

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS E MEIOS PARA A
CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA

LEONARDO MOREIRA LEÓDIDO

ORIENTADOR: Prof: JOÃO NILDO DE SOUZA VIANNA
CO-ORIENTADOR: Prof: ALESSANDRO BORGES DE SOUSA
OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM
CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA – DF: 07/2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS E MEIOS PARA A
CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE GASES DE
EFEITO ESTUFA

LEONARDO MOREIRA LEÓDIDO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

JOÃO NILDO DE SOUZA VIANNA, Docteur Ing., ENSAM - Paris
(ORIENTADOR)

ALESSANDRO BORGES DE SOUSA OLIVEIRA, Docteur, ENSAM - Paris
(CO-ORIENTADOR)

FERNANDO JORGE RODRIGUES NEVES, Ph.D., UMIST - Inglaterra
(EXAMINADOR INTERNO)

LÉA CONTIER DE FREITAS – Ph.D. Physics, University of London - Inglaterra
(EXAMINADOR EXTERNO)

Brasília – DF, 05 de Julho de 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

LEÓDIDO, LEONARDO MOREIRA

Desenvolvimento de Métodos e Meios para a Calibração Dinâmica de Transdutores de Gases de Efeito Estufa [Distrito Federal] 2006. xiv, 106p., 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2006)

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica

1. Metrologia Dinâmica

2. Transdutores de Gases de Efeito Estufa

3. Dióxido de Carbono

4. Efeito Estufa

I. ENM

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LEÓDIDO, L. M. - Desenvolvimento de Métodos e Meios para a Calibração Dinâmica de Transdutores de Gases de Efeito Estufa – Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia – Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leonardo Moreira Leódido

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Desenvolvimento de Métodos e Meios para a Calibração Dinâmica de Transdutores de Gases de Efeito Estufa.

GRAU/ANO: Mestre/2006

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva os direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Leonardo Moreira Leódido
SQN 313 Bloco B Aptº 201
70.766-020

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por tudo o que tem me proporcionado. Agradeço a minha mãe pelo apoio e pelo suporte em todas as horas, a minha irmã e família pelo incentivo mesmo que a distância e a toda a minha família que sempre me incentivou. Agradeço a minha esposa pelo apoio e pela compreensão.

Agradeço aos professores João Nildo, Alessandro Borges e Jean-Pierre Damion, pela orientação, incentivo e oportunidades em todas as horas, principalmente naquelas onde as dúvidas e problemas pareciam sem solução.

Agradeço aos técnicos José Filipe e Tim pelo apoio na construção dos instrumentos e nas montagens experimentais e a ajuda sempre constante.

Agradeço aos amigos Rafael e Cristiano que deram importantes contribuições no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço as entidades que financiaram este trabalho: Comunidade Europeia – Projeto Alfa e CNPq.

Enfim agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O Protocolo de Quioto prevê metas de redução das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE), por meio da implementação de projetos de desenvolvimento limpo, com investimentos de bilhões de dólares. Para quantificar as emissões e dar base sólida a esses projetos são usadas técnicas e instrumentos que medem as variações das concentrações dos GEE na atmosfera e em locais mais específicos como, áreas urbanas, florestas, represas, etc. As concentrações medidas devem ter confiabilidade para que os valores indicados em um projeto de redução de uma fonte emissora tenham legitimidade e esta é obtida através da utilização de instrumentos metrologicamente confiáveis. Com isso, o objetivo desse trabalho é apresentar uma nova metodologia e o desenvolvimento de um meio para a calibração de transdutores de dióxido de carbono, que considerem o comportamento estático e dinâmico, bem como as variáveis ambientais que influenciam o desempenho do transdutor, assegurando a confiabilidade metrológica dos instrumentos. Para alcançar esse objetivo foram usados o modelo matemático do processo físico ao qual o transdutor é submetido e os dispositivos clássicos de calibração dinâmica, para identificar os parâmetros de desenvolvimento da metodologia e do novo meio de calibração, o Dispositivo de Exposição Rápida a Emissões (DERE). O DERE foi testado e os resultados experimentais e a solução analítica e numérica, do processo físico que ocorre no seu interior, mostraram que a metodologia de calibração proposta e o equipamento desenvolvidos são adequados para a calibração estática e dinâmica de transdutores de CO₂, conforme proposto nos objetivos do trabalho.

ABSTRACT

Kyoto Protocol aims at reducing Greenhouse Effect Gases (GEG) emissions by the implementation of projects for clean development that count with the investment of Billions of dollars. Techniques and instruments for measure the GEG variation in atmosphere are used to quantify emissions and give solid base to these projects. In order to have legitimacy the instrumentation used during the measurement process must be reliable. The objective of this work is to present a new methodology for calibrating carbon dioxide transducers statically and dynamically. To accomplish this objective a calibration device was developed. The transducer physical model was mathematically modeled in order to identify the development parameters and project the calibration device named Device of Fast Exposure to Emissions or DERE. This device was tested and the experimental results compared with numerical and analytical solutions to prove that the methodology proposed and the device developed are adequate for static and dynamic calibration of CO₂ transducers.

RESUMÉ

Le but principal du Protocole de Kyoto est réduire les émissions des gaz à Effet de Serre par la mise en place de développement des projets de la façon la plus propre possible. Pour cela l'utilisation des équipements et des techniques bien spécifiques aident dans la mesure des concentrations de ces gaz dans l'atmosphère. En général, les endroits choisis pour effectuer ces essais sont, par exemple, les forêts, les barrages, les grands centres urbains, etc. Les mesures de concentration obtenues doivent être fiables pour que le projet de réduction de la source polluant fournisse des valeurs avec un faible incertitude. Ainsi, les instruments doivent être étalonnés. Dans, ce sens, ce travail présente une nouvelle méthodologie pour étalonner des capteurs de dioxyde de carbone. Cette méthode considère le comportement statique et dynamique des mesures, ainsi que les variables environnementales qui ont d'influence sur la performance des capteurs. Pour atteindre cet objectif, le modèle mathématique du phénomène mesuré et les dispositifs classiques d'étalonnage dynamiques ont été utilisés. Ces dispositifs identifient les paramètres qui sont appliqués dans la méthodologie d'étalonnage proposée le Dispositif d'Overture Rapide à Emissions (DORE). Le DORE a été testé et les résultats expérimentaux ainsi que les solutions analytique et numérique du phénomène, à l'intérieur du capteur, montrent que la méthodologie d'étalonnage, présentée est adaptée pour les statique et dynamique capteurs de CO₂. Cela indique aussi que l'équipement développé est performant.

ÍNDICE

LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
INTRODUÇÃO	1
1. OBJETIVOS	5
2. METODOLOGIA.....	6
2.1 METODOLOGIA DE TRABALHO	6
3. AQUECIMENTO GLOBAL E MERCADO DE CARBONO.....	7
3.1 EFEITO ESTUFA.....	7
3.2 CONVENÇÕES CLIMÁTICAS E O MUNDO	9
3.2.1 IPCC	9
3.2.2 O PROTOCOLO de Quioto.....	10
3.2.3 O Brasil e o Protocolo de Quioto	11
3.3 MDL, AS FLORESTAS E REPRESAS.....	11
3.4 SITUAÇÃO ATUAL DO MERCADO DE CARBONO	12
4. PROCESSO FÍSICO DAS EMISSÕES DE CO₂ E MODELAGEM DO PROCESSO	15
4.1 AS CARACTERÍSTICAS E O CICLO DO CARBONO.....	15
4.2 CONDIÇÕES DE TRANSPORTE DO CO ₂ NA ATMOSFERA.....	15
4.2.1 Camada Limite.....	16
4.2.2 modelagem atmosférica	16
4.2.3 Difusão Mássica	20
4.3 MODELO PROPOSTO PARA A DIFUSÃO DE CO ₂	23
4.4 O FLUXO DE CO ₂	25
4.4.1 Método de Eddy Correlation – Método de Correlação Turbulenta	25
5. MEDIÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	28
5.1 INVENTÁRIOS	28

5.2 METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE EMISSÕES	28
5.3 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	29
5.4 TRANSDUTORES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	31
5.4.1 <i>Medição Eletroquímica</i>	32
5.4.2 <i>Espectroscopia molecular</i>	33
5.4.3 <i>Espectroscopia do Dióxido de Carbono</i>	36
5.4.4 <i>Transdutor Utilizado no Trabalho</i>	38
6. PRINCÍPIOS DA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA	43
6.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO	43
6.2 CALIBRAÇÃO	44
6.3 CARACTERÍSTICAS SISTEMÁTICAS.....	45
6.3.1 <i>Características Estáticas</i>	46
6.4 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS	48
7. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA.....	57
7.1 CALIBRAÇÃO ATUAL DE TRANSDUTORES DE CO ₂	57
7.2 METODOLOGIA PROPOSTA	57
7.2.1 <i>Dispositivo de Calibração</i>	58
7.3 ENSAIOS	60
7.3.1 <i>influência da pressão</i>	60
7.3.2 <i>confirmação dos parâmetros identificados</i>	63
8. NOVO DISPOSITIVO DE CALIBRAÇÃO	66
8.1 CRITÉRIOS DO NOVO DISPOSITIVO	66
8.2 CONTROLE DAS GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA	67
8.3 DESCRIÇÃO DO DERE	67
8.3.1 <i>Câmara maior e menor</i>	67
8.3.2 <i>Sistema de Abertura</i>	68
8.3.3 <i>Ventilador</i>	69
8.3.4 <i>Sistema pneumático e de alimentação</i>	69

8.3.5 Bancada	69
8.3.6 simulação numérica da bancada	70
8.4 ENSAIOS COM O DERE	71
8.4.1 Determinação da Relação Concentração x Tensão.....	71
8.4.2 Calibração Estática	72
8.5 GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA	76
8.5.1 Pressão.....	76
8.5.2 Luminosidade.....	78
8.6 CALIBRAÇÃO DINÂMICA.....	80
8.6.1 Determinação das Características Dinâmicas do Transdutor	85
9. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	90
9.1 CONCLUSÕES	90
9.2 RECOMENDAÇÕES.....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
ANEXO I	97
ANEXO II.....	101
ANEXO III	104
ANEXO IV	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais Gases Causadores do Efeito Estufa (Krupa, 1997), como modificações.....	8
Tabela 3.3 – Projetos de sequestro de carbono em execução no Brasil (Rocha, 2003; May e al., 2005).	14
Tabela 4.1 – Divisão da Camada Limite Planetária.....	16
Tabela 5.1 – Técnicas para monitoramento ambiental lento.	30
Tabela 5.2 – Técnicas para monitoramento ambiental rápido.	30
Tabela 5.3 – Técnicas para Monitoramento Remoto.....	31
Tabela 5.4 – Carbon Dioxide IRcel™ - Especificações.	40
Tabela 6.1 – Características Sistemáticas (Bentley, 1988; Rubio, 2000; INMETRO-VIM, 1995).....	45
Tabela 6.2 – Respostas de um elemento de segunda ordem a um degrau Bentley (1988).	54
Tabela 6.3 – Características dinâmicas para um elemento de segunda ordem (Oliveira, A.B.S., 2004 e Villa, 2005).	55
Tabela 6.4 – Exemplos de dispositivos usados na calibração dinâmica de transdutores de pressão.	56
Tabela 7.1 – Características dinâmicas para os ensaios realizados no DOR 10.	62
Tabela 7.2 – Tempo de Descida com o DOR 10 e Balão.	65
Tabela 8.1 – Tempo de acionamento do sistema de abertura.	68
Tabela 8.2 – Resultados para verificar se a pressão é uma entrada interferente.....	77
Tabela 8.3 – Resultados para verificar se a luminosidade é uma entrada interferente.	79
Tabela 8.4 – Resultados para verificar se a luminosidade é uma entrada modificadora.	80
Tabela 8.5 – Tempos de Subida para o transdutor da câmara menor, com o ventilador em várias posições.....	82
Tabela 8.6 – Tempos de Subida para cada velocidade com diferentes montagens, com o ventilado na posição 1.	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Balanço de radiação da Terra, Os fluxos de radiação à esquerda são as ondas curtas e a direita são os fluxos de ondas longas	7
Figura 3.2 – Variação da temperatura.....	8
Figura 3.3 – Evolução do Mercado de Carbono. Valor da tonelada de carbono equivalente entre.....	13
Figura 3.4 – Evolução do Mercado de Carbono. Volume de toneladas de carbono negociadas entre ..	13
Figura 4.1 – Diagrama de um modelo de poluição atmosférica.	17
Figura 4.2 – Desenho esquemático para um modelo de dispersão com pluma Gaussiana.	18
Figura 4.3 – Modelagem do processo de difusão ordinária no dispositivo de calibração.	23
Figura 4.4 – Representação gráfica de um Degrau de Heaviside	25
Figura 5.1 – (a) Esquema de um transdutor potenciométrico. (b) Célula química (adaptado de Merkle e al.,2006).	33
Figura 5.2 – Estiramento simétrico, $\sim 1330\text{ cm}^{-1}$	36
Figura 5.3 – Modalidade de Dobra, $\sim 2349\text{ cm}^{-1}$	37
Figura 5.4 – Estiramento Assimétrico, $\sim 667\text{ cm}^{-1}$	37
Figura 5.5 – Espectro do Dióxido de Carbono.	38
Figura 5.6 – Esquema de um transdutor de CO_2 , com os três principais componentes.....	39
Figura 5.7 – Transdutor infravermelho de CO_2	39
Figura 5.8 – Micro foto da seção transversal do filtro de silicone.....	39
Figura 5.9 – Transdutor de CO_2 e kit eletrônico.....	40
Figura 5.10 – (a) Corpo do transdutor; (b) Detalhe interno do transdutor.....	40
Figura 5.11 – Esquema do detector.	41
Figura 6.1 – Esquema genérico de um sistema de medição.	43
Figura 6.2 – Um sistema de medição sobre influência das entradas ambientais.	44
Figura 6.3 – Exemplo de curva de calibração de um sistema ou transdutor.....	44
Figura 6.4 – Sistema massa-mola com amortecimento.	51
Figura 6.5 – Estímulos mais utilizados em processos de calibração dinâmica.....	52
Figura 6.6 – Resposta de um transdutor de primeira ordem submetido a um degrau de Heaviside.....	53

Figura 6.7 – Resposta de um transdutor de segunda ordem submetido a um degrau de Heaviside.	54
Figura 6.8 – Características dinâmicas de elemento de segunda ordem.....	55
Figura 7.1 – Calibração de transdutores de CO ₂	57
Figura 7.2 – Dispositivo de Abertura Rápida – DOR 10. LMD-ENSAM/Paris.....	58
Figura 7.3 – Alterações realizadas no dispositivo de abertura rápida DOR 10.	59
Figura 7.4 – (a) Vista Geral do DOR 10; (b) Detalhe da câmara menor, do sistema de abertura e dos pontos de controle da pressão; (c) Peça do fundo da câmara maior com o ventilador e os contatos elétricos; (d) Fundo da câmara maior e (e) Suporte do transdutor da câmara maior e esse fixado no orifício central.	59
Figura 7.5 – Resposta do transdutor para concentração igual a 1% com diferentes níveis de pressão..	61
Figura 7.6 – Resposta do transdutor para concentração igual a 4% com diferentes níveis de pressão..	62
Figura 7.7 – Desenho esquemático da Câmara menor do DOR 10.	63
Figura 7.8 – Montagem Experimental com o uso de um balão.	64
Figura 7.9 – Ensaio com concentração igual a 1%, no DOR10.....	64
Figura 7.10 – Ensaio com concentração igual a 1%, com balão.....	64
Figura 7.11 – Ensaio com concentração igual a 4%, no DOR 10.....	65
Figura 7.12 – Ensaio com concentração igual a 4%, com balão.....	65
Figura 8.1 – Novo Dispositivo de Calibração.....	66
Figura 8.2 – Esquema do circuito elétrico montado para medir a velocidade do sistema de abertura. .	68
Figura 8.3 – Esquema da montagem do ventilador dentro da câmara maior.....	69
Figura 8.4 – Esquema pneumático e de alimentação de CO ₂ do DERE.....	69
Figura 8.5 – Bancada e detalhes de controle do DERE.	70
Figura 8.6 – Malha 2-D para o DERE.	70
Figura 8.7 – Resultado da simulação numérica 2-D da Difusão Pura, para um nó localizado no fundo da câmara menor, com a concentração inicial igual a 1%.	71
Figura 8.8 – Ajuste de curva para o transdutor instalado na câmara maior.....	72
Figura 8.9 – Ajuste de curva para o transdutor instalado na câmara menor.....	72
Figura 8.10 – Sistema para o preenchimento do DERE com o gás padrão.	72
Figura 8.11 – Curva teórica da variação da concentração no interior do DERE com $V = 5 \text{ l}$ e $Q = 1 \text{ l/min}$, na Eq. 8.3.	74

Figura 8.12 – Resultado experimental da variação da concentração dentro do DERE.	74
Figura 8.13 – Pontos experimentais e a curva de ajuste.	75
Figura 8.14 – Curvas experimental e teórica.....	76
Figura 8.15 – Variação no sinal do transdutor da câmara maior.	77
Figura 8.16 – Relação entre as curvas experimentais sem ajuste (pressão de ensaio igual à <i>101 kPa</i>) e com ajuste (pressão de ensaio igual à <i>89 kPa</i>).	78
Figura 8.17 – Variação no sinal do transdutor com a luminosidade.....	79
Figura 8.18 – Variação no sinal do transdutor com a luminosidade.....	80
Figura 8.19 – DERE, concentração de 1%, Posição 1.....	81
Figura 8.20 – DERE, concentração de 1%, Posição 2.....	81
Figura 8.21 – DERE, concentração de 1%, Posição 3.....	81
Figura 8.22 – DERE, concentração de 1%, Posição 4.....	82
Figura 8.23 – Tensão no ventilador igual a 10 volts.....	83
Figura 8.24 – Tensão no ventilador igual a 12 volts.....	83
Figura 8.25 – Tensão no ventilador igual a 13 volts.....	84
Figura 8.26 – Tensão no ventilador igual a 15 volts.....	84
Figura 8.27 – Curva experimental e representação gráfica da constante de tempo e do tempo de resposta.	86
Figura 8.28 – Curva experimental e ajuste.	86
Figura 8.29 – Função de transferência (Magnitude e fase).....	87
Figura 8.30 – Função de transferência calculada utilizando como entrada o degrau perfeito.	88
Figura 8.31 – Função de transferência calculada utilizando como entrada a simulação da difusão mássica.....	88

INTRODUÇÃO

O uso dos recursos naturais pelo homem é uma das bases para a manutenção da vida no planeta. Desde tempos remotos a humanidade tem buscado formas de usar os recursos naturais e tem obtido êxito, mas muitas vezes os meios de exploração agredem o meio ambiente, não respeitando os limites naturais de renovação e liberando substâncias tóxicas que alteram, desequilibram ou destroem os ecossistemas. O uso não responsável dos recursos naturais tem, ao longo da história, gerado benefícios e riquezas para o homem, mas por outro lado, tem gerado problemas ambientais antropogênicos como a diminuição da quantidade de água potável, a contaminação dos solos, destruição de vegetações, destruição da camada de ozônio, aquecimento global, alterações climáticas, etc.

Um dos problemas ambientais mais discutidos atualmente é o aquecimento global, que é provocado pelo aumento das emissões de gases de estufa, dentre os quais o principal é o dióxido de carbono (CO_2). O mundo começou a se preocupar com esse problema a partir de 1972 e desde então reuniões têm sido realizadas a fim de debater o assunto. Em 1997 essas discussões tomaram corpo através da criação do Protocolo de Quioto, que prevê a redução das emissões dos gases causadores do efeito estufa pelos países industrializados em 5,2% em relação aos níveis de 1990. O protocolo também prevê formas de flexibilização, chamados Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permitem que os países desenvolvidos invistam em projetos que gerem créditos de carbono em outros países (CENAMO, 2004; MCT e MREx, 1998).

O custo da redução da emissão de uma tonelada de carbono é estimado em US\$ 100. Para alcançar a meta estabelecida no Protocolo de Quioto será preciso baixar as atuais emissões em cerca de 900 milhões de toneladas de carbono (CEBDS, 1999). Com isso, o custo total estimado do investimento para a redução chega a US\$ 100 bilhões, que será o valor que o mundo deverá investir nos próximos anos. O Brasil tem grandes chances de arrecadar parte desses recursos devido à matriz energética brasileira, que é baseada em hidroelétricas, ser tecnicamente limpa e à quantidade de floresta tropical que o país possui.

