figura 23- Gerador de funções GV-10 - ICEL-GUBINTEC.	58
Figura 24- Osciloscópio HP 54645A - HEWLETT PACKARD.	59
Figura 25- Termopar K, CL24 – OMEGA.	59
Figura 26- Multímetro FLUKE 111.	60
Figura 27- Disposição dos LED e fotodetectores.	60

Figura 28- Maquete Instrumentada.	61
Figura 29- Circuito Eletrônico dos Pares E-D.	62
Figura 30- Painel frontal do programa de aquisição no LabVIEW.	63
Figura 31- Diagrama do programa no LabVIEW.	64
Figura 32- Curva do tempo de resposta Par E-D 1	67
Figura 33- Curva do tempo de resposta Par E-D 1	68
Figura 34- Curva do tempo de resposta Par E-D 2	70
Figura 35- Curva do tempo de resposta Par E-D 2	71
Figura 36- Curva do tempo de resposta Par E-D 3	72
Figura 37- Curva do tempo de resposta Par E-D 3	74
Figura 38- Curva do tempo de resposta Par E-D 4	76
Figura 39- Curva do tempo de resposta Par E-D 4	77
Figura 40- Nível de saída do fotodetector, variando V e I no LED (Pares E-D 2)	82
Figura 41- Nível de saída do fotodetector, variando V e I no LED (Pares E-D 4)	82
Figura 42- Máximo nível de ruído encontrado.	83
Figura 43- Ampliação do nível máximo de ruído.	83
Figura 44- Mínimo nível de ruído encontrado.	84
Figura 45- Ampliação do nível mínimo de ruído.	84
Figura 46- Resposta dos Pares E-D 2 na simulação de contaminação.	85
Figura 47- Resposta dos Pares E-D 4 na simulação de contaminação.	85
Figura 48- Resposta dos Pares E-D 2 e Pares E-D 4 na simulação de contaminação.	86
Figura 49- Características das partículas atmosféricas.(Hidy,“Aerosol Technology Properties Behavior and Measurements of Airbornes Particles”).	96
Figura 50- Avaliação do LED.	104
Figura 51- Variação da potência em relação à distância.	106

## Lista de tabelas

Tabela 1 Materiais utilizados na fabricação de alguns LED, comprimento de onda da luz emitida.	34
Tabela 2- Unidades ópticas	41
Tabela 3- Nível de confiança	47
Tabela 4- Pares Emissores-Detectores formados.	56
Tabela 5- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 1	67
Tabela 6- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 1	68
Tabela 7- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 2	70
Tabela 8- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 2	71
Tabela 9- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 3	73
Tabela 11- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 4	76
Tabela 12- Tempo de resposta e constante de tempo do Par E-D 4	77
Tabela 13- Tempo de resposta do Par E-D 2 a 20°, 25° e 30°C	79
Tabela 14- Tempo de resposta do Par E-D 3 a 20°, 25° e 30°C	80
Tabela 15- Tempo de resposta do Par E-D 4 a 20°, 25° e 30°C	80
Tabela 16- Sinal de saída do fotodetector. $T_{\text{alimentação}}$ no LED 2,001V	81
Tabela 17- Sinal de saída do fotodetector. $T_{\text{alimentação}}$ no LED 2,502V	82
Tabela 18- Dados da simulação de contaminação. Pares E-D 2	87
Tabela 19- Dados da simulação de contaminação. Pares E-D 4	88
Tabela 20- Dados da simulação de contaminação. Pares E-D 2 e Pares E-D 4	89
Tabela 21- Cálculo das incertezas do tempo de resposta e constante de tempo dos Pares E-D.	103
Tabela 22- Variação da potência do LED ( $\mu\text{W}$ ) em relação a tensão de alimentação e intensidade de corrente fornecida, e à temperatura.	105



O único modo de evitar os erros é adquirindo experiência;  
Mas a única maneira de adquirir experiência é cometendo erros.