Uma importante discussão dentro do protocolo de Quioto é a inclusão ou não das florestas nativas no MDL. Essa possibilidade surgiu quando trabalhos científicos como os realizados por Santos (1999), Rocha e al. (2002), Phillips e al. (1998), Nobre (2000), etc., verificaram que a diferença do carbono absorvido e liberado entre a fotossíntese e a respiração é positiva. Logo, as florestas seriam um sumidouro, absorvendo mais carbono do que liberam. Quando se considera os 4.000 milhões de hectares de florestas nativas, a quantidade líquida de carbono retida, nas condições mais conservadoras, pode equivaler a 10% de todo CO_2 lançado no planeta anualmente. A quantificação exata desses valores é importante para fortalecer a posição do Brasil nos projetos de MDL.

Os trabalhos de Phillips e al. (1998) e Nobre (2000), mostram resultados de medições experimentais da variação diária da concentração de carbono, através de transdutores instalados na floresta. Com os dados coletados estima-se que a Amazônia absorve de 2 a 8 toneladas de carbono por hectare por ano.

Essa grande variação entre as quantidades de carbono que são absorvidas está associada à heterogeneidade da floresta amazônica, às variações climáticas locais e às incertezas envolvidas nas metodologias e nos instrumentos de medição.

Brown e al. (1995) mostram as dificuldades técnicas e as incertezas associadas ao cálculo da biomassa da floresta amazônica. Por exemplo, a incerteza associada às medições das variáveis de campo envolvidas no processo, pode ser grosseiramente estimada em $\pm 20\%$ sobre a média, para um intervalo de confiança de 95%.

Com isso, pode-se dizer que um sistema de medição sem uma adequada caracterização metrológica conduz a expressivas incertezas nas medições do fluxo de carbono, levando a uma imagem imprecisa da floresta. Baseando-se no mercado de créditos de carbono, valores imprecisos na medição do carbono poderiam acarretar prejuízos da ordem de milhões de dólares, em razão do volume de recursos destinados à redução de emissões. Inegavelmente, o componente mais importante de um sistema de medição de emissões atmosféricas são os transdutores de CO₂.

Além da medição do sequestro de carbono, os transdutores de concentração de dióxido de carbono são usados em diversos instrumentos utilizados nas mais diversas aplicações, desde respiradores artificiais até dispositivos instalados em grandes indústrias para o controle das emissões. Uma característica importante que deve ser observada para todas as aplicações, é a confiabilidade sobre a medição realizada. Para dar qualidade aos dados coletados é necessária a criação de normas e a utilização de instrumentos caracterizados metrologicamente. Para tanto, é necessário que esses instrumentos tenham sido submetidos a calibrações onde a sua resposta tenha sido avaliada levando em consideração as variáveis que podem interferir no seu funcionamento.

A calibração dos transdutores de CO₂, especialmente dos infravermelhos, é feita hoje utilizando um gás padrão que passa por um tubo colocado no caminho ótico do transdutor. Esse método permite que o transdutor seja, parcialmente, calibrado estaticamente, não considerando a influência das variáveis ambientais e as características dinâmicas do transdutor. Diante disso, verifica-se que é preciso melhorar as tecnologias de medição de carbono, gerando dados que permitam a análise de todas as variações que possam ocorrer, desde a variação rápida do mensurando até variações aleatórias das variáveis ambientais.

É nesse contexto que se insere este trabalho, que tem como objetivo apresentar um novo método para a calibração de transdutores de dióxido de carbono, que leve em conta o seu desempenho estático e dinâmico, bem como o desenvolvimento de meios para realizar essa calibração. Com esses métodos e meios, as características metrológicas do transdutor e a influência das entradas ambientais poderão ser determinadas e avaliadas. Para alcançar o objetivo proposto, o processo físico ao qual é submetido o transdutor foi formulado teoricamente, e a partir dessa formulação foi desenvolvido o equipamento de calibração. Um transdutor infravermelho comercial foi utilizado para validar o método e testar o equipamento desenvolvido. Não será objeto de estudo nesse trabalho o modelamento das incertezas associadas aos processos, mas vale ressaltar que esse tema será estudado futuramente.

Uma parte do desenvolvimento experimental foi realizada na École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM – Paris), onde usou-se o Dispositivo de Abertura Rápida (DAR) para identificar limitações e parâmetros de projeto. Esses resultados foram utilizados no desenvolvimento do novo equipamento de calibração, o Dispositivo de Exposição Rápida a Emissões (DERE), que foi construído e testado no Laboratório de Metrologia Dinâmica da Universidade de Brasília (LMD – UnB).

A dissertação está estruturada em nove capítulos, mais a Introdução:

O primeiro capítulo apresenta uma breve justificativa e os objetivos gerais e específicos do trabalho, além de duas hipóteses que devem ser avaliadas no fim do trabalho.

No segundo capítulo é mostrada a metodologia que foi utilizada para atingir os objetivos propostos.

No terceiro capítulo é feita a contextualização do problema da emissão dos gases causadores do efeito estufa, o aquecimento global e o mercado de créditos de carbono. Também se discute experimentos que mostram a variação dos valores medidos e as incertezas associadas aos cálculos da biomassa e à quantidade de carbono que é absorvida por uma floresta.

O quarto capítulo é dedicado à formulação teórica do problema, às características específicas de difusão do dióxido de carbono e aos parâmetros que são usados no modelamento do transporte de CO₂, abordando desde o caso mais geral, através da modelagem atmosférica, até o caso mais específico do modelamento analítico da difusão mássica no dispositivo de calibração. É mostrado também o método usado na medição do fluxo de CO₂ (Correlação Turbulenta), que utiliza a concentração CO₂ medida por transdutores para determinar o fluxo que entra ou sai de uma floresta.

No quinto capítulo se discute as técnicas de medição e os tipos de transdutores de poluentes atmosféricos. É discutido o princípio de funcionamento do transdutor que foi utilizado nesse trabalho, bem como suas características construtivas, limitações e componentes.

O sexto capítulo apresenta a base teórica para a calibração estática e dinâmica de sistemas de medição e são discutidos os conceitos e as características envolvidas nesses processos de calibração.

No sétimo capítulo é discutido o método de calibração atual, que é utilizado pelos fabricantes dos transdutores. É dado início ao desenvolvimento da metodologia proposta, com os ensaios no DAR, para identificar as possíveis limitações que devem ser consideradas no desenvolvimento do DERE. Para isso mostra-se algumas modificações estruturais que foram implementadas, para que o DAR pudesse ser utilizado. Nessa fase foram realizados testes preliminares para avaliar o efeito da pressão sobre o desempenho do transdutor.

No oitavo capítulo é mostrado o desenvolvimento do DERE, que foi baseado nas características do DAR e na eliminação das limitações identificadas. Apresenta-se, também, modelamento numérico e os detalhes da montagem experimental do DERE. São mostrados os ensaios que avaliam as influências das variáveis ambientais sobre o desempenho do transdutor, e por último, os resultados das calibrações estática e dinâmica são apresentados e discutidos.

O capítulo nove é dedicado às conclusões e recomendações para trabalhos futuros visando a continuidade desse trabalho.

1. OBJETIVOS

Objetivo Geral

Para realizar um processo de medição o transdutor passa por duas fases distintas. A primeira é a fase transiente, cuja duração depende das características intrínsecas do transdutor. A segunda é a fase contínua onde o transdutor se estabiliza na condição de medida. A caracterização completa de um transdutor deve descrever o seu comportamento nessas duas fases, relatando portanto seu desempenho dinâmico e estático.

O conhecimento das características estáticas e dinâmicas do transdutor é indispensável tanto para projetar corretamente o sistema de medição, quanto para avaliar adequadamente as variações temporais que ocorrem no processo físico que está sendo medido. Os transdutores de CO₂, por terem sido desenvolvidos recentemente, não têm ainda estabelecidos procedimentos e padrões metrológicos para caracterizar a fase transiente.

Diante da ausência de trabalhos científicos, procedimentos e padrões, esse trabalho tem como objetivo geral desenvolver um novo método e meio para a calibração dinâmica de transdutores de poluentes ambientais, especialmente os de dióxido de carbono.

Objetivos Específicos

- 1) A partir da formulação teórica da calibração e do transdutor, resolver analítica e numericamente um modelo matemático que represente o processo transiente ao qual o transdutor é submetido;
- 2) Em consonância com a solução teórica e a partir dos equipamentos consagrados da calibração dinâmica, desenvolver um sistema de calibração adequado à calibração de transdutores de dióxido de carbono;
- 3) Propor uma nova metodologia de calibração.

Hipóteses

Tendo como referência os objetivos propostos foram formuladas as seguintes hipóteses:

- 1) A solução teórica da equação da difusão mássica que descreve a variação de concentração pode representar o padrão teórico da resposta do transdutor;
- 2) Um sistema desenvolvido a partir dessa solução será adequado para realizar a calibração dinâmica e estática do transdutor de dióxido de carbono.

2. METODOLOGIA

2.1 METODOLOGIA DE TRABALHO

Tendo em vista a complexidade dos objetivos propostos, foi necessário adotar uma metodologia suficientemente abrangente, que contemplasse desde os tratados internacionais de redução de emissões até o desenvolvimento de modelos matemáticos descritivos do processo a que está sendo submetido o transdutor e a construção do equipamento de ensaios de emissões. Dessa forma, a metodologia adotada abrange as seguintes etapas:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre o mercado de créditos de carbono e sobre os atuais projetos de desenvolvimento limpo, uma vez que a medição da concentração do dióxido de carbono é usada para validar a geração dos créditos;
- Analisar os métodos clássicos usados para medição de poluentes atmosféricos, compreender seus princípios operacionais e características metrológicas;
- Avaliar os fenômenos físicos envolvidos no processo de emissões de CO₂ visando desenvolver o modelo de transporte de massa, que representasse tanto o caso mais geral (variação atmosférica da concentração de CO₂), quanto o caso mais específico (dispositivo de calibração);
- Construir o modelo físico do dispositivo de calibração;
- Modelar o funcionamento do transdutor utilizado no trabalho;
- Estudar as metodologias e a base teórica para as calibrações estáticas e dinâmicas de sistemas de medição;
- Avaliar as possibilidades e sistemas de medições clássicos de calibração dinâmica, visando definir parâmetros de projeto de um dispositivo específico para transdutores de CO₂. O instrumento estudado foi o Dispositivo de Abertura Rápida (DAR), devido à sua característica de calibração de transdutores de baixa frequência. Com isso avaliou-se algumas modificações estruturais para a realização dos ensaios com o transdutor de CO₂, caracterizou-se o funcionamento do DAR e montou-se uma rotina de ensaios;
- Avaliar a influência das variáveis ambientais sobre o processo e sobre a performance do transdutor;
- Realizar a calibração estática e dinâmica do transdutor.

3. AQUECIMENTO GLOBAL E MERCADO DE CARBONO

3.1 EFEITO ESTUFA

A energia solar atinge a superfície terrestre e é reemitida para a atmosfera, onde é absorvida por traços de gases que não deixam que o calor escape, esse processo é chamado de efeito estufa. Esse fenômeno é natural, na natureza existe independente da ação do homem e é responsável por manter a Terra aquecida. A figura 3.1 mostra o balanço de radiação na terra e os fluxos de energia que são absorvidos e refletidos, pela superfície e pela atmosfera terrestre. A energia responsável pelo efeito estufa é representada pelas ondas longas que são aprisionadas por traços de gases.

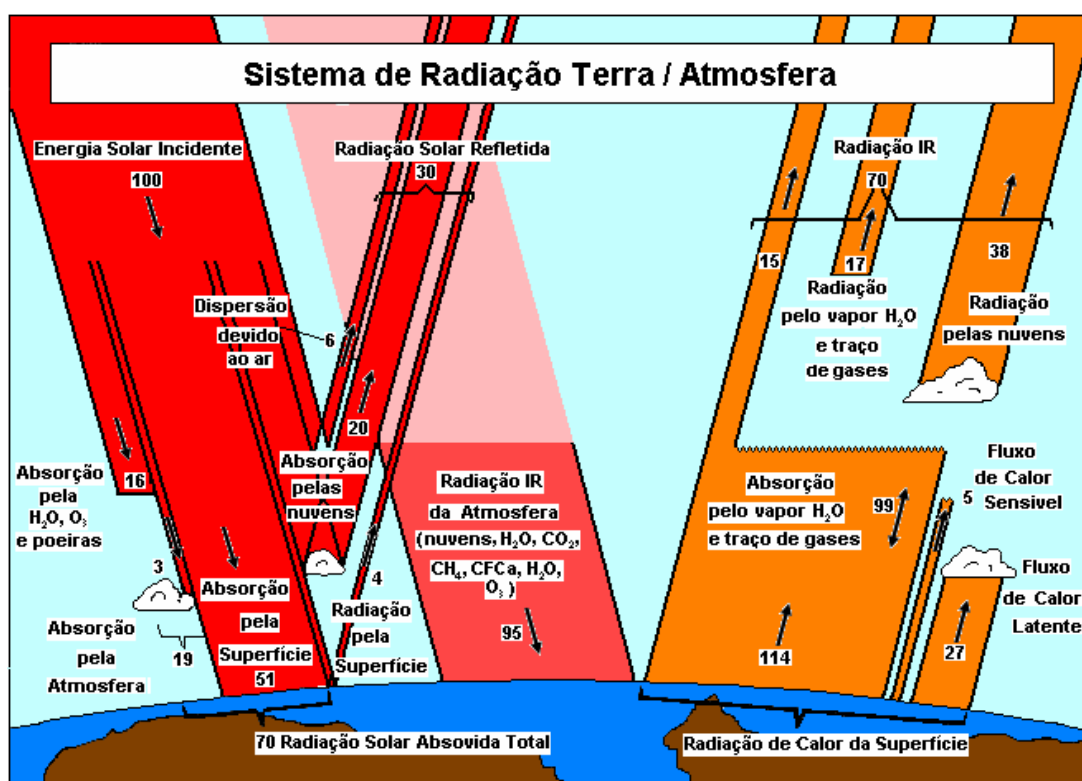


Figura 3.1 – Balanço de radiação da Terra, Os fluxos de radiação à esquerda são as ondas curtas e a direita são os fluxos de ondas longas (Krupa, 1997 com modificações).

Caso não houvesse o efeito estufa, a Terra seria cerca de 33 °C mais fria, pois atualmente a sua temperatura média é de 15 °C e o solo terrestre irradia energia na forma de radiação eletromagnética, na faixa do infravermelho, com distribuição espectral próxima a de um corpo negro a -18 °C, que seria a temperatura da atmosfera sem o efeito estufa (Tolentino e Rocha, 1998).

A atmosfera terrestre é composta basicamente por nitrogênio (78,084 %), oxigênio (20,946 %) e por traços de gases (Carvalho Jr., 2004). Entretanto, processos naturais e provocados pelo homem alteram a concentração de alguns traços de gases, como os agentes causadores de efeito estufa (GEE) mostrados na tab. 3.1. As concentrações dos GEE na atmosfera não são constantes, pois possuem tempo de vida e quantidades emitidas diferentes. O principal agente do efeito estufa é o dióxido de carbono (CO₂), pois a

sua permanência da atmosfera (tab. 3.1) é bem maior que a dos outros gases (Toletino e Rocha, 1998; Cardoso e al., 2001).

Tabela 3.1 – Principais Gases Causadores do Efeito Estufa (Krupa, 1997), como modificações.

Gás	Principal fonte antrópica	Principal Fonte Natural	Tempo de vida na atmosfera	Taxa de aumento anual (atual)	Contribuição relativa ao efeito estufa antrópico
Gás Carbônico (CO ₂)	Combustíveis fósseis, desflorestamento	Balanço na Natureza	50-200 anos	0,5%	60%
Metano (CH ₄)	Cultivo de arroz, pecuária, combustíveis fósseis, queima de biomassa	Terrenos Alagados	10 anos	0,9%	15%
Óxido Nitroso (N ₂ O)	Fertilizantes, conversão do uso da terra	Solos e Florestas Tropicais	150 anos	0,3%	5%
Clorofluorcarbonetos (CFCs)	Refrigeradores, aerossóis, processos industriais.	-----	60-100 anos	4%*	12%
Ozônio (O ₃)	Hidrocarbonetos (com NO _x), queima de biomassa.	Hidrocarbonetos	semanas a meses	0,5-2,0%	8%
Monóxido de Carbono (CO)	Combustíveis fósseis, queima de biomassa.	Oxidação de Hidrocarbonetos	Meses	0,7 - 1,05%	-
Vapor de H ₂ O	Conversão do uso da terra, irrigação.	Evapotranspiração	Dias	Desconhecido	Desconhecido

*atualmente o uso desses gases está proibido.

O aquecimento global (aumento da temperatura média do planeta) é a intensificação do efeito estufa causado pelo aumento da emissão dos GEEs resultantes da geração de energia, dos processos industriais, dos transportes e dos desmatamentos. A fig. 3.2 mostra a evolução da temperatura média do planeta nos séculos XIX e XX, onde observa-se que houve uma variação de 0,6 °C.

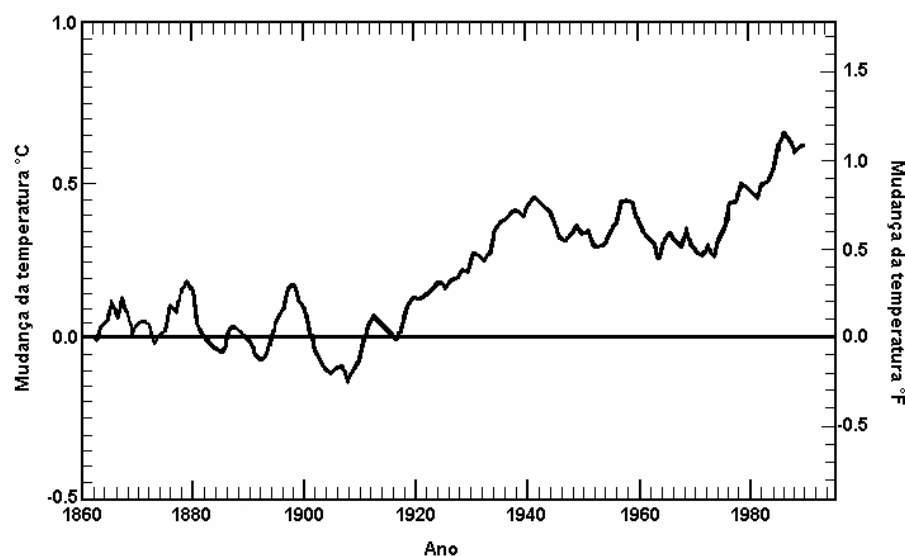


Figura 3.2 – Variação da temperatura (adaptado de BNDES e MCT, 1999).

Analisando a fig. 3.2 observa-se que a temperatura média da Terra começou a aumentar a partir da expansão da Revolução Industrial (1860), mas é a partir de 1910 que esse aumento tornou-se mais forte, devido ao aumento da industrialização, do uso de combustíveis fósseis, do avanço sobre as vegetações nativas e da demanda por mais energia. Com isso, a emissão dos gases de efeito estufa aumentou: Krupa (1997) mostra que a concentração de CO₂ na atmosfera terrestre aumentou de 180 ppm antes da revolução industrial para 350 ppm atuais. Percebendo a gravidade dos impactos sobre o planeta, cientistas e ambientalistas se mobilizaram para discutir sobre o aquecimento global, colocando o problema na agenda das Organizações das Nações Unidas (ONU).

3.2 CONVENÇÕES CLIMÁTICAS E O MUNDO

A primeira iniciativa das nações em discutir as alterações no meio ambiente ocorreu no ano de 1972 em Estocolmo, onde foi realizada a primeira conferência da ONU sobre o Meio Ambiente. Dezesseis anos mais tarde, num encontro realizado em Toronto, Canadá, as mudanças climáticas foram classificadas com um potencial inferior apenas a uma guerra nuclear. Em 1990, foi publicado um informe sobre a situação das emissões dos gases causadores do efeito estufa, chamado IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

Em 1992, mais de 160 países assinaram no Rio de Janeiro, a Convenção Quadro das Nações Unidas em Mudanças Climáticas (CQNUMC), onde se procurava formas de estabilização das emissões de GEEs. Na convenção foi estabelecido o princípio da responsabilidade comum e diferenciada (todos devem ser comprometidos com a proteção do clima, mas as nações industrializadas devem atuar primeiro). Outra medida importante da convenção foi a criação da Conferência das Partes (COP), órgão que tem o papel de promover e revisar a implementação das medidas de mitigação, divulgar trabalhos científicos e verificar as atividades dos programas de mudanças climáticas. Dez anos depois em Johannesburgo, foi realizada a convenção RIO + 10, que foi marcada pela ausência dos Estados Unidos e por incertezas sobre o futuro dos tratados já firmados.

3.2.1 IPCC

O IPCC é um grupo de trabalho responsável por dar base científica e técnica às decisões acordadas nas COPs. É formado por pessoas de diversos países e é dividido em três grupos e uma força tarefa, que trata dos gases causadores do efeito estufa. O primeiro grupo cuida dos aspectos científicos, o segundo avalia a vulnerabilidade dos ecossistemas e o terceiro cuida das análises das emissões dos gases causadores do efeito estufa, de mitigação climática e das consequências socioeconômicas das medidas.

O primeiro relatório feito pelo IPCC em 1990 afirmou que as mudanças climáticas representam uma ameaça e sugeriu a criação de um tratado internacional para solucionar os problemas. Em 1995 o segundo relatório diz que *“o balanço das evidências indica nítida influência do homem sobre o clima através das*

emissões de GEEs” (IPCC, 1995). No terceiro relatório, em 2001 é afirmado que as atividades humanas são as principais causadoras do forte aquecimento global observado nos últimos 50 anos.

Os dados reunidos no IPCC mostraram ao mundo a necessidade de criar formas de reduzir a emissão dos GEEs. Com base nos trabalhos e nas evidências apresentadas, buscou-se a criação de ações de mitigação e de um instrumento legal que obrigasse os países a diminuírem suas emissões.

3.2.2 O PROTOCOLO DE QUIOTO

O Protocolo de Quioto é um tratado internacional criado em 1997, durante a COP 3, com o objetivo de reverter a tendência de aumento das emissões GEEs, através de medidas que controlem as emissões antropogênicas visando a diminuição do aquecimento global e o desenvolvimento sustentável. O Protocolo foi assinado por 84 países e a sua meta principal é a redução da emissão dos GEEs, pelas nações industrializadas, em 5,2% em relação às emissões de 1990. O Protocolo entrou em vigor no dia 16 de fevereiro de 2005 com a ratificação de 125 países, correspondendo a 61,6% das emissões (Bezerra e al., 2004; MCT e MREx, 1998).

Entre as disposições do Protocolo destacam-se as questões sobre as metodologias utilizadas para medir as emissões, remoções e as flexibilizações: Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), a Implementação Conjunta (JI – Joint Implementation) e o Comércio de Emissões (ET – Emission Trade).

O MDL é o único mecanismo de flexibilização que permite a participação dos países em desenvolvimento. O objetivo do MDL é promover e fomentar o desenvolvimento sustentável nos países subdesenvolvidos através de incentivos financeiros. Por exemplo, se um país desenvolvido não conseguir cumprir sua meta de redução em seu território, poderá investir em projetos de desenvolvimento limpo em outros países, gerando créditos de carbono negociáveis (Reduções Certificadas de emissões – RCE) com validade pré-estabelecida.

Segundo o Protocolo, as modalidades de MDL devem ser elaboradas pela Conferência das Partes (COP). E durante a COP-9 adotou-se, basicamente, duas modalidades de MDL: a primeira refere-se a fontes renováveis e alternativas de energia, eficiência energética e substituição de combustíveis. A segunda visa as atividades de remoção e estocagem de CO₂ através de sumidouros e uso da terra, aqui inclui-se o florestamento e o reflorestamento (Bartholomeu e al., 2004).

Em 2000 a Câmara de Comércio Americana (Amcham) estimava dois cenários possíveis para a evolução do valor dos créditos de carbono. No cenário moderado o sequestro de uma tonelada passaria de US\$ 5,00 para US\$ 20,00 em 2005 e para US\$ 75,00 em 2020 e se caso houvesse uma intensificação negativa do clima, a subida seria de US\$ 5,00 para US\$ 50,00 em 2005 e para US\$ 305,00 em 2020. Mesmo com o atraso de sete anos na ratificação do protocolo de Quioto, iniciativas como o “Prototype Carbon Fund” do Banco Mundial e “Chicago Climate Exchange”, celebraram contratos de compra futura dos créditos de carbono (Cenamo, 2004).

3.2.3 O BRASIL E O PROTOCOLO DE QUIOTO

O Brasil ratificou o Protocolo de Quioto em 19 de Junho de 2002. No que diz respeito à participação do Brasil no ciclo global de carbono, existem vantagens e desvantagens. As vantagens estão na matriz energética que é considerada uma das mais limpas do mundo (39% hidroeletricidade e 18% biomassa) e por seu território possuir grande parte das florestas do mundo. A grande desvantagem está na emissão de carbono pelas queimadas, na agricultura tradicional e no desmatamento das florestas (Monzoni, 2000).

As emissões do Brasil representam 2,5% das mundiais, segundo Viola (2002) “25% advindo da indústria e da agricultura moderna e 75% da agricultura tradicional, da conversão de uso na fronteira agrícola e das atividades madeireiras ineficientes e predatórias”. Dependendo da forma de contabilização a representatividade do Brasil pode ser maior, pois caso o desmatamento seja considerado, as emissões brasileiras subiriam para 4,2%, ou seja, cerca de duas vezes maior que as emissões na queima de combustíveis fósseis e biomassa (Monzoni, 2000).

O Brasil se opôs à regulação das florestas nativas baseando-se na teoria de que isso afetaria a soberania nacional, posição que não foi defendida por outros países florestais (Estados Unidos, Austrália, Rússia, etc.) que, promoveram a regulamentação internacional das florestas. Com essa oposição, os negociadores brasileiros tentavam evitar o questionamento internacional do uso da Amazônia. O Brasil saiu vitorioso, pois durante as COPs determinou-se que as florestas nativas estariam fora do MDL.

Já existem na Câmara dos Deputados projetos de lei para regular o mercado de carbono brasileiro, dando transparência e segurança às transações e regulamentando a cobrança de impostos. O Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio em convênio com a Bolsa de Mercadorias & Futuros (BM&F) criou, em 06 de dezembro de 2004 o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões dando maior operacionalidade às transações (MAPA, 2005).

3.3 MDL, AS FLORESTAS E REPRESAS

As florestas entram na segunda modalidade dos MDLs, através das atividades de florestamento e reflorestamento. Os créditos de carbono são gerados através da absorção e estocagem de CO₂, pois há consenso de que florestas em crescimento absorvem mais CO₂ que liberam, estocando esse excesso em sua estrutura. Essas florestas já estão inseridas no MDL.

As florestas nativas foram retiradas do MDL sobre o argumento de que como já estão formadas o balanço de carbono seria igual a zero. Mas essa afirmação vai contra experimentos realizados que mostram que o saldo da absorção de CO₂ em florestas tropicais maduras é positivo. Santos (1999) mostra experimentos realizados na região central da Amazônia e em Rondônia, onde as variáveis ambientais foram medidas através de uma torre e um balão cativo instalados na floresta, e o fluxo de CO₂ foi calculado usando os métodos do Fluxo-Gradiente e da Correlação Turbulenta. Os resultados indicaram que a floresta funcionou como um sumidouro. Rocha e al. (2002) realizaram experimentos na região de

cerrado do estado de São Paulo, utilizando o método da Correlação Turbulenta para calcular a quantidade de carbono absorvida pela vegetação, os resultados mostraram uma variação de 0.1 a 0.3 toneladas de carbono por hectare por ano. O Experimento de Grande Escala da Bio-Atmosfera na Amazônia (LBA) é um grupo de pesquisa liderado pelo Brasil, que busca conhecer melhor os fenômenos climatológicos, ecológicos, biogeoquímicos e hidrológicos da Amazônia. Trabalhos divulgados pelo LBA como Phillips e al. (1998) e Nobre (2000) mostram resultados que indicam que a Amazônia absorve 0.8 a 7 toneladas de carbono por hectare por ano.

Outra discussão em evidência no Brasil é o ‘status’ de energia limpa da hidroeletricidade, quando comparada com fontes não renováveis (COPPE, 2002). Resultados experimentais, como os mostrados por Santos (2000) e Lima (2002) mostram que a emissão de gases pelos reservatórios é grande, a diferença nas extrapolações é significativa e as simulações apresentam resultados discordantes com as medições experimentais. A grande diferença entre os valores medidos pode ser atribuída a problemas metodológicos e a confiabilidade metrológica dos instrumentos utilizados.

O Protocolo de Quioto não estabelece metas específicas para as indústrias, que na sua maioria são grandes fontes emissoras de GEEs. A contribuição das indústrias na redução de emissão dos gases deve ser determinada por disposições regulamentares de cada país. As indústrias podem, também, criar projetos de MDL, utilizar energias alternativas e/ou a co-geração, visando à geração de créditos de carbono. Esses créditos também podem ser adquiridos em fundos que negociam esses papéis.

3.4 SITUAÇÃO ATUAL DO MERCADO DE CARBONO

O mercado de carbono é uma realidade e os créditos de carbono já são negociados nos mercados mundiais. Os fundos realizam negociações diárias de venda de créditos a entidades que buscam formas de se enquadrarem no Protocolo de Quioto.

As fig. 3.3 e 3.4 foram construídas utilizando, como base, os boletins mensais emitidos pela Chicago Climate Exchange (CCX). Os valores mostrados representam o último valor da tonelada de carbono equivalente no fechamento do mês. O período de geração indica quando o crédito de carbono vai ser gerado e poderá ser utilizado. O CCX emite, também, boletins diários com o valor e volume de toneladas de carbono negociado.

Observa-se que o valor da tonelada de carbono equivalente no período de 12/2003 a 09/2004 ficou praticamente estável (devido a incertezas sobre a ratificação do protocolo), e a partir de 10/2004 esse valor mostrou uma tendência de alta, motivada pela ratificação de Protocolo de Quioto pelo parlamento russo, permitindo, finalmente, que o protocolo entrasse em vigor.

Em 04/2005 o valor negociado retornou para próximo do patamar de antes da ratificação russa, mas novamente a partir de mês 05/2005 o valor voltou a ter uma forte alta, pois o Protocolo de Quito entrou em vigor no mês 02/2005, dando base mais sólida para as negociações no mercado de carbono. Essa

tendência de alta permaneceu até o mês 09/2005, muito provavelmente, sustentada pela onda de catástrofes naturais, principalmente nos EUA, que foram ligadas as alterações climáticas, provocadas pelo aumento da emissão de gases de estufa.

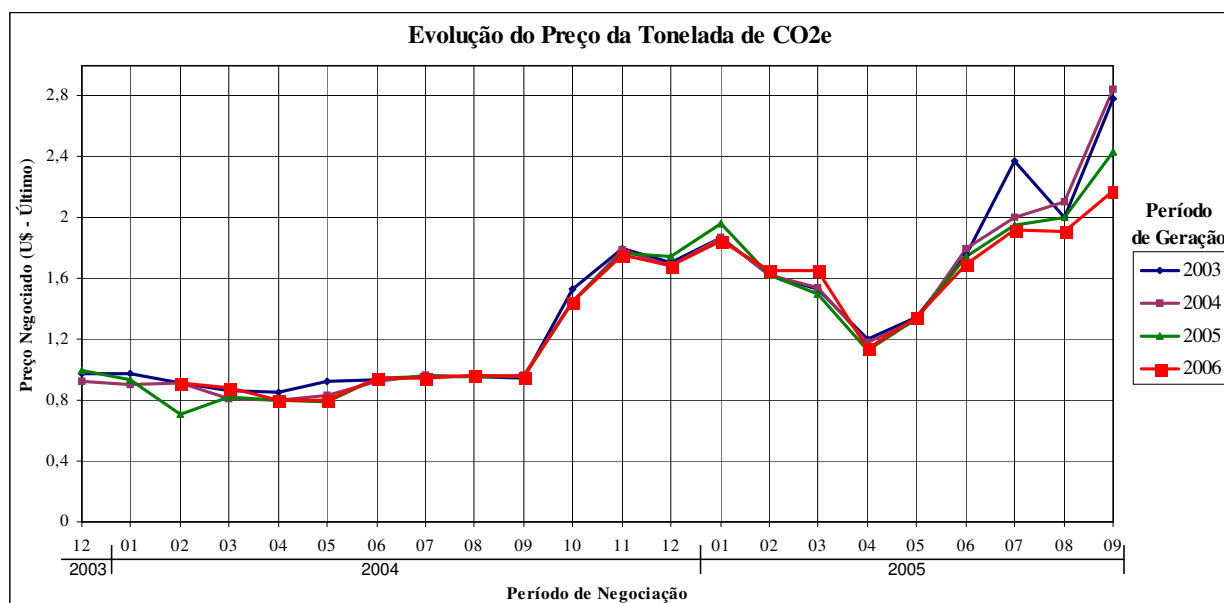


Figura 3.3 – Evolução do Mercado de Carbono. Valor da tonelada de carbono equivalente entre o período de 12/2003 e 09/2005.

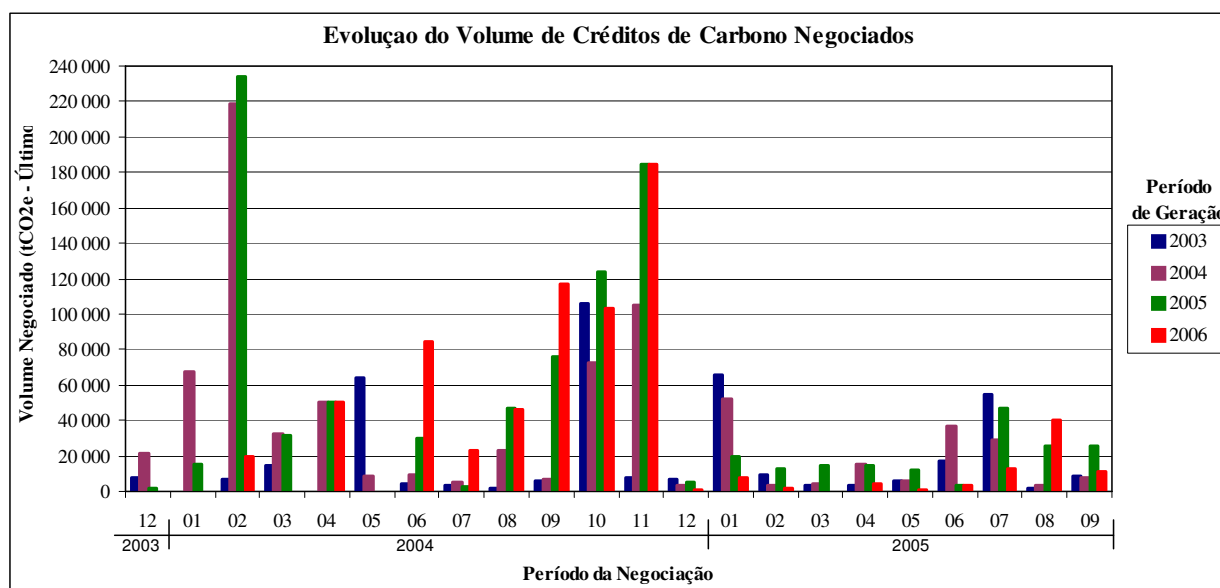


Figura 3.4 – Evolução do Mercado de Carbono. Volume de toneladas de carbono negociadas entre o período de 12/2003 e 09/2005.

Fazendo uso da sua eficiência energética o Brasil poderá obter lucros com a negociação dos créditos de carbono. Por exemplo, as usinas de cana-de-açúcar podem ser beneficiadas pela co-geração de energia através da queima do bagaço de cana. A Companhia Açucareira Vale do Rosário em São Paulo, teve o seu projeto de créditos de carbono certificado. Com isso, a usina adquiriu 669.637 créditos de carbono que serão gerados em 7 anos e poderão ser negociados no mercado de carbono (CNI, 2005; CDM, 2003).

Outra proposta de geração de créditos de carbono é a utilização de biogás, originado pela decomposição de materiais orgânicos em aterros sanitários. O cálculo do potencial de geração de energia dos aterros realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2004), mostra a viabilidade econômica do uso do biogás. No Rio de Janeiro, por exemplo, o aterro sanitário do Caju, desde 1996 vem produzindo biogás através de poços de captação que são interligados à rede de gás municipal, a vazão diária é de cerca de 30.000 m^3 e o gás possui um poder calorífico aproximado de 5000 kcal/Nm^3 (Henriques, 2004, Oliveira, 2004).

Alguns projetos de sequestros de carbono também já foram iniciados no Brasil. Esses projetos são financiados por empresas estrangeiras que se adiantaram e assumiram o risco em investir, mesmo antes da ratificação do Protocolo de Quioto. Com o protocolo entrando em vigor, essas empresas conseguiram créditos de carbono a preços baixos e poderão vender esses créditos ou usar em benefício próprio. A tabela 3.3 mostra os detalhes de alguns projetos realizados no Brasil.

Tabela 3.3 – Projetos de sequestro de carbono em execução no Brasil (Rocha, 2003; May e al., 2005).

Empresa	Projeto	Valor Investido	Redução Esperada
Banco Mundial	O Fundo Protótipo de Carbono do Banco Mundial associou-se à empresa Plantar, para produzir ferro-gusa com carvão vegetal vindo de florestas renováveis certificadas, plantadas em 23.100 hectares.	5,3 milhões de dólares nos primeiros 7 anos	12,8 milhões de ton em 28 anos
Peugeot	A empresa replantou 5.000 hectares de floresta, através da ONG Pro Natura. Segundo o representante da Peugeot, a empresa pretende mostrar a viabilidade do conceito de poço de carbono.	12 milhões de dólares	183.000 de ton CO ₂ por ano em 40 anos
AES Barry	Reflorestamento de 60.000 hectares de cerrado na Ilha do Bananal, para sequestrar 1 milhão de toneladas de carbono.	1 milhão de dólares no início do projeto	7 milhões de ton em 25 anos
Central and South West Corporation	Aquisição de 7.000 hectares da Reserva Serrado Itaqui para replantar espécies nativas.	5,4 milhões de dólares	1 milhão de ton em 40 anos

4. PROCESSO FÍSICO DAS EMISSÕES DE CO₂ E MODELAGEM DO PROCESSO

As consequências das alterações climáticas e a preocupação dos países em buscar soluções de mitigação do clima, de forma a diminuir a velocidade dessas alterações, evidenciam a importância em dar confiabilidade às medições dos poluentes atmosféricos, principalmente as emissões do dióxido de carbono. Para promover a confiabilidade dos dados é necessário compreender as características do CO₂, seu movimento e sua interação com o planeta, bem como os métodos de medição, as técnicas e os instrumentos disponíveis e como esses funcionam.

4.1 AS CARACTERÍSTICAS E O CICLO DO CARBONO

Caracterização

A atmosfera terrestre é composta por vários gases, entre eles o dióxido de carbono (CO₂) na proporção de 0.03% em volume da atmosfera. O CO₂ é a principal substância que as vegetações terrestres retiram do ar para realizar a fotossíntese e em conjunto com outros gases é responsável pelo efeito estufa. Grandes quantidades de carbono estão armazenadas em rochas sedimentares (carbonato de cálcio e magnésio), combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão), nas florestas e em algas marinhas. O CO₂ é incolor, pouco solúvel em água, é liquefeito por meio de pressão (*40 atm a 5 °C*), é mais pesado que o ar (massa específica igual a *1,53 kg/m³*) e possui boa estabilidade química e térmica. O CO₂ é um bom absorvedor do espectro da radiação infravermelha na banda de *12 – 18 μm*, especialmente na banda de *15 μm*. A temperatura de ebulição é de *-78.5 °C*, o calor específico é de *0.8500 kJ/kg.°C* e a condutibilidade térmica a *300 K* é igual a *0.0168 W/m. K*.

O dióxido de carbono é formado na natureza, principalmente, pela decomposição de materiais orgânicos, na respiração dos seres vivos, etc. e sob ação do homem através dos desmatamentos, queimadas, queima de combustíveis fósseis, na agricultura e em ações que aceleram os processos naturais, como a formação de lixões e alagamentos de grandes áreas florestais. Em áreas urbanas, 70% das emissões de CO₂ vêm dos automóveis. O dióxido de carbono não é só produzido, as plantas verdes o absorvem liberando oxigênio através da fotossíntese.

4.2 CONDIÇÕES DE TRANSPORTE DO CO₂ NA ATMOSFERA

O movimento e as medições da concentração do CO₂ na atmosfera são influenciados por certas condições ambientais impostas pelo clima e pelos fenômenos que ocorrem tanto na superfície como na atmosfera. O principal fenômeno físico que influencia o fluxo de dióxido de carbono e a concentração local do CO₂ é a camada limite planetária e os fenômenos físicos que ocorrem no seu interior.

4.2.1 CAMADA LIMITE

A troposfera terrestre é dividida em duas partes, a primeira é denominada Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Limite Atmosférica (CLA) e a segunda Atmosfera Livre (AL), onde os processos estão associados a sistemas de larga escala (Oliveira, 1999). Os movimentos dentro da CLP são turbulentos de origem mecânica e térmica. Mecanicamente os movimentos turbulentos são devidos aos grandes cisalhamentos que ocorrem para satisfazer a condição de não-deslizamento e termicamente devido ao aquecimento no seu interior (Stull, 1993). A tab. 4.1 mostra a divisão da CLP.

O conceito de camada limite foi formulado pelo alemão Ludwig Prandtl em 1904, por meio da hipótese de que na análise de um escoamento viscoso o fluxo pode ser dividido em duas regiões, uma perto das fronteiras sólidas e a outra distante dessa fronteira. Na região fina próxima à fronteira sólida, chamada de camada limite, a condição de não-deslizamento é válida ($v = 0$), as forças viscosas são importantes e na região fora da camada limite são desprezíveis.

Tabela 4.1 – Divisão da Camada Limite Planetária.

Camada	Característica	Espessura
Sub Camada Interfacial (SCI)	Os movimentos turbulentos verticais são nulos devido aos grandes gradientes de velocidade e ao cisalhamento devido à viscosidade molecular.	Alguns milímetros acima da superfície
Camada Limite Superficial (CLS)	Há predominância da condução molecular, os fluxos turbulentos são aproximadamente constantes em relação à altura e o tamanho vertical dos turbilhões depende da distância em que se encontram da superfície.	Varia de 20 a 60 metros.
Camada Limite Convectiva (CLC)	A viscosidade molecular deixa de persistir, presença de perfis verticais de algumas variáveis aproximadamente constantes com a altura e turbulência intensa.	De 1 a 2 km.
Camada de Transição (CT)	Há intensos gradientes verticais de temperatura e umidade específica. Localiza-se entre o fluxo perturbado da CLC e o escoamento homogêneo da atmosfera livre (AL).	A espessura é de 50 a 100 m nos oceanos e de até 200 m na superfície.

4.2.2 MODELAGEM ATMOSFÉRICA

Avaliar as propriedades do ambiente é uma tarefa complexa. A coleta dos dados na medição da concentração e do fluxo de CO₂ depende de variáveis como a temperatura e pressão, que alteram algumas propriedades físicas do gás, como o coeficiente de difusividade (Incropera, 1998) e influem no funcionamento dos instrumentos de medição do fluxo de CO₂ (Moncrieff e al. 1997).

As condições meteorológicas e termodinâmicas como velocidade do vento, interação entre a atmosfera e a superfície, metabolismos dos seres vivos, umidade, etc. devem ser avaliadas para que os efeitos dessas possam ser considerados na medição da concentração local (Moncrieff e al. 1997). Já que a medição da concentração e do fluxo de CO₂ é utilizada na avaliação do sequestro de carbono em projetos

de Desenvolvimento Limpo. Isso mostra a importância em dar confiabilidade ao valor que está sendo medido, a fim de evitar conclusões errôneas sobre um projeto.

Por exemplo, Schimel e al. (2000) em seus estudos sobre a estocagem de CO₂ pelas florestas dos EUA, mostram que o fluxo de CO₂ e, conseqüentemente, a quantidade de carbono absorvida variam de acordo como as condições climáticas. Por exemplo, ambientes mais secos e quentes aumentam a emissão de CO₂, devido a maior taxa de respiração. A estimativa do fluxo de carbono e de outros gases pode ser feita pela medição direta e/ou pela modelagem matemática dos processos atmosféricos.

Modelagem Atmosférica

A modelagem atmosférica tem como objetivo descrever matematicamente os processos dinâmico, físico, químico e radiativo da atmosfera. As abordagens sobre a dispersão de poluentes podem ser feitas por modelos experimentais e/ou teóricos. Os estudos experimentais, geralmente, utilizam modelos reduzidos de uma região, que são testados em túneis de vento. Na análise teórica usa-se modelos matemáticos na determinação do campo de concentração, baseados em distribuições estatísticas obtidas através de medições experimentais.

Modelos atmosféricos completos simulam diversos processos e interações entre eles. Jacobson (1999) descreve os processos e as interações de gases, aerossóis, radiação, transporte, dinâmica e de nuvens, envolvidos em um modelo de poluição atmosférica. A fig. 4.1 mostra um diagrama dessa simulação e Jacobson (1999) detalha cada processo. Dentro dos processos de transporte mostrados na fig. 4.1 o estudo da dispersão de poluentes é um importante parâmetro usado para modelar as características do movimento dos poluentes na atmosfera. Os resultados da simulação podem ser usados no planejamento de áreas urbanas, em programas de redução de emissões, na estimativa de traços de poluentes, de níveis de concentração, na determinação de áreas afetadas por uma determinada fonte emissora, etc. (Barros e al., 1998; Boçon, 1998; Maranhão, 2002 e Jacobson, 1999).

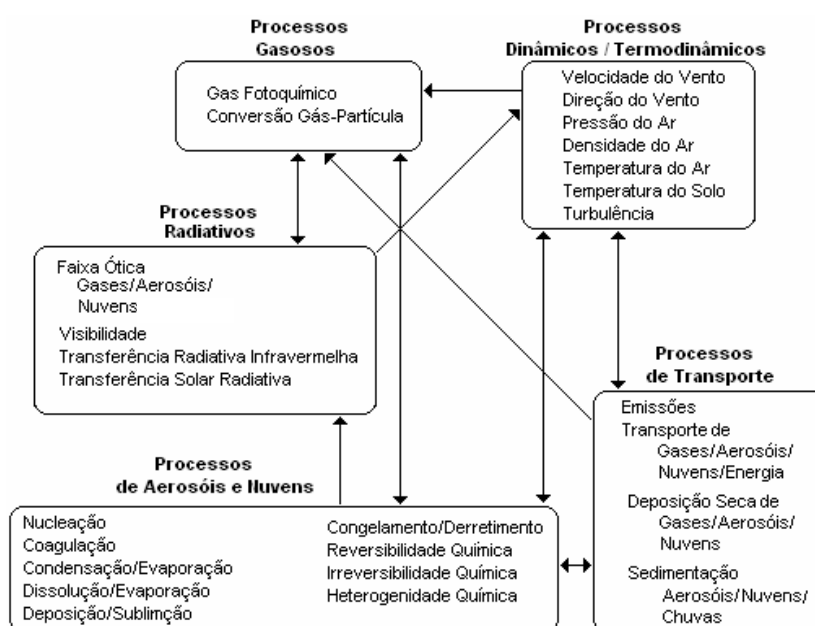


Figura 4.1 – Diagrama de um modelo de poluição atmosférica (Jacobson, 1999).

Os métodos matemáticos para estimar as plumas de poluentes são: modelos gaussianos de dispersão, modelos não-gaussianos e modelos numéricos. No modelo gaussiano considera-se que a pluma de poluente que sai de uma fonte emissora assume a forma de uma distribuição normal, com a concentração máxima seguindo a linha central da pluma, conforme mostra a fig. 4.2.

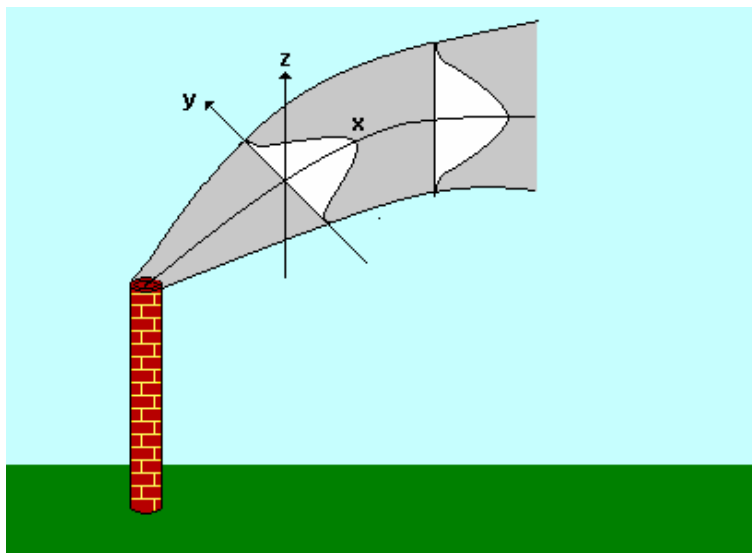


Figura 4.2 – Desenho esquemático para um modelo de dispersão com pluma Gaussiana.

Segundo Boçon (1998) e Maranhão (2003), no desenvolvimento desse método é necessário fazer algumas considerações, como: velocidade do vento unidirecional e constante, terreno plano à jusante da fonte e turbulência homogênea e estacionária. Com isso, a equação que define esse modelo é dada por:

$$\rho(x, y, z) = \frac{q}{2\pi v \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2 \cdot \sigma_y^2}\right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}\right) \right) \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde,

ρ – concentração mássica;

q – intensidade da fonte emissora;

σ_y e σ_z – coeficientes de difusão horizontal e vertical;

v – vetor velocidade;

h – altura efetiva da pluma, que é igual à soma da altura da fonte e altura de elevação da pluma.

A principal dificuldade de aplicação da Eq. 4.1 é a determinação dos coeficientes de difusão, pois esses dependem da estabilidade atmosférica e de uma grande quantidade de dados experimentais. O uso da Eq. 4.1 é restrita, já que as considerações feitas são praticamente ideais. Entretanto esse método tem sido bastante usado devido à utilização de medições experimentais dos coeficientes de difusão, que são feitas em condições atmosféricas reais. Outro fator que contribui para a utilização desse método é a

medição em campo das flutuações da direção e da velocidade do vento, pois nesses valores já estão inclusos os efeitos da turbulência, da rugosidade do terreno e da estabilidade atmosférica. Com isso o valor dos coeficientes de difusão podem ser corrigidos, o que leva a melhores resultados da simulação (Boçon, 1998; Maranhão, 2003).

Segundo Boçon (1998), têm sido feitos diversos trabalhos no sentido de aprimorar o modelo de pluma gaussiana. Esses trabalhos buscam incorporar ao modelo, parâmetros não considerados como: a difusão vertical, a rugosidade do terreno, mecanismos de conversão de gás, deposição seca, camada de inversão, difusividades turbulentas, etc. Outros trabalhos propõem soluções de um modelo tri-dimensional e a solução analítica da Eq. 4.1 com o termo transiente.

Em muitos casos o uso do modelo de pluma gaussiana é inadequado, devido à impossibilidade de modelar a velocidade em relação à altura e à falta de estabilidade atmosférica nas regiões próximas à fonte e em fontes próximas ao solo (Barros, 1998; Boçon, 1998). Com isso foram desenvolvidos modelos baseados na solução analítica da equação da concentração (Eq. 4.2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \underbrace{\bar{v} \cdot \bar{\nabla} \rho}_{\text{Termo Convectivo}} = \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\bar{K} \cdot \bar{\nabla} \rho)}_{\text{Termo Difusivo}} + \underbrace{\Sigma}_{\text{Geração}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Os modelos não permitem uma solução analítica da Eq. 4.2 na forma tri-dimensional, isto é, para resolver a equação é necessário fazer algumas simplificações, como a unidimensionalidade do processo. Os modelos não-gaussianos buscam determinar a variação da velocidade (unidimensional) e do coeficiente de difusão vertical em função da altura. Com isso é possível manter a simplicidade do modelo gaussiano, levando em consideração a não homogeneidade vertical da atmosfera. Porém, na determinação da variação da velocidade e do coeficiente de difusão em função da altura, devem ser considerados os efeitos da estabilidade atmosférica, da altura da camada de inversão, da velocidade de fricção e do parâmetro de Coriolis.

Os modelos não-gaussianos compartilham dos modelos gaussianos algumas limitações de uso: escoamento unidimensional, terrenos planos, difusividade turbulenta lateral constante e inexistência de reações químicas e mecanismos de remoção.

As limitações impostas pelos modelos gaussianos e não-gaussianos levam à utilização de métodos numéricos que resolvam a Eq. 4.2 bi ou tridimensionalmente, considerando as difusões turbulentas e as velocidades em função do espaço e tempo, além do cálculo do campo de velocidades, no termo convectivo da Eq. 4.2, através das equações de Navier-Stokes.

Para isso, pode-se usar a abordagem Euleriana, que é baseada no princípio de conservação da massa, ou a Lagrangeana, que acompanha o deslocamento de uma partícula e a variação de suas propriedades.

A vantagem da abordagem Euleriana está na utilização dos dados de dispositivos instalados em pontos fixos do escoamento, que medem velocidade, temperatura, concentração, etc. As equações podem

ser aplicadas diretamente, mesmo nos casos onde haja reações químicas. A limitação de aplicação dessa abordagem está em um impedimento matemático, pois em casos de escoamento turbulento acontece o problema de fechamento, que é um problema clássico no estudo de turbulência (YAMAMOTO, 2005). A Eq. 4.2 é a equação fundamental para os modelos Eulerianos.

Na abordagem Lagrangeana busca-se descrever o deslocamento de um grupo de partículas através de propriedades estatísticas, que são tratadas matematicamente de forma simples, mas a falta de expressões que descrevam as propriedades estatísticas limita o uso dessa abordagem. Outro fator contra, é a não aplicação direta das equações em casos onde haja reações químicas não lineares. A Eq. 4.3 é a equação fundamental para o método Lagrangeano.

$$c(\bar{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\bar{r}, t | \bar{r}_0, t_0) \cdot c(\bar{r}_0, t_0) d\bar{r}_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{t_0}^t B(\bar{r}, t | \bar{r}', t') \cdot S(\bar{r}', t') dt' d\bar{r}' \quad \text{Eq. 4.3}$$

onde,

\bar{r} – é o vetor posição;

B – é a função probabilidade de transição;

S – é o termo fonte.

Boçon (1998) descreve métodos numéricos para a dispersão de poluentes. O mais recente usa uma modificação no modo k-ε, para simular uma atmosfera neutra e estável. No Brasil pode se destacar o trabalho realizado por Barros e al. (1998) que utiliza uma metodologia Estocástica-Lagrangeana. Esse método utiliza uma abordagem euleriana para determinar o campo de velocidades. As flutuações são geradas por modelos estocásticos e o modelo Lagrangeano acompanha o comportamento de cada partícula. Os resultados mostram que para uma fonte próxima ao solo, o perfil de concentração para uma região próxima à fonte é gaussiana, já que os efeitos de paredes não são sentidos, e à medida que o perfil se afasta da fonte esse passa para uma forma parietal e torna-se assintótico, ou seja, o valor máximo de concentração encontra-se junto à parede.

4.2.3 DIFUSÃO MÁSSICA

A análise da difusão do CO₂ é essencial para avaliar as variáveis que podem interferir na medição da concentração de um gás e para direcionar o desenvolvimento de dispositivos de calibração. Incropera (1998) mostra o desenvolvimento detalhado da difusão mássica entre duas espécies quaisquer. Mas, pode ser dado um enfoque microscópico na difusão, que nesse caso é analisada em um modelo probabilístico onde a evolução de uma partícula no espaço e no tempo, é avaliada em termos de um experimento binomial, isto é, só existem dois resultados possíveis e a probabilidade de cada partícula permanece constante, em repetições independentes.

Aqui apresenta-se um resumo da teoria da difusão mássica, focado na utilização proposta nesse trabalho. A difusão mássica é um processo de transporte de origem na atividade molecular, ou seja, depende do movimento e do comportamento das moléculas e ocorre em gases, líquidos e sólidos. A quantidade de qualquer espécie A em uma mistura formada por duas ou mais espécies, pode ser definida por sua concentração mássica (ρ_A [kg/m^3]) ou molar (C_A [$kmol/m^3$]), que são relacionadas pela massa molecular M_A .

$$\rho_A = M_A \cdot C_A \quad \text{Eq. 4.4}$$

O estudo da difusão mássica de uma espécie A em uma mistura binária de A e de uma espécie B é análogo ao da transferência de calor, dessa forma a taxa de transferência em um processo de difusão de massa é análoga a Lei de Fourier, ou seja, o fluxo mássico será proporcional à densidade, a um coeficiente de difusão e ao gradiente de concentração, definindo a Lei de Fick Eq. 4.5

$$\bar{j}_A = -\rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla m_A \quad \text{Eq. 4.5}$$

A Eq. 4.5 define uma importante propriedade de transporte, o coeficiente de difusão binária ou difusividade mássica D_{AB} [m^2/s]. O fluxo mássico \bar{j}_A [$kg/s.m^2$], representa “a quantidade de A que é transferida por unidade de tempo e por unidade de área perpendicular a direção da transferência” Incropera (1998).

Embora os gradientes de temperatura, pressão e força externa possam resultar em uma difusão mássica, nas equações da lei de Fick eles não são considerados. Nesse caso o gradiente de concentração é o principal responsável pela difusão, esse processo é conhecido como difusão ordinária ou difusão pura. Outra condição restritiva à Lei de Fick é o sistema de coordenadas que se move junto com a velocidade média da mistura. Se o sistema for fixo, as equações não tem validade. Para um sistema de coordenadas fixo o fluxo mássico é dado por

$$\bar{n}_A'' = \bar{j}_A + \rho_A \cdot \bar{v} \quad \text{Eq. 4.6}$$

onde,

\bar{n}_A'' - é o fluxo absoluto da espécie A ;

\bar{j}_A'' - é o fluxo difusivo ou relativo da espécie;

\bar{v} - é a velocidade mássica média da mistura, que é igual a soma das velocidades médias das espécies A e B multiplicadas por suas massas.

A Equação 4.6 mostra os dois termos que contribuem para a difusão mássica. Um devido à difusão ordinária (Lei de Fick) e o outro devido ao deslocamento de A com o movimento mássico médio da mistura. Substituindo os termos, tem-se o fluxo absoluto da espécie A.

$$\bar{n}_A'' = -\rho \cdot D_{AB} \cdot \nabla m_A + m_A \cdot (\bar{n}_A'' + \bar{n}_B'') \quad \text{Eq. 4.7}$$

Admitindo um comportamento de gás ideal em uma mistura binária de A e B, a teoria cinética mostra que o coeficiente de difusão binária, é proporcional à pressão e à temperatura pela da Eq. 4.8.

$$D_{AB} \propto p^{-1} \cdot T^{3/2} \quad \text{Eq. 4.8}$$

Equação da Difusão Mássica

A lei da conservação diz que: “A taxa em que uma espécie entra em um volume de controle menos a taxa em que a massa dessa espécie deixa o volume de controle, mais taxa em que essa espécie é gerada é igual à taxa em que a massa da espécie é acumulada no interior do volume de controle”. Isto é, qualquer espécie pode entrar ou sair de um volume de controle por difusão ou pelo movimento do fluido. Mas a espécie também pode ser gerada, acumulada ou armazenada dentro do volume de controle (Eq. 4.9).

$$\dot{M}_{i,e} + \dot{M}_{i,g} - \dot{M}_{i,s} = \frac{dM_i}{dt} \equiv \dot{M}_{i,AC} \quad \text{Eq. 4.9}$$

onde, os índices *e*, *g*, *s* e *AC* representam respectivamente as taxas mássicas de uma espécie *i* que entram, que são geradas, que saem e que são acumuladas no interior do volume de controle.

Usando a Eq. 4.9 e considerando um meio homogêneo constituído de uma mistura binária de A e B no estado estacionário, isto é, a velocidade mássica média da mistura é igual a zero em qualquer ponto e a transferência de massa só ocorre por difusão. A equação resultante fornece a distribuição de concentração das espécies, que em conjunto com a lei de Fick determina a taxa de difusão das espécies em qualquer ponto do meio. Com a existência de gradientes de concentração nas direções *x*, *y* e *z* em um volume de controle diferencial no interior do meio e considerando coordenadas estacionárias, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \cdot D_{AB} \cdot \frac{\partial m_A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \cdot D_{AB} \cdot \frac{\partial m_A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \cdot D_{AB} \cdot \frac{\partial m_A}{\partial z} \right) + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad \text{Eq. 4.10}$$

A Eq. 4.10 representa a equação para uma difusão ordinária tri-dimensional. Nesse trabalho algumas considerações foram feitas para simplificar a Eq. 4.10: considera-se que ρ , C e D_{AB} são constantes e que não há reações químicas homogêneas no meio analisado. A reação química homogênea é um fenômeno volumétrico que envolve a geração de espécie e uma reação química heterogênea é um fenômeno de superfície resultante do contato entre o meio e a superfície e pode ser tratada como uma condição de contorno (Incropera, 1998). Observa-se que a Eq. 4.10 é equivalente à da dispersão atmosférica (Eq. 4.2).

4.3 MODELO PROPOSTO PARA A DIFUSÃO DE CO₂

Nesse trabalho foram usados dispositivos clássicos para realizar a calibração dinâmica dos transdutores de CO₂, por isso é necessário modelar o processo de difusão com as condições de trabalho. O dispositivo usado consiste em duas câmaras de tamanhos diferentes, separadas por um sistema de comunicação. Na câmara maior há uma mistura controlada de ar-CO₂ e na menor, ar. Considerando que quando as câmaras são colocadas em comunicação, o movimento do CO₂ ocorre somente por difusão ordinária, que a densidade e o coeficiente de difusividade são constantes e que o transporte acontece somente em uma direção, a equação da difusão mássica (Eq. 4.10) se reduz a:

$$\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad \text{Eq. 4.11}$$

A Eq. 4.11 é resolvida usando a transformada de Laplace, considerando as seguintes condições de contorno:

$$\rho_{CO_2}(0,t) = \rho_0, \quad \rho_{CO_2}(x,0) = 0 \quad e \quad |\rho_{CO_2}(x,t)| < \infty$$

Com isso, a solução para a Eq. 4.11 é dada por (Street, 1973):

$$\rho_{CO_2}(x,t) = \rho_0 \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot (D_{AB} \cdot t)^{1/2}} \right) \quad \text{Eq. 4.12}$$

A fig. 4.3 mostra a curva construída a partir da Eq. 4.12 num ponto distante 10 mm da entrada da câmara menor e para uma concentração inicial de 1,0% de dióxido de carbono em ar na câmara maior.

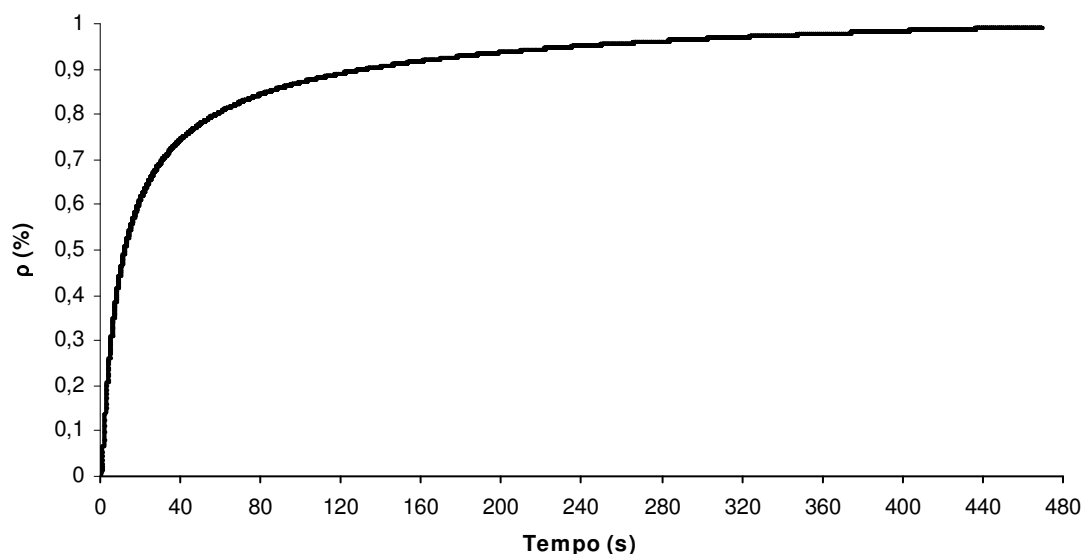


Figura 4.3 – Modelagem do processo de difusão ordinária no dispositivo de calibração.

Analisando a Eq. 4.11 verifica-se que o fenômeno de difusão pura é um fenômeno de primeira ordem, e isso é confirmado pela fig. 4.3. Na atmosfera terrestre, principalmente dentro da camada limite superficial (CLS), é difícil encontrar um ambiente onde ocorra, somente, a difusão ordinária. Santos (1999) mostra que em noites calmas e de pouco vento, considera-se que o movimento mássico só ocorra por difusão pura, mas em geral verifica-se que o transporte de CO₂ é submetido a dois processos de transporte, um difusivo e outro convectivo. Dessa forma, voltando à Eq. 4.9, considera-se que a velocidade mássica média é diferente de zero, com isso tem-se que:

$$-\frac{\partial n_A''}{\partial x} - \frac{\partial n_A''}{\partial y} - \frac{\partial n_A''}{\partial z} + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad \text{Eq. 4.13}$$

onde n_A'' é o fluxo representado pela Eq. 4.6.

Utilizando a Eq. 4.6 e a lei de Fick na Eq. 4.13, e considerando que a velocidade mássica média da mistura (v) e o coeficiente de difusividade são constantes e que o movimento só ocorre em uma direção, chega-se a equação diferencial parcial que representa a difusão mássica com um termo convectivo.

$$D_{AB} \cdot \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} - v \frac{\partial \rho_A}{\partial x} = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad \text{Eq. 4.14}$$

Supondo que a velocidade v é suficientemente grande para garantir que a ordem de grandeza do termo difusivo seja desprezível quando comparada ao termo convectivo, tem-se um movimento mássico de convecção pura:

$$-v \frac{\partial \rho_A}{\partial x} = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad \text{Eq. 4.15}$$

Resolvendo a Eq. 4.15 por meio da transformada de Laplace e usando as mesmas condições iniciais da difusão ordinária (Street, 1973), chega-se a:

$$\rho_{CO_2} = \rho_0 \cdot H\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad \text{Eq. 4.16}$$

Segundo Spiegel (2004), a função $H(t - a)$ representa a função degrau de Heaviside com um deslocamento a . Na Eq. 4.16 a função $H(t - x/v)$ representa esse mesmo degrau só que com um deslocamento x/v . Essas funções são representadas na fig. 4.4.

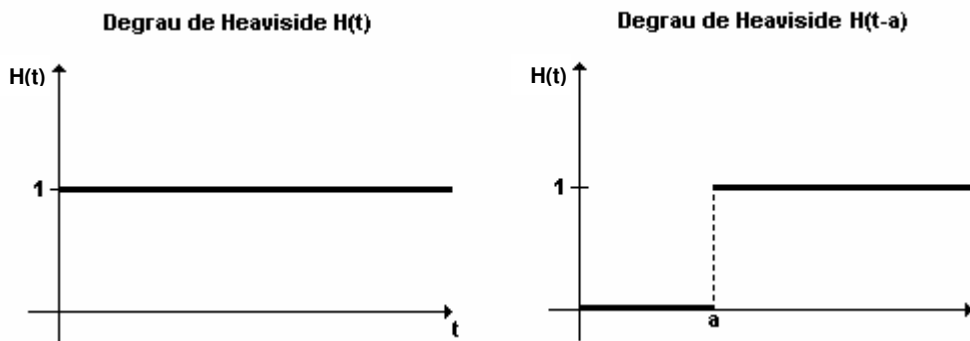


Figura 4.4 – Representação gráfica de um Degrau de Heaviside Spiegel (2004).

Dessa forma a Eq. 4.16 representa um degrau de Heaviside com deslocamento igual à x/v , onde x representa a posição do transdutor dentro da câmara menor e v a velocidade da mistura. Fisicamente a Eq. 4.16 significa que, para $t < x/v$ a concentração é zero e para $t \geq x/v$ a concentração é igual a ρ_0 .

4.4 O FLUXO DE CO₂

A medição do fluxo de CO₂ é usada para determinar o quanto uma floresta, nativa ou não, absorve de CO₂. Para isso as montagens experimentais utilizam torres e balões instalados nas florestas, que avaliam as variáveis ambientais que são usadas no cálculo. As medições do fluxo de dióxido de carbono acontecem, geralmente, dentro da CLS (Camada Limite Superficial), onde pequenos turbilhões fazem o transporte do CO₂. Esses vórtices têm movimento constante e são os principais responsáveis pelo transporte das propriedades atmosféricas (Santos, 1999). Existem alguns métodos que podem ser usados para o cálculo do fluxo: método das correlações (Moncrieff e al., 1997), aerodinâmico (Silva, 2001) e fluxo-gradiente (Santos, 1999).

O método da correlação turbulenta (Eddy Correlation) ou método das correlações, tem sido o principal método utilizado na medição do fluxo de CO₂, pois permite leituras diretas, já que não necessita dos valores de algumas propriedades atmosféricas como a velocidade horizontal, rugosidade superficial, etc., que são necessários em outros métodos, como o método aerodinâmico. O método das correlações calcula o fluxo de um escalar através de uma correlação entre as flutuações da velocidade do vento e da concentração do escalar (Moncrieff e al., 1997; Silva, 2001).

4.4.1 MÉTODO DE EDDY CORRELATION – MÉTODO DE CORRELAÇÃO TURBULENTA

O método das correlações turbulentas (eddy correlation) é uma técnica micrometeorológica que foi desenvolvida na década de 1950, mas somente na década de 1990, com o desenvolvimento de sistemas de medição de maior desempenho é que passou a ser mais largamente utilizada, mais especificamente entre os anos de 1992 e 1995 com os trabalhos realizados pelo Winand Staring Centre/Wageningen (Moncrieff e al. 1997; Rocha e al, 2002). O método utiliza basicamente um anemômetro tridimensional, um

analisador de gases, bombas e instrumentos para gravação dos dados. Os instrumentos que medem a velocidade do vento, a concentração de CO₂ e vapor d'água, são montados em torres na floresta. Esse método busca basicamente determinar o fluxo vertical de uma grandeza escalar “c” que pode ser descrito pela Eq. 4.17.

$$F_c = \overline{w \cdot \rho_c} \quad \text{Eq. 4.17}$$

onde,

–: a barra que indica a média em um intervalo de tempo;

w: é a velocidade vertical do vento;

ρ_c : é a concentração do escalar c.

Os desvios médios são usados, pois os registros de velocidade do vento, temperatura e concentração assumem uma forma turbulenta ou irregular, devido às características da camada limite planetária, especificamente a camada limite superficial (Santos, 1999). Por isso é conveniente avaliar o valor dessas variáveis através da decomposição de Reynolds, ou seja, o valor da variável será a soma da média e uma flutuação. Com isso a concentração e a velocidade do vento podem ser descritas pela Eq. 4.18 e a Eq. 4.17 pode ser expandida (Eq. 4.19) (Moncrieff e al., 1997).

$$w = \bar{w} + w' \quad \text{Eq. 4.18a}$$

$$\rho_c = \bar{\rho}_c + \rho'_c \quad \text{Eq. 4.18b}$$

$$F_c = \overline{\bar{w} \cdot \bar{\rho}_c} + \overline{\bar{w} \cdot \rho'_c} + \overline{w' \cdot \bar{\rho}_c} + \overline{w' \cdot \rho'_c} \quad \text{Eq. 4.19}$$

Por definição, a média das flutuações é igual a zero, com isso os termos que têm apenas uma flutuação são nulos. O termo que possui duas flutuações raramente é nulo. O termo que contém a média da velocidade pode ser desprezado, pois em terrenos uniformes e com a rotação de eixos, esse termo é nulo. Com isso o fluxo de um escalar de n amostras é expresso pela Eq. 4.20 (Moncrieff e al., 1997; Silva, 2001).

$$F_c = \overline{w' \cdot \rho'_c} + \text{termos de correção} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n w'_k \cdot \rho'_{c_k} + \text{termos de correção} \quad \text{Eq. 4.20}$$

Segundo Moncrieff e al. (1997) o método das correlações é o que menos carrega soluções empíricas, mas há duas correções que precisam ser feitas. A primeira é a concentração do gás que pode requerer correções devido às mudanças na densidade do ar impostas pela pressão parcial e pelo calor latente. A segunda são as correções do próprio sistema de medida, pois nenhum sistema tem um tempo de resposta infinitesimalmente pequeno, instrumentos mesmo que próximos não compartilham da mesma amostra de

ar, e filtros influenciam na magnitude do sinal. A Eq. 4.21 propõe que o erro do fluxo pode ser calculado usando as funções de transferência para cada correção requerida pelo método das correlações (Moncrieff e al., 1997; Rocha, 2002).

$$\frac{\Delta F_c}{F_c} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} T_{wpc}(n) \cdot C_{wpc}(n) \cdot dn}{\int_0^{\infty} C_{wpc}(n) \cdot dn} \quad \text{Eq. 4.21}$$

onde,

T_{wpc} é a convolução de todas as funções de transferências aplicadas à medida;

C_{wpc} é o co-spectro das variáveis na frequência n .

5. MEDIÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A medição dos poluentes atmosféricos é feita para avaliar a evolução da concentração dos gases na atmosfera, quantificar as emissões antropogênicas e verificar os efeitos das ações de mitigação. Para isso é preciso o uso de um bom equipamento, uma metodologia confiável, conhecimento de como as informações são agrupadas, a resolução geográfica (resolução espacial) e a orientação das medidas.

5.1 INVENTÁRIOS

Na realização de um inventário, algumas características atmosféricas devem ser analisadas para que os dados coletados possam ser totalmente compreendidos. Fontelle (2005) destaca, por exemplo, os modelos de transporte, de transformações físico-químicas na atmosfera e a disponibilidade de uma série cronológica de dados. Outro ponto destacado é a resolução geográfica, que de acordo com a aplicação pode ser um país inteiro ou superfícies reduzidas de até menos de 1 km².

Segundo Fontelle (2005) os inventários podem ser divididos em três tipos: orientados à fonte, ao produto e a economia. O primeiro é baseado nos fenômenos que ocorrem na fonte emissora. Normalmente esse tipo de inventário descreve a quantidade de poluentes emitida por um setor da economia ou por um fenômeno natural. Já o inventário orientado ao produto quantifica os poluentes associados a um objeto ou a um serviço em o todo o seu ciclo de vida (fabricação, uso e destinação). O inventário orientado à economia baseia-se no exame de parâmetros ambientais dentro de modelos macroeconômicos. Geralmente são as quantidades emitidas por um tipo de negócio ou um indicador de produção, para isso consideram-se as tecnologias existentes dentro de um setor. Um ponto em comum entre os tipos de inventários é que deve se ter confiabilidade sobre os valores medidos.

5.2 METODOLOGIAS PARA MEDIÇÃO DE EMISSÕES

Para a determinação das emissões de poluentes na atmosfera quatro métodos podem ser utilizados: a medição direta, o balanço, a correlação e o fator de emissão, cada um possui vantagens, desvantagens e limitações de uso (Fontelle, 2005).

Medição Direta

Este método mede a concentração dos poluentes diretamente na fonte. As medições podem ser contínuas ou feitas em intervalos de tempo (regulares ou não). Esse método fornece uma grande quantidade de dados sobre uma fonte específica, o que proporciona uma melhor qualidade das informações e um maior conhecimento sobre os processos que originaram a emissão. A desvantagem está no alto custo de investimento, o que restringe essa metodologia aos grandes emissores. Em aplicações onde a medição não é contínua, informações são obtidas pela média periódica.

Balanço

Utilizando o princípio de conservação de massa, determina-se as emissões por um balanço de massa. Esse método é usado em sistemas simples e a quantificação da emissão, é baseada no conhecimento dos processos físicos e/ou químicos que ocorrem dentro do sistema. Mas, devido a dificuldades técnicas, como na medição das vazões mássicas, a incerteza relativa é elevada, principalmente, quando a emissão é pequena em comparação à retenção.

Correlação

É o estabelecimento de uma relação entre a quantidade de poluente emitida e os parâmetros característicos do processo. Para obter resultados estatisticamente confiáveis, há a necessidade da realização de medições preliminares longas e onerosas. Outros pontos negativos são a flutuação das condições operacionais, que aumentam o custo, e a impossibilidade de modelar as emissões do processo. A vantagem desse método é que os parâmetros característicos são os mesmos considerados na montagem do processo.

Fator de Emissão

Utiliza uma função característica da emissão e das variáveis descritivas da fonte. Esse método é muito parecido como o método da correlação, mas o estabelecimento da função não é questionado, apenas utilizam-se dados disponíveis. A função pode ser reduzida a um coeficiente, facilitando o cálculo das emissões. O erro induzido pode ser elevado, pois muitas vezes a função utilizada não representa, especificamente, a fonte em análise, mas mesmo assim esse método fornece uma boa aproximação.

Essas diversas técnicas de medição são usadas para levantar dados experimentais que são usados na modelagem atmosférica. Os métodos de medição direta e de balanço fornecem informações importantes sobre as características de uma fonte específica. Os métodos da correlação e do fator de emissão são mais usados para quantificar o fluxo de poluentes em uma determinada região.

5.3 TÉCNICAS DE MONITORAMENTO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Monitoramento Ambiental Lento

Os sistemas para monitoramento ambiental lento são aqueles que têm uma amostragem temporal de 1 dia ou maior (Bennett, 1999). A tabela 5.1 mostra exemplos de instrumentos utilizados na monitoramento lento.

Tabela 5.1 – Técnicas para monitoramento ambiental lento.
 Fonte: Bennett (1999).

Transdutor	Característica
Tubo de Difusão	Consiste em um tubo de acrílico lacrado com uma tampa e um substrato ativo no fundo. Quantifica variações espaciais de poluentes, dependendo da composição do substrato. O tempo de amostragem é por volta de 7 dias.
Frascos de Drechsel	Consiste em uma garrafa de Pyrex® que contém uma solução que reage como o gás. Com isso é feita a contagem de íons por titulação ou por cromatografia. O tempo de amostragem é de 24 h.
Filtros	Estes instrumentos são utilizados para a medição de partículas grandes em suspensão na atmosfera.

Monitoramento Ambiental Rápido

Os instrumentos de resposta rápida são aqueles em que o tempo de amostragem é da ordem de minutos. Esses instrumentos quando comparados aos de resposta lenta, não necessitam de visitas periódicas aos lugares de medição, pois podem ter sistema de autocalibração, podem ser controlados remotamente e possuem sistemas de registro de dados. O tempo de resposta é tipicamente o tempo de subida a 95% do valor final, mas em alguns instrumentos pode haver atraso na resposta do sistema de medição (Bennett, 1999). A tabela 5.2 mostra algumas técnicas de medição e suas características para cada tipo específico de poluente ambiental.

Tabela 5.2 – Técnicas para monitoramento ambiental rápido.
 Fonte: Bennett (1999)

TP – Tempo de Resposta; Dmin – Detecção Mínima; Dmax – Detecção Máxima

Poluente	Técnica/Característica
SO ₂ (H ₂ S)	Raio ultravioleta UV - as moléculas irradiadas reemitem a luz na banda 220 a 240 nm e o valor da intensidade da luz é proporcional à concentração. TP – 1 a 4 min; Dmin – 0.5 a 1 ppm; Dmax – 1 a 100 ppm.
NO _x (NH ₃)	Luminescência química – o ozônio gerado dentro do instrumento é misturado com o ar de amostra. O NO da amostra reage e forma NO ₂ muito rapidamente com a emissão de radiação IR (pico de 1200 nm), que é proporcional à concentração de NO, o NO _x total pode ser medido passando-se primeiramente o ar de amostra por um conversor catalítico que reduz qualquer NO ₂ presente em NO. TP – 1 a 4 min; Dmin – 0.5 a 1 ppm; Dmax – 10 a 100 ppm.
O ₃	Absorção de raios UV modulados - o O ₃ tem um espectro de absorção no UV, com pico ao redor de 254 nm. Instrumentos alternam o gás na câmara de absorção entre o ar de amostra e um gás de referência sem ozônio e pela lei de Beer-Lambert, o log da relação entre os gases é proporcional à concentração de O ₃ . TP – 20s a 2 min; Dmin – 0.5 a 2 ppm; Dmax – 1 a 200 ppm.

CO e CO ₂	O método padrão usa a absorção modulada de raios infravermelhos (NDIR) – Esta técnica está detalhada no anexo I. TP – 15 s para 2 min; Dmin – 0.05 a 0.1 ppm para CO e <2 ppm para CO ₂ ; Dmax – 102 a 104 ppm.
Hydro-carbonetos	Detecção da Ionização da Chama (FID) - uma chama de hidrogênio queima o ar de amostra entre dois eletrodos, para medir a condutividade de chama e isso tende a ser proporcional à concentração dos íons de ·CH na chama. A maioria dos instrumentos permite que o CH ₄ possa ser medido separadamente passando o ar de amostra, primeiro, por um catalisador de oxidação. TP – podem chegar a menos que 1s; Dmin – para 20 ppm um tempo de resposta de vários minutos é exigido; Foto Ionização (PID) – um detector responde a gases inorgânicos de baixo potencial de ionização. TP – 0.2 s; Dmin – 10 ppm.

Segundo Bennett (1999) há outras alternativas que podem ser utilizadas. Por exemplo, para os NO_x e o O₃, usa-se a Luminescência Química Úmida, nesse caso o ar de amostra é coletado por um feltro úmido que contém uma solução que reage com o gás e a luz emitida na reação é monitorada. O tempo de resposta é $TP \leq 0.5 s$ e a sensibilidade é $Dmin \leq 0.1 ppm$.

Monitoramento Remoto

Os métodos de monitoramento rápido e lento descrevem as características pontuais, ou seja, os locais de medição são restritos quando comparados com a área total do planeta. Segundo Bennett (1999), para obter uma amostra espacial mais larga, usa-se técnicas óticas que permitem medidas mais gerais da poluição na atmosfera. A tab. 5.3 mostra algumas técnicas e características.

Tabela 5.3 – Técnicas para Monitoramento Remoto.
Fonte: Bennett (1999).

Técnica	Características
Longa Distância (Long-Path)	Com uma fonte de frequências e um retrorefletor, faz-se uma análise espectroscópica da luz refletida pela superfície e calcula-se a média regional de poluentes. Dois sistemas são usados: Hawk (Siemens Sistemas Ambientais) – que usa a fonte e um filtro de interferência oscilante; OPSIS – aplica-se a técnica DOAS a um espectro de absorção que varia entre o UV e o próximo ao IR.
Overhead Burden	Medições espectrais da luz solar dispersa na atmosfera, proporcionam uma estimativa do total “burden” de um poluente e em conjunto com pesquisas sobre o movimento de emissões fornecem boas informações.
LIDAR	Detecção e Ajuste do Alcance da Luz (LIDAR em inglês) - um pulso de luz laser é dirigido à atmosfera e a luz dispersa é coletada por um telescópio e direcionada a um tubo de múltiplas fotos que faz as análises. Com isso através de equações, que utilizam características da luz coletada, a concentração do poluente é calculada.

5.4 TRANSDUTORES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Segundo o INMETRO-VIM (1995) transdutores são instrumentos que: “*fornecem uma grandeza de saída que tem correlação determinada com a grandeza de entrada*”, e podem ser divididos em dois

elementos: o elemento sensível (sensor) e o elemento de conversão. Os transdutores podem ser divididos em duas classes dependendo de como interagem com a grandeza física:

- Passivos – são aqueles que não adicionam energia como parte do processo de medição, mas remove a energia em sua operação, como por exemplo, o termopar;
- Ativos – são aqueles que adicionam a energia ao ambiente da medida como a parte do processo, por exemplo, um sistema de radar ou de sonar.

Segundo Bennett (1999) quando pretende-se determinar variações espaciais de um poluente, muitas vezes emprega-se instrumentos passivos, devido ao baixo custo dos equipamentos e a necessidade de abranger uma grande área. Já para a caracterização de uma fonte específica, um transdutor com um tempo de resposta da ordem de minutos ou de uma hora, no máximo, é requerido. Outras aplicações podem requerer tempos de resposta da ordem de segundos ou menos, por exemplo o monitoramento de gases tóxicos ou de odores. Os principais métodos de medição de emissões são: a eletroquímica e a espectroscopia.

5.4.1 MEDIÇÃO ELETROQUÍMICA

A medição eletroquímica está relacionada à medida de grandezas elétricas, como potencial, corrente, carga, etc. As principais técnicas são baseadas na determinação quantitativa de reagentes que são produtos de uma reação ou que são necessários para completar uma reação. Segundo Schöning e al. (1999) existem quatro métodos tradicionais de medição eletroquímica: a potenciométrica (medição de potencial), a voltametria (medição da corrente), coulometria (carga para completar uma reação) e condutometria (medição da condutividade elétrica).

Geralmente os transdutores utilizados na medição de CO₂ usam o método potenciométrico, que utiliza a diferença de potencial entre um eletrodo de referência e um eletrodo de trabalho (fig. 4.1), ou seja, mede-se o potencial necessário para manter o equilíbrio eletroquímico (Merkle e al., 2006; Shöning, 1999).

Os transdutores potenciométricos são compostos por:

- Um eletrodo de trabalho: o potencial depende da concentração do gás analisado;
- Um eletrodo da referência: fornece um potencial predefinido padrão;
- Um eletrólito sólido: formando uma célula galvânica.

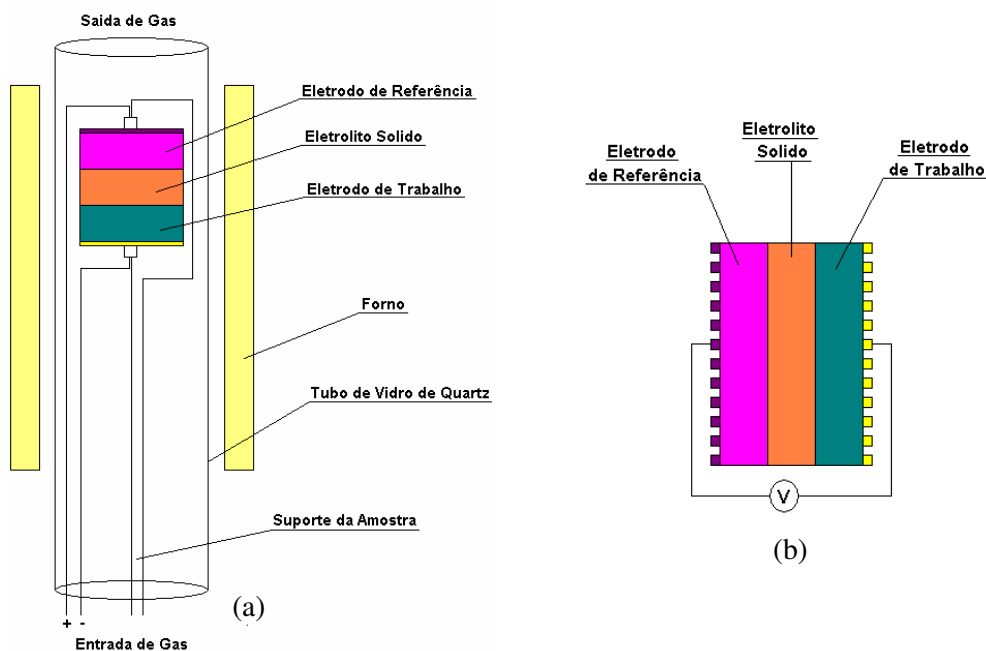


Figura 5.1 – (a) Esquema de um transdutor potenciométrico. (b) Célula química (adaptado de Merkle e al.,2006).

As vantagens de utilização de transdutores potenciométricos são: tecnologia simples, são compactos e de baixo custo (Holzinger e al., 1996). Geralmente o tempo de resposta é da ordem de segundos. Merkle e al. (2006) desenvolveram, construíram e testaram o transdutor mostrado na fig. 5.1, que possui tempo de resposta próximo de $1s$. Holzinger e al. (1996) mostram que um transdutor com eletrodo de referência aberto, que usa o Na_2CO_3 como eletrodo de medição, tem o tempo de resposta variando de $3 a 5 s$.

Steudel e al. (1997) mostram o desenvolvimento de um transdutor eletroquímico miniaturizado, com espessura de até $600 \mu m$ e diâmetro de $1 mm$ ou menor. Esse tamanho permite que o transdutor possa ser integrado a componentes eletrônicos.

A grande vantagem dos transdutores eletroquímicos é o tempo de resposta mais rápida, quando comparado com outros métodos de medição. Mas segundo Holzinger e al. (1996) não há nenhum transdutor potenciométrico confiável comercialmente disponível, devido à falta de estabilidade (quando é utilizado em campanhas longas de medição) e as dificuldades tecnológicas impostas pela necessidade de encapsulamento. Outro fato desfavorável são as reações químicas, que consomem os eletrodos. Com isso as células precisam ser trocadas periodicamente (Schöning e al, 1999).

5.4.2 ESPECTROSCOPIA MOLECULAR

Espectroscopia molecular pode ser definida “*como o estudo da interação entre ondas eletromagnéticas e matéria*” Banwell (1972). Na medição de poluentes atmosféricos a vantagem de usar a espectroscopia, está no fato de que a interação entre a luz e as moléculas é específica, isto é, a luz pode ser absorvida ou emitida, em comprimentos de onda específicos. Segundo Bennett (1999) essa especificidade é baseada na teoria do quantum, onde “*a luz é absorvida ou emitida como fótons,..., enquanto os átomos ou moléculas só existem em níveis distintos de energia ou momento angular*”.

Segundo Banwell (1972) e Bennett (1999) da mesma forma que os elétrons podem existir em níveis distintos de energia (energia quantizada), qualquer molécula pode existir em diferentes níveis de energia, que são gerados por vários processos: rotacional, vibracional, eletrônico, ressonância nuclear, etc. As mudanças entre os níveis só ocorrem com uma quantidade finita de energia (quantização). O espectro pode ser dividido em várias regiões. Na espectroscopia molecular, diferentes níveis são formados por energia:

- Rotacional – Uma molécula gira com um momento angular e as mudanças entre esses estados de momentos angulares ocorrem na região das microondas ($1\text{ cm} - 100\ \mu\text{m}$). Separações entre os níveis de rotação são da ordem de 200 J/mol;
- Vibracional – Os átomos em uma molécula vibram, um relativamente ao outro. A energia de transição entre os modos de vibração ocorre na região do infravermelho ($100\ \mu\text{m} - 1\ \mu\text{m}$). Separações entre os modos são da ordem de 10^4 J/mol;
- Eletrônico – Os elétrons podem ocupar órbitas diferentes dentro de um átomo. As mudanças ocorrem na região do ultravioleta ($1\ \mu\text{m} - 104\ \text{nm}$). Separações entre mudanças são da ordem de 100 KJ/mol

A identificação espectroscópica de diferentes moléculas gasosas é baseada na existência de uma parte específica do espectro, onde não haja interferência de outros gases (Bennett, 1999; Dynament-N4, 2003). Na prática, a identificação da parte do espectro, correspondente a uma única molécula, é complicada, por isso a caracterização espectroscópica é feita individualmente para cada elemento da molécula. A associação de uma molécula específica a um comprimento de onda particular pode ser feita por absorção ou emissão (Bennett, 1999).

Técnicas de Absorção

No monitoramento ambiental de longa distância, ou seja, medições onde os transdutores ficam distantes dos instrumentos de controle e registro, a técnica de absorção é muito usada já que requer uma divisão mínima no sistema observado. Com isso medições de longa distância podem ser feitas, sem que haja problemas de interferência e de alimentação elétrica, permitindo a medição da concentração *in loco* (Bennett, 1999).

A técnica de absorção consiste de uma luz monocromática com fluxo I que passa por um gás com concentração c . A interação entre fótons e moléculas é um evento independente, logo a taxa de interação será, independentemente, proporcional à quantidade de fótons e moléculas. Com base nisso e utilizando a lei de Beer-Lambert a concentração do gás é determinada pela Eq. 5.1 (Bennett, 1999)

$$c = \frac{\log\left(\frac{I(0, \lambda)}{I(x, \lambda)}\right)}{\sigma(\lambda)} \quad \text{Eq. 5.1}$$

onde: $\sigma(\lambda)$ – é a absorção no corte transversal.

Na medição de um gás, a utilização de uma única frequência ou comprimento de onda é complicada, devido à interferência de outras espécies e da compensação instrumental, por isso a medição é feita em uma faixa de frequências. As técnicas de medição por absorção são, geralmente, divididas em quatro técnicas (Bennett, 1999):

- Espectroscopia de Absorção Ótica Diferencial (DOAS em inglês) – Utiliza uma fonte com uma banda larga de frequências e um espectroscópio de alto-resolução ajustado com as características de absorção do gás. A concentração é a diferença entre a absorção em tempo real e *offline*;
- Transformada Infravermelha de Fourier (FTIR em inglês) – O sinal de saída de uma célula de gás entra em um interferômetro e é transformado em uma função defasada, o espectro de absorção. Através de algoritmos determina-se a concentração do gás correspondente ao espectro;
- Raio Infravermelho Não-Dispersivo (NDIR em inglês) – Filtros óticos limitam o espectro em uma faixa de comprimentos de onda, onde a interferência de outros gases é a menor possível. A absorção total do gás é proporcional à intensidade luz medida com um fotodetector. De acordo com a tab. 4.3 essa é a técnica padrão para a medição de CO₂, e é o princípio de funcionamento utilizado pelo transdutor selecionado para esse trabalho;
- Absorção Espectroscópica por Laser de Diodo Ajustado (TLDas em inglês) – Uma fonte de frequências curtas é oscilada perto da linha de absorção do gás. O primeiro harmônico do sinal é então proporcional à concentração, integrada ao longo da parte clara.

Técnicas de Emissão

Como dito anteriormente a luz pode ser absorvida ou emitida, a absorção consiste em procurar uma frequência que excite a molécula do gás e a emissão consiste em analisar a luz emitida pelas moléculas e como essa retorna a base (Bennett, 1999). São várias as técnicas padrões de medição, algumas delas são:

- Chama Fotométrica – Nestas técnicas as moléculas são separadas e ionizadas através da queima do gás. Dessa forma é possível analisar cada elemento da molécula. Essa técnica não é muito específica, mas em compensação é muito rápida, pois o limite é o tempo que os íons demoram a passar pela chama. Por exemplo, a Detecção da Ionização da Chama (FID), mostrada na tab. 4.3;
- Luminescência Química (Chemiluminescence) – Consiste na medição da luz que é emitida na reação química entre o gás de amostra e um outro gás de reação que é adicionado ao processo;
- Fluorescência Ultravioleta – Consiste em medir a fluorescência do gás de amostra quando esse é excitado por um raio ultravioleta. Por exemplo, a Detecção Fotoionizante (PID) é uma técnica rápida que mede a corrente de ionização irradiação UV, mostrada na tab. 4.3.

5.4.3 ESPECTROSCOPIA DO DIÓXIDO DE CARBONO

Como visto na seção 5.4.2 existem formas de excitação que provocam mudanças nos níveis de energia das moléculas. Banwell (1972) mostra os métodos que atuam nas diversas regiões do espectro e como esses influenciam na espectroscopia molecular. A forma mais utilizada para medir o CO₂ é a espectroscopia infravermelha, já que o dióxido de carbono é um excelente absorvedor de luz nessa faixa do espectro, ou seja, as variações nos níveis de energia molecular ocorrem por vibração, mas Banwell (1972) mostra que, em alguns casos, as variações também podem ocorrer eletronicamente.

Na caracterização espectroscópica infravermelha do dióxido de carbono deve se analisar a sua estrutura molecular, para determinar o número fundamental de vibrações, a possibilidade de harmônicos, a combinação de bandas e a influência da rotação sobre o espectro.

Modos de Vibração

O dióxido de carbono é uma molécula tri-atômica, simétrica e linear, com nenhum momento de dipolo permanente. Banwell (1972) mostra que para uma molécula linear, os modos normais de vibração podem ser determinados pela Eq. 5.2.

$$N^{\circ} \text{ fundamental de vibrações} = 3 \cdot N - 5 \quad \text{Eq. 5.2}$$

onde, N é a quantidade de átomos.

No caso do CO₂ há quatro modos fundamentais de vibração: Estiramento simétrico, estiramento assimétrico e dobra.

Estiramento Simétrico

Os átomos vibram ao longo da linha de laço (fig. 5.2) de maneira simétrica. Esse movimento não produz mudança no momento de dipolo da molécula, ou seja, o efeito do momento causado por um dos átomos de oxigênio em um dos lados é anulado pelo momento do outro lado. Dessa forma esse modo de vibração não produz efeito no infravermelho (Banwell, 1972; Dynament-N4, 2003, Tolentino e Rocha, 1998).

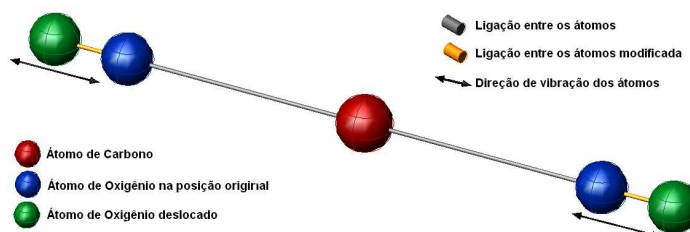


Figura 5.2 – Estiramento simétrico, ~ 1330 cm⁻¹.

Esse modo não causa efeito no Infravermelho (IR), mas essa frequência pode ser determinada através de outros métodos. Banwell (1972) mostra que a molécula de CO₂ é Raman ativa nesse modo de vibração e inativa para os outros, ou seja, a frequência de vibração é encontrada pela espectroscopia Raman, que analisa o espalhamento da molécula nos vários modos de vibração.

Modalidade de Dobra

Neste modo de vibração os átomos vibram perpendicularmente à uma linha que passa pelo centro da molécula (fig. 5.3). Esse modo de vibração, na verdade, corresponde a dois modos, conforme mostra fig. 4.5, esse processo é chamado degeneração. Em todos os aspectos esses dois movimentos são idênticos, exceto na direção, com isso não podem ser considerados separadamente. É por causa dessa degeneração, que as moléculas lineares têm um modo de vibração a mais que as não-lineares (Banwell, 1972; Dynament-N4, 2003).

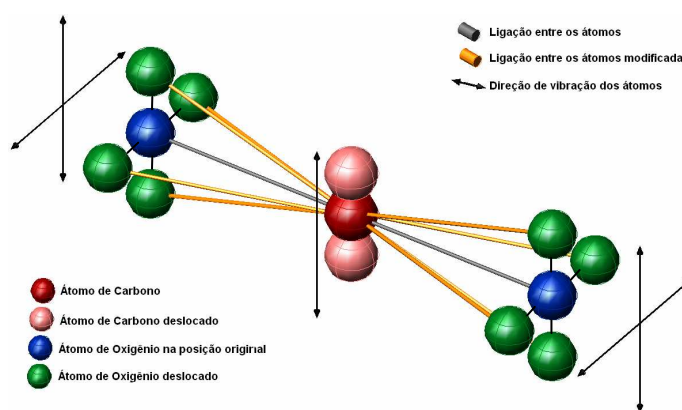


Figura 5.3 – Modalidade de Dobra, $\sim 2349 \text{ cm}^{-1}$.

Estiramento Assimétrico

Diferentemente do modo simétrico neste modo de vibração os movimentos dos átomos nos dois lados da molécula são assimétricos, ou seja, há uma variação no momento de dipolo da molécula. Segundo Dynament-N4 (2003) essa é a faixa de absorção usada nos transdutores de CO_2 .

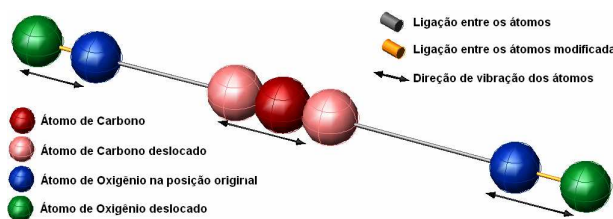


Figura 5.4 – Estiramento Assimétrico, $\sim 667 \text{ cm}^{-1}$.

O comprimento de onda do estiramento assimétrico é menor que o comprimento de onda do modo de dobra, isso ocorre porque é mais fácil distorcer uma molécula dobrando-na do que a esticando, dessa forma a força e a energia exigida para a modalidade de dobra são muito mais baixas (Dynament-N4, 2003).

Harmônicos e Combinação de Bandas

As moléculas quando excitadas apresentam um comportamento de vibração complexo, formado por uma superposição dos modos fundamentais de vibração. Para avaliar essa superposição pode-se analisar a molécula com um estroboscópio, frequência a frequência, o que na verdade é a essência da

espectroscopia infravermelha. Os efeitos da combinação de bandas e harmônicos muitas vezes podem ser intensificados por uma ressonância, principalmente quando dois modos, de uma mesma molécula, têm frequências muito próximas, formando uma degeneração acidental. E essa, geralmente, encontra-se entre um modo fundamental e um harmônico ou uma combinação. Segundo Dynament-N4 (2003) os comprimentos de onda formados pelos harmônicos e pela combinação, têm intensidade bem mais baixa que os modos fundamentais e não influenciam significativamente espectroscopia do CO₂. Banwell (1972) mostra com mais detalhes a influência desses fenômenos.

Influência da Rotação no Espectro

Banwell (1972) mostra, detalhadamente, a influência de rotação no espectro para moléculas diatômicas e poliatômicas nas diversas regiões do espectro. Basicamente as mudanças de rotação dependem do tipo de vibração das moléculas, que podem ser divididas em paralelas ou perpendiculares em relação ao eixo principal de simetria rotacional. A figura 5.5 mostra o espectro do dióxido de carbono, onde observa-se a presença de duas seções P e R, que representam, respectivamente, as lados de baixa e alta frequência em relação ao ponto inicial da banda. Isso pode ser observado na região de assimetria do espectro infravermelho do CO₂.

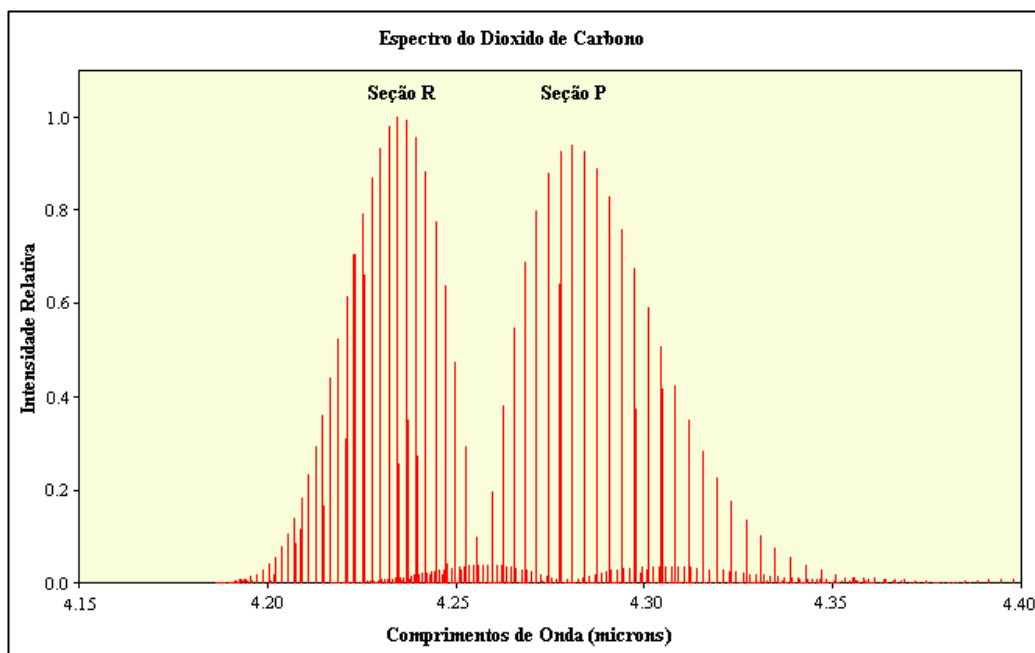


Figura 5.5 – Espectro do Dióxido de Carbono.

5.4.4 TRANSDUTOR UTILIZADO NO TRABALHO

No trabalho foi usado um transdutor infravermelho de CO₂, que utiliza o método NDIR para medir a concentração. Como visto na tab. 5.2 esse método é considerado padrão na medição de CO₂ e está detalhada no Anexo I.

Características e Funcionamento

O transdutor é composto basicamente de três componentes: emissor de luz infravermelha pulsada, um fotodetector e um filtro óptico de silicone (fig. 5.6).



Figura 5.6 – Esquema de um transdutor de CO₂, com os três principais componentes.

A figura 5.7 mostra um transdutor tipo NDIR com os componentes expostos.

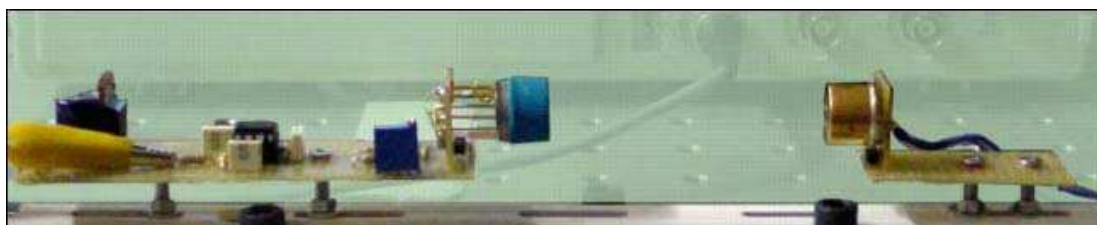


Figura 5.7 – Transdutor infravermelho de CO₂ (CHECS, 2006).

A vibração fundamental da molécula do dióxido de carbono é de $4257nm$. Com isso o filtro é projetado de forma a permitir, seletivamente, a propagação de um único ou uma banda de comprimentos de onda. O filtro (fig. 5.8) é constituído de camadas porosas de silicone de índices refrativos diferentes, que representam o elemento sensível. A fig. 5.8 mostra um corte transversal do filtro de silicone.

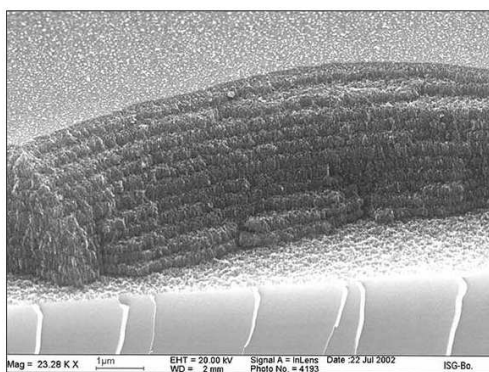


Figura 5.8 – Micro foto da seção transversal do filtro de silicone (CHECS, 2006).

Após passar pelo filtro, o raio infravermelho alcança o fotodetector e a sua intensidade gera uma tensão que é proporcional à concentração. Em medições ambientais a necessidade de ter disponível longas séries cronológicas de medidas (Fontelle, 2005) e confiabilidade dos valores medidos, faz com que o transdutor infravermelho seja o mais utilizado no monitoramento do CO₂.

O transdutor de dióxido de carbono usado foi o IRceL™CO₂, acompanhado de um kit Evaluation (fig. 5.9) ambos fabricados pela Ahlborn, a amplitude da faixa nominal é de 0 - 5 % em volume de CO₂.

A tab. 5.4 mostra algumas características fornecidas pelo fabricante, no Anexo II apresenta-se a ficha técnica completa do transdutor. O transdutor é composto de uma fonte IR de tungstênio, uma cavidade ótica, um detector piroelétrico duplo compensado pela temperatura e um termistor que monitora a temperatura interna.

Tabela 5.4 – Carbon Dioxide IRcel™ - Especificações.
Fonte: Dynamet (2005)

Características	
Escala Nominal	0-5% vol. CO ₂
Resolução	0.05% vol. CO ₂
t ₉₀ Tempo de Resposta	< 30 segundos
Repetitividade Zero	± 0.01% CO ₂
Repetitividade Amplitude	± 0.01% CO ₂



Figura 5.9 – Transdutor de CO₂ e kit eletrônico.

Fonte Infravermelha (IR)

A fonte IR é uma lâmpada de parede fina com um filamento de tungstênio, que opera com uma luz pulsada de 4 Hz. A estrutura e o material da parede permitem que, comprimentos de onda longos sejam absorvidos, promovendo o aumento da emissão de ondas com amplitudes entre 1-5 *mícrons*. O tempo de vida da lâmpada é em torno de 100.000 horas (Dynamet-N1, 2003).

Cavidade Ótica

O coeficiente de sensibilidade do transdutor depende da concentração, da eficiência da absorbância do gás sobre o filtro e da distância entre a fonte e o receptor. Essa distância é definida pelo arranjo ótico e pela cavidade ótica, e é importante, pois é um dos parâmetros que definem o tempo de resposta do transdutor. A cavidade ótica (fig. 5.10) é onde estão localizados todos os componentes internos (detectores, fonte, filtro e termistor) e sua alta refletividade à radiação infravermelha, melhora a relação sinal/ruído e o nível do sinal nos detectores (Dynamet-N4, 2003).



Figura 5.10 – (a) Corpo do transdutor; (b) Detalhe interno do transdutor.

Termistor

O termistor é responsável em monitorar a temperatura dentro da cavidade de ótica, de forma fornecer informações para a compensação da temperatura, o transdutor é do tipo NTC. A necessidade de haver um monitoramento da temperatura é que essa afeta o ponto de operação do microcontrolador, a sensibilidade do detector e as características dos filtros óticos. Mudanças rápidas na temperatura podem provocar respostas transientes, ruído e histerese. A taxa de variação máxima recomendada é de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dynament (AN1-2003) mostra como a temperatura atua no transdutor.

Detector Duplo

O fotodetector duplo tem dois detectores piroelétricos individuais, cada um com seu elemento ótico (fig. 5.11), o que fornece dois sinais em resposta à radiação pulsada da fonte IR. O primeiro é chamado de sinal ativo, que diminui na presença do gás e o segundo é o sinal de referência que monitora a intensidade da fonte.

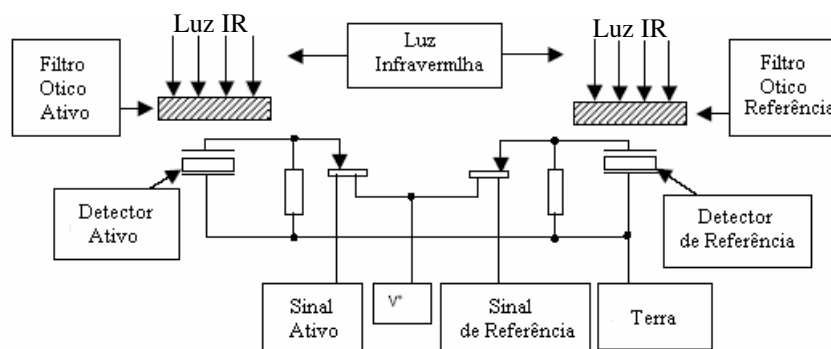


Figura 5.11 – Esquema do detector. (Dynament-N4, 2003)

O filtro ótico associado ao detector ativo transmite radiação na faixa de frequências que são absorvidas pelo dióxido de carbono e o filtro associado ao detector de referência transmite radiação na faixa de comprimentos de onda que não são afetados pelo CO_2 . Dessa forma, o detector ativo é usado para monitorar a radiação infravermelha absorvida pelo CO_2 , e o detector de referência é responsável pela detecção de qualquer outra radiação. Esses detectores respondem a mudanças na radiação incidente, por isso, é necessário que a fonte de IR seja pulsada, promovendo estados claros e escuros (Dynament, AN001; Jones e al., 1977).

Os sinais são de corrente contínua oscilante e são amplificados para obter uma medida pico-a-pico das oscilações dos sinais de referência e ativo, pois a relação entre os picos dos sinais é independente das variações da intensidade de fonte e diminui na presença de CO_2 . É essa diminuição na relação que é usada para determinar a concentração c do gás (Dynament, 2005) que é expressa pela Eq. 5.3, que é equivalente à Eq. AI. 11 do Anexo I.

$$c = \left(- \frac{\ln \left(1 - \left(1 - \frac{\text{Relação}}{\text{Zero}} / \text{Span} \right) \right)}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad \text{Eq. 5.3}$$

onde,

Relação – relação entre os sinais ativo e de referência;

Zero – relação entre os sinais ativo e de referência na ausência do gás;

Span – é a amplitude;

a e b – são constantes.

As constantes “*a*” e “*b*”, “*Span*”, “*Zero*” são determinadas na calibração do transdutor. A temperatura dentro do transdutor é medida para corrigir a lei dos gases perfeitos e os efeitos do filtro ótico sobre o zero e sobre a amplitude. A temperatura na cavidade ótica do transdutor é cerca de 10 °C mais alta que a do ambiente, devido ao calor gerado pela fonte IR, um benefício desse aumento de temperatura é redução da probabilidade de condensação de água na cavidade (Dynamant-N4, 2003), evitando efeitos indesejados que a umidade poderia ter sobre a performance do transdutor.

Corpo do Transdutor

No corpo do transdutor estão localizados todos os componentes. Os pinos de conexão ficam na parte traseira e é por onde as conexões elétricas, a fonte IR, os detectores e termistor são conectados. Internamente o corpo do transdutor é conectado a um pino de 0 volt formando uma gaiola de Faraday, que minimiza o ruído externo induzido. Pela parte frontal o gás por difusão acessa a cavidade ótica. O pequeno tamanho do corpo do transdutor pode ser comparado aos transdutores eletroquímicos.

6. PRINCÍPIOS DA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA E DINÂMICA

No desenvolvimento de processos de calibração, além de analisar os fenômenos físicos e as variáveis que podem interferir no processo, é necessário compreender as características e as formulações que descrevem o comportamento do transdutor ou do sistema de medição e avaliar as grandezas de influência.

6.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

Um sistema de medição consiste de instrumentos e processos, que transformam uma variável física (mensurando) em um sinal que possa ser observado (a medição). A variável física não precisa, necessariamente, ser o mensurando, em muitos casos basta ser relacionada ao mensurando. Por exemplo, na medição de velocidade através de tubos de Pitot, o mensurando é a velocidade e a variável física é a de pressão. A fig. 6.1 mostra o esquema básico de um sistema de medição. (Bentley, 1988 e Hansman, 1999). Segundo o Vocabulário Internacional de Metrologia (INMETRO-VIM, 1995) o sinal de entrada de um sistema de medição pode ser chamado de estímulo e o sinal de saída de resposta.



Figura 6.1 – Esquema genérico de um sistema de medição.

Pode-se usar a fig. 6.1 para descrever o funcionamento de um transdutor, onde o sistema de medição representaria o sensor e o mostrador simples algum observador. Nesse caso o elemento principal é o sensor, já que ele seria o responsável em fazer a conversão da variável física em uma resposta mensurável. Em muitos casos a resposta do sensor apresenta uma amplitude reduzida, sendo necessário um tratamento do sinal (Hansman, 1999). Segundo Bentley (1988) em um sistema genérico de medição, tal tratamento pode ser dividido em: elemento sensível, condicionamento do sinal (amplificador, etc.), processamento do sinal (conversores A/D, microcontroladores, etc.) e visualização (monitores, etc.).

O funcionamento de um sistema de medição pode sofrer efeitos de outras grandezas físicas que não são alvo da medição. Esses efeitos são chamados de grandezas de influência e, segundo Bentley (1988) e Doebelin (1983) são divididas em: Estímulos de Interferência e Estímulos Modificadores. Os estímulos de interferência representam outras grandezas físicas para as quais o sensor também é sensível. Os modificadores são aqueles que causam alteração na relação Estímulo/Resposta dos estímulos de interferências e do mensurando. A fig. 6.2 ilustra um sistema de medição com essas interferências. O sistema de medição também pode sofrer influências das características construtivas, da aquisição, da montagem e do tratamento de sinal (Doebelin, 1983; Hansman 1999; Oliveira, A.B.S., 2004).

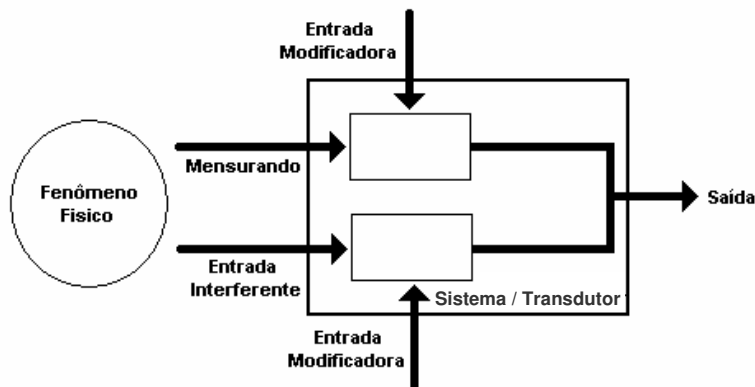


Figura 6.2 – Um sistema de medição sobre influência das entradas ambientais.

O desempenho de um sistema de medição é definida em termos das características estáticas e dinâmicas. Em regimes estáticos, um transdutor é caracterizado pela sua sensibilidade, que é a relação entre variação da resposta e do estímulo. O regime é dinâmico quando o mensurando sofre uma variação rápida no tempo e a sensibilidade sofre um desvio do valor estático, nesse caso o transdutor é caracterizado pela sua função de transferência (Oliveira, A.B.S., 2004; Hansman, 1999; Doebelin, 1983).

6.2 CALIBRAÇÃO

Quando deseja-se medir com qualidade o valor de uma variável física é preciso que os dispositivos sejam adequados ao fenômeno que está sendo analisado. Por essa razão, é necessário que os instrumentos de medição passem por processos onde o erro e a incerteza possam ser estimados, isto é, onde sejam caracterizados metrologicamente. Para a caracterização metrológica de um instrumento é necessário um trabalho de calibração, onde os efeitos das grandezas de influência possam ser avaliados e o erro e a incerteza estimados. Além de ter como objetivo a determinação de algumas características metrológicas como: faixa de utilização, limite mínimo de detecção, tempo de resposta, linearidade, derivação do zero e da escala, influência dos parâmetros ambientais, etc. (Bentley, 1988).

A calibração basicamente é a medição da relação entre resposta e o estímulo de um transdutor. Tradicionalmente uma rotina de calibração consiste em utilizar uma entrada física conhecida e registrar o valor correspondente na saída e com esses dados construir a curva de calibração (fig. 6.3), de onde pode-se determinar a sensibilidade do transdutor (Hansman, 1999).

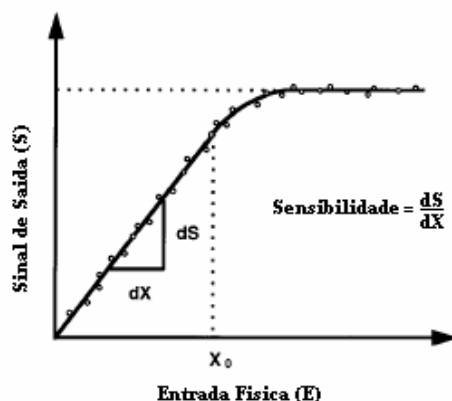


Figura 6.3 – Exemplo de curva de calibração de um sistema ou transdutor (adaptado de Hansman, 1999).

A fig. 6.3 mostra que a sensibilidade é dada pela inclinação da reta, o transdutor tem comportamento linear para valores de entrada menores que X_0 . Para valores de entrada maiores que X_0 o transdutor torna-se menos sensível, ou seja, há uma saturação, indicando que esse não pode ser usado para valores maiores que o valor de saturação (Doebelin, 1983; Hansman, 1999).

6.3 CARACTERÍSTICAS SISTEMÁTICAS

Doebelin (1983), Hansman (1999) e Rubio (2000) classificam as características dos transdutores em estáticas e dinâmicas. Bentley (1988) diferencia as características estáticas, que podem ser quantificadas matematicamente ou graficamente e as chamam de sistemáticas. A tab. 6.1 mostra as características sistemáticas e suas definições.

Tabela 6.1 – Características Sistemáticas (Bentley, 1988; Rubio, 2000; INMETRO-VIM, 1995).

Característica	Definição
Faixa Nominal	É o mínimo e o máximo dos valores da entrada e da saída.
Amplitude	É a diferença entre os valores máximos e mínimos da entrada e da saída.
Escala Linear	O elemento segue a equação ideal da reta: $O_{ideal} = K \cdot I + a$.
Escala Não-Linear	É quando um elemento não segue a equação ideal da reta, mas uma versão modificada por uma função $N(I)$: $O(I) = K \cdot I + a + N(I)$.
Sensibilidade	É a taxa de mudança da saída em função da entrada: $K = \frac{\Delta O}{\Delta I}$.
Grandezas de Influência	São as contribuições das variáveis ambientais como temperatura, pressão, umidade, etc., que interferem na medição de duas formas: - Causando um desvio sobre a curva, mantendo o zero original e mudando a sensibilidade de K para $K + K_m \cdot I_m$. (Entrada Modificadora = I_m) - Causam um desvio no zero, de a para $a + K_I \cdot I_I$, sem alterar a inclinação da reta. (Entrada Interferente = I_I).
Histerese	É a diferença entre máximo e o mínimo da saída para um mesmo valor de entrada.
Resolução	É a maior mudança da entrada sem que ocorra qualquer alteração no valor de saída..
Uso e Envelhecimento	São os efeitos do uso do instrumento, que vai perdendo suas características a medida que envelhece.
Faixas de Erro	Quando a performance do instrumento é definida em termos das faixas de erro, o valor exato ou sistemático é substituído por um valor em termos de função densidade de probabilidade.

Segundo Bentley (1988) o modelo geral da resposta de um transdutor em regime permanente, pode ser expresso em termos do estímulo e dos efeitos de não-linearidade das grandezas de influência, pela Eq. 6.1. Nesse caso não são considerados os efeitos de histerese e de resolução.

$$O(I) = K \cdot I + a + N(I) + K_m \cdot I_m \cdot I + K_I \cdot I_I \quad \text{Eq. 6.1}$$

6.3.1 CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS

Repetitividade

Sendo todas as condições reproduzidas exatamente da mesma maneira, a repetitividade é o desvio percentual máximo com o qual uma mesma medição é indicada. Em muitos casos, a falta de repetitividade de um elemento é função das flutuações aleatórias das grandezas de influência I_m e I_I (Bentley, 1988, Rubio, 2000).

A repetitividade é determinada pela medição do espalhamento dos valores da resposta dos estímulos, em torno da média (Hansman, 1999), podendo ser descrita por uma função densidade de probabilidade (fdp). A fdp mais utilizada é a distribuição normal ou Gaussiana (Eq. 6.2) (Bentley, 1988).

$$fdp(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \quad \text{Eq. 6.2}$$

Bentley (1988) mostra que o desvio do estímulo O é uma combinação linear dos desvios dos estímulos I , I_m e I_I . Usando a Eq. 6.2 para avaliar as derivadas parciais da resposta em termos dos estímulos, o desvio padrão da resposta (O) sobre média (\bar{O}) é dado pela equação 6.3 (Bentley, 1998).

$$\sigma_o = \sqrt{\left[\left(\frac{\partial O}{\partial I} \right)^2 \cdot \sigma_I^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_m} \right)^2 \cdot \sigma_{I_m}^2 + \left(\frac{\partial O}{\partial I_I} \right)^2 \cdot \sigma_{I_I}^2 \right]} \quad \text{Eq. 6.3}$$

O valor do desvio padrão da saída, pode ser determinado pelos desvios padrões dos estímulos (Eq. 6.3) ou através de um processo de calibração. Com isso, a média da saída do sistema de medição é dada pela equação 6.4 e a função densidade de probabilidade pela Eq. 6.5 (Bentley, 1999).

$$\bar{O} = K \cdot \bar{I} + a + N(\bar{I}) + K_m \cdot \bar{I}_m \cdot \bar{I} + K_I \cdot \bar{I}_I \quad \text{Eq. 6.4}$$

$$fdp(O) = \frac{1}{\sigma_o \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(O - \bar{O})^2}{2 \cdot \sigma_o^2} \right] \quad \text{Eq. 6.5}$$

O teste de repetitividade preferencialmente, deveria ser feito no mesmo local e, exatamente, nas mesmas condições onde o transdutor será instalado, isto é, onde os valores das grandezas de influência estejam sujeitas a mudanças aleatórias. A rotina de teste consiste em manter o estímulo constante no meio da faixa nominal e o valor da resposta medido por um longo período de tempo. Com esses dados coletados calcula-se o valor médio e o desvio padrão das grandezas de influências (Bentley, 1988).

Exatidão

A exatidão de uma medição é a proximidade entre o valor medido e o valor verdadeiro convencional do mensurando, e esse é definido como sendo o último valor obtido com o padrão primário, que tem o

acesso restrito a maioria dos usuários, por isso usa-se padrões intermediários, que são calibrados em relação ao padrão primário. Essa técnica é chamada de cadeia de rastreabilidade. Na maioria dos casos, a exatidão é quantificada em termos do erro, que é a diferença entre o valor medido pelo padrão e o valor medido pelo transdutor (Bentley, 1988; Hansman, 1999 e Rubio, 2000).

Identificação das Características Estáticas – Calibração

A calibração estática é feita quando o estímulo (mensurando) a um transdutor é constante ou varia lentamente. Para isso, são usadas montagens experimentais para determinar as características estáticas, através da medição do estímulo (I), da resposta (O) e das grandezas de influências (I_m, I_I). Para obter resultados significativos, as medições devem ter uma incerteza associada reduzida (Bentley, 1988).

Quando as variáveis ambientais estão fora dos limites das condições de repetitividade, todas devem ser medidas para que o valor medido possa ser corrigido. Bentley (1988) divide a calibração experimental em três partes principais:

- O versus I , com as $I_m = I_I = 0$: Com as grandezas de influências mantidas nos valores padrões, consiste em medir os valores de O e I em intervalos de 10% da amplitude. A histerese é determinada através da realização de séries de medição subindo e descendo por toda a faixa nominal do instrumento.
- O versus I_i , com $I = constante$: Para verificar se alguma variável ambiental é um estímulo de interferência, o estímulo (I) é mantido fixo no valor mínimo da amplitude ($I = I_{min}$). Então varia-se o valor de uma variável ambiental, mantendo as outras nos valores de repetitividade. Se o valor da resposta sofrer alteração, significa que essa variável ambiental é de interferência e o coeficiente K_I é dado pela Eq. 6.6. Esse teste deve ser feito para todas as variáveis ambientais e os K_I calculados.

$$K_I = \frac{\Delta O}{\Delta I_I} \quad \text{Eq. 6.6}$$

- O versus I_m , com $I = constante$: No caso dos estímulos modificadores o valor do estímulo é mantido fixo no meio da amplitude (Eq. 6.7), e cada entrada ambiental é, então, variada em torno de um valor conhecido. Se essa variação provocar uma mudança na resposta e se essa variável ambiental não for um estímulo de interferência, então será um estímulo modificador e o coeficiente correspondente K_m é calculado.

$$I = \frac{1}{2} \cdot (I_{min} + I_{max}) \quad \text{Eq. 6.7}$$

$$K_m = \frac{1}{I} \cdot \frac{\Delta O}{\Delta I_m} = \frac{2}{(I_{min} + I_{max})} \cdot \frac{\Delta O}{\Delta I_m} \quad \text{Eq. 6.8}$$

Conforme mostra a fig. 6.2, um estímulo de interferência e um estímulo modificador podem provocar um efeito conjunto ($I_{i,m}$), sobre o transdutor (Hansman, 1999). Nos testes descritos acima, esse efeito é

identificado quando uma variável ambiental, já definida como de interferência, causa uma mudança modificadora na resposta. Nesse caso o valor de K_m é definido pela Eq. 6.9 (Bentley, 1988).

$$K_m = \frac{2}{(I_{min} + I_{max})} \cdot \left[\frac{\Delta O}{\Delta I_{I,m}} - K_I \right] \quad \text{Eq. 6.9}$$

6.4 CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS

Quando um estímulo de um transdutor sofre uma mudança rápida de valor, a resposta sofrerá algum retardo até que a mudança ocorra. O trajeto pelo qual o transdutor respondeu à mudança súbita é usado para determinar as características dinâmicas, e a maioria dessas são definidas através da função de transferência, que é determinada experimentalmente através de um processo de calibração dinâmica (Bentley, 1988; Leódido, 2003; Carvalho, 1995; Oliveira, A.B.S., 2004; Vianna, 1984; Villa, 2000).

Função de Transferência $G(s)$ para um Típico Sistema de Elementos

A transformada de Laplace é uma ferramenta matemática que transforma problemas de valores iniciais (PVI) em equações algébricas, permitindo que a solução do PVI seja encontrada sem o cálculo de integrais e derivadas (Sodré, 2003). A transformada de Laplace de uma função f qualquer é definida como:

$$L[f(t)] = \bar{f}(s) = \int_0^{\infty} e^{-s \cdot t} \cdot f(t) \cdot dt \quad \text{Eq. 6.10}$$

Segundo Bentley (1988) a função de transferência de um elemento (Eq. 6.11) é definida como “a razão entre a transformada de Laplace da saída $\bar{O}(s)$ e a transformada de Laplace da entrada $\bar{I}(s)$, com as condições iniciais iguais a zero”.

$$G(s) = \frac{\bar{O}(s)}{\bar{I}(s)} \quad \text{Eq. 6.11}$$

Para um sistema com n elementos, a função de transferência global de todo o sistema é igual ao produto das funções de transferência de cada elemento (Bentley, 1988 e Hansman, 1999).

$$G(s) = \frac{\bar{O}(s)}{\bar{I}(s)} = G_{e1}(s) \cdot G_{e2}(s) \cdot \dots \cdot G_{en}(s) \quad \text{Eq. 6.12}$$

Modelo Matemático de um Transdutor

Equações diferenciais ordinárias, com coeficientes constantes (sistemas lineares invariantes no tempo) é o modelo matemático mais usado para avaliar a resposta dinâmica de um sistema de medição ou de um

transdutor. Nessa teoria, a relação entre qualquer entrada (mensurando, interferente ou modificadora) e a saída, assume a forma da Eq. 6.13, onde: a_i ($0 \leq i \leq n$) e b_j ($0 \leq j \leq m$) são constantes (Doebelin, 1983; Sydenham, 1999 e Villa, 2000).

$$a_n \frac{d^n O}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} O}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dO}{dt} + a_0 \cdot O(t) = b_m \frac{d^m I}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} I}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dI}{dt} + b_0 \cdot I(t) \quad \text{Eq. 6.13}$$

Outro método que pode ser usado na análise da resposta dinâmica de um transdutor, consiste na determinação de parâmetros de um modelo matemático a partir dos sinais experimentais (Villa, 2000).

Elemento de Ordem Zero

O caso mais simples de um transdutor ou um sistema de medição é o elemento de ordem zero, que é descrito pela Eq. 6.14 (Doebelin, 1983). Nesse caso, não há nenhum termo dependente da frequência, ou seja, a saída só poderá ter mesma a forma de tempo da entrada (Sydenham, 1999). “Então, um elemento de ordem-zero representa a performance dinâmica ideal” (Doebelin, 1983). Um exemplo de elemento de ordem zero é o strain gage resistivo.

$$O(t) = \frac{b_0}{a_0} \cdot I(t) \quad \text{Eq. 6.14}$$

A relação entre as constantes b_0 e a_0 na Eq. 6.15 define a sensibilidade estática como sendo:

$$K = \frac{b_0}{a_0} \quad \text{Eq. 6.15}$$

Elementos de Primeira Ordem

Na Eq. 6.13, assumindo que a_i é igual a zero para $1 < i \leq n$, chega-se a Eq. 6.16 que define um elemento de primeira ordem (Doebelin, 1983 e Villa, 2000).

$$a_1 \cdot \frac{dO}{dt} + a_0 \cdot O(t) = b_0 \cdot I(t) \quad \text{Eq. 6.16}$$

Dividindo a Eq. 6.16 pela constante a_0 , observa-se que no segundo termo aparece a sensibilidade estática K e a relação a_1/a_0 define a constante de tempo (τ) de um elemento. Dessa forma, tomando $D = d/dt$, a Eq. 6.16 pode ser reescrita como (Doebelin, 1983 e Villa, 2000):

$$(\tau \cdot D + 1) \cdot O(t) = K \cdot I(t) \quad \text{Eq. 6.17}$$

Segundo Doebelin (1983), a unidade da constante K é a relação entre a unidade da resposta e do estímulo. Dessa forma, para um elemento de qualquer ordem, K sempre terá o mesmo significado físico,

isto é, a quantidade da resposta por unidade do estímulo, quando essa for estática. Da Eq. 6.17 pode-se definir a função de transferência de um elemento de primeira ordem como sendo:

$$\frac{O}{I}(s) = G(s) = \frac{K}{(\tau \cdot s + 1)} \quad \text{Eq. 6.18}$$

Um exemplo de desempenho dinâmico de primeira ordem é a resposta de um transdutor de temperatura submetido a uma variação rápida. Isto é no tempo zero ($t = 0$) a temperatura do transdutor é igual à temperatura do fluido e essa é subitamente elevada. O comportamento dinâmico é descrito pelo balanço de calor no elemento sensível, e com algumas simplificações chega-se a Eq. 6.19 (Bentley, 1988).

$$UA \cdot (\Delta T_F - \Delta T) = MC \cdot \frac{d\Delta T}{dt} \Rightarrow MC \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + UA \cdot \Delta T = UA \cdot \Delta T_F \quad \text{Eq. 6.19}$$

Comparando as Eqs. 6.16 e 6.19, verifica-se que $a_0 = b_0 = UA$, $a_1 = MC$ e que a constante de tempo e a sensibilidade estática são definidas pelas Eqs. 6.20.

$$K = \frac{b_0}{a_0} = \frac{UA}{UA} = 1 \quad \text{e} \quad \tau = \frac{a_1}{a_0} = \frac{MC}{UA} \quad \text{Eq. 6.20}$$

Com a Eq. 6.20 e aplicando a transformada de Laplace na Eq. 6.19, tem-se a função de transferência.

$$G(s) = \frac{\Delta T}{\Delta T_F}(s) = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad \text{Eq. 6.21}$$

Elementos de Segunda Ordem

Na Eq. 6.13 fazendo $a_i = 0$ para $2 < i \leq n$ chega-se a Eq. 6.22 que define o comportamento dinâmico de um elemento de segunda ordem (Doebelin, 1983 e Villa, 2000).

$$a_2 \cdot \frac{d^2 O}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dO}{dt} + a_0 \cdot O(t) = b_0 \cdot I(t) \quad \text{Eq. 6.22}$$

Os parâmetros matemáticos a_2 , a_1 , a_0 e b_0 , são reduzidos a três características físicas do elemento: a sensibilidade estática (K) que é definida pela Eq. 6.15, a frequência natural (ω_n) e o fator de amortecimento (ξ).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}} \quad \text{Eq. 6.23}$$

$$\xi = \frac{a_1}{2 \cdot \sqrt{a_0 \cdot a_2}} \quad \text{Eq. 6.24}$$

Com isso, a Eq. 6.22 pode ser reescrita como:

$$\left(\frac{D^2}{\omega_n} + \frac{2 \cdot \xi \cdot D}{\omega_n} + 1 \right) O(t) = K \cdot I(t) \quad \text{Eq. 6.25}$$

E a função de transferência para um elemento de segunda ordem é assim definida (Villa, 2000):

$$\frac{O(t)}{I(t)} = \frac{K}{\left(\frac{s^2}{\omega_n} + \frac{2 \cdot \xi \cdot s}{\omega_n} + 1 \right)} \quad \text{Eq. 6.26}$$

Para exemplificar um elemento de segunda ordem, usa-se o sistema mecânico tipo massa-mola com amortecimento (fig. 6.4), que converte a força F em movimento na direção x (Oliveira, A.B.S., 2004).

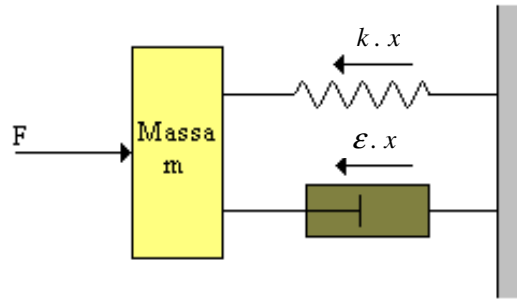


Figura 6.4 – Sistema massa-mola com amortecimento.

No instante $t = 0$, a velocidade e a aceleração iniciais são iguais a zero. A força inicial é balanceada pela Lei de Hooke, que diz que a força é igual ao produto da constante da mola pelo deslocamento inicial. No tempo $t = 0$, uma força de entrada é, subitamente, imposta ao sistema. Dessa forma, o comportamento dinâmico pode ser descrito pela 2ª Lei de Newton a soma de todas as forças envolvidas no sistema é igual ao produto da massa pela aceleração (Bentley, 1988, Doebelin, 1983 e Oliveira, A.B.S., 2004).

$$F - k \cdot x - \varepsilon \cdot \dot{x} = m \cdot \ddot{x} \quad \text{Eq. 6.27}$$

Utilizando as condições do problema, a Eq. 6.27 pode ser reescrita como (Bentley, 1988):

$$\frac{m}{k} \cdot \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{d \Delta x}{dt} + \Delta x = \frac{1}{k} \cdot \Delta F \quad \text{Eq. 6.28}$$

As características físicas do elemento definidas pelas Eqs. 6.15, 6.23 e 6.24, são iguais a:

$$K = \frac{1}{k} \quad [m/N] \quad \text{Eq. 6.29}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [rad/s] \quad \text{Eq. 6.30}$$

$$\xi = \frac{\varepsilon}{2 \cdot \sqrt{(k \cdot m)}} \quad \text{Eq. 6.31}$$

Com a definição das características físicas do instrumento a Eq. 6.28 pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot \frac{d\Delta x}{dt} + \Delta x = \frac{1}{k} \cdot \Delta F \quad \text{Eq. 6.32}$$

Aplicando a transformada de Laplace a Eq. 6.32 chega-se a função de transferência do sistema (Bentley, 1988; Oliveira, A.B.S., 2004).

$$G(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot s + 1} \quad \text{Eq. 6.33}$$

Identificando a Dinâmica de um Elemento

O comportamento dinâmico de um transdutor é determinado a partir de sinais de estímulo conhecidos. Os mais utilizados são: um degrau, um impulso, um impulso de Dirac, uma rampa, uma rampa interrompida e uma senóide. A fig. 6.5 mostra cada um desses estímulos (Bentley, 1988, Doebelin, 1983; Sydenham, 1999; Villa, 2000).

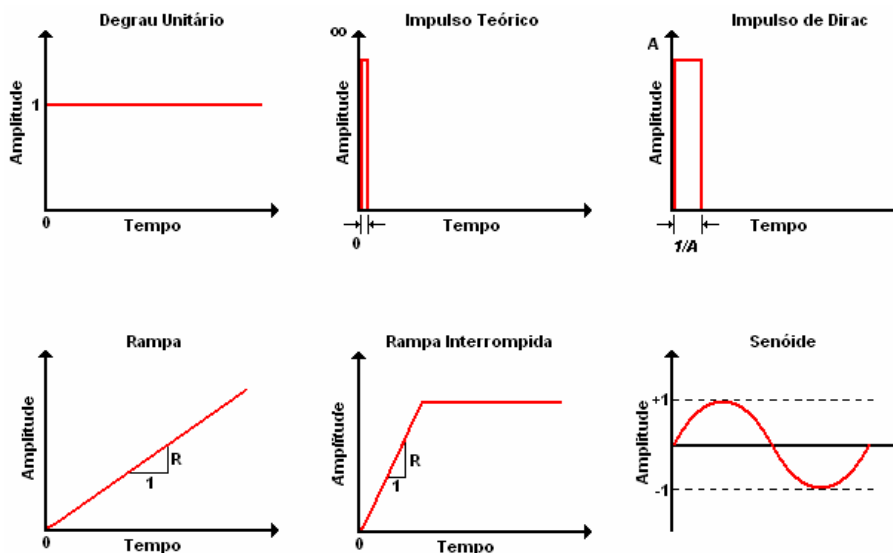


Figura 6.5 – Estímulos mais utilizados em processos de calibração dinâmica.

Nesse trabalho será usado o degrau unitário de Heaviside, que é o estímulo gerado nos instrumentos clássicos de calibração dinâmica (dispositivo de abertura rápida, tubo de choque, cuba rotativa, etc.). O degrau de Heaviside é representado pela Eq. 6.34.

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 6.34}$$

A transformada de Laplace para um degrau unitário é dada por:

$$L[1] = \frac{1}{s} \quad \text{Eq. 6.35}$$

Transdutor de Primeira Ordem

Quando um transdutor de primeira ordem é submetido a um degrau de Heaviside, a transformada de Laplace do sinal de saída é dada pelo produto entre a função de transferência do transdutor e a transformada do estímulo.

$$\bar{O}(s) = G(s) \cdot \bar{I}(s) = K \cdot \left(\frac{1}{(1 + \tau \cdot s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad \text{Eq. 6.36}$$

Bentley (1988) mostra o desenvolvimento completo para a Eq. 6.37, que fornece a equação que caracteriza a resposta de um transdutor de primeira ordem submetido a um degrau de Heaviside.

$$O(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad \text{Eq. 6.37}$$

Com a Eq. 6.37 é possível determinar as características dinâmicas de um elemento de primeira ordem, como: a constante de tempo, o tempo de subida e o tempo de resposta (Doebelin, 1983; Oliveira, A.B.S., 2004; Villa, 2000). A figura 6.6 mostra a curva levantada a partir da Eq. 6.37. A constante de tempo é definida como o tempo em que o sinal atinge 63.2% do nível de estabilização, isto é comprovado a partir da fig. 6.6, onde verifica-se que para $t = \tau$ o valor correspondente na resposta é aproximadamente 63%. Doebelin (1983) define o tempo de subida como o tempo em que sinal atinge 90% do nível de estabilização. Oliveira, A.B.S. (2004) define o tempo de resposta “como sendo o tempo em que a diferença entre o valor assintótico de equilíbrio do sistema e a resposta seja desprezível”. Geralmente é assumido que o tempo de resposta ocorre quando $t/\tau = 3$, correspondendo a 95% de $O(t)/K$.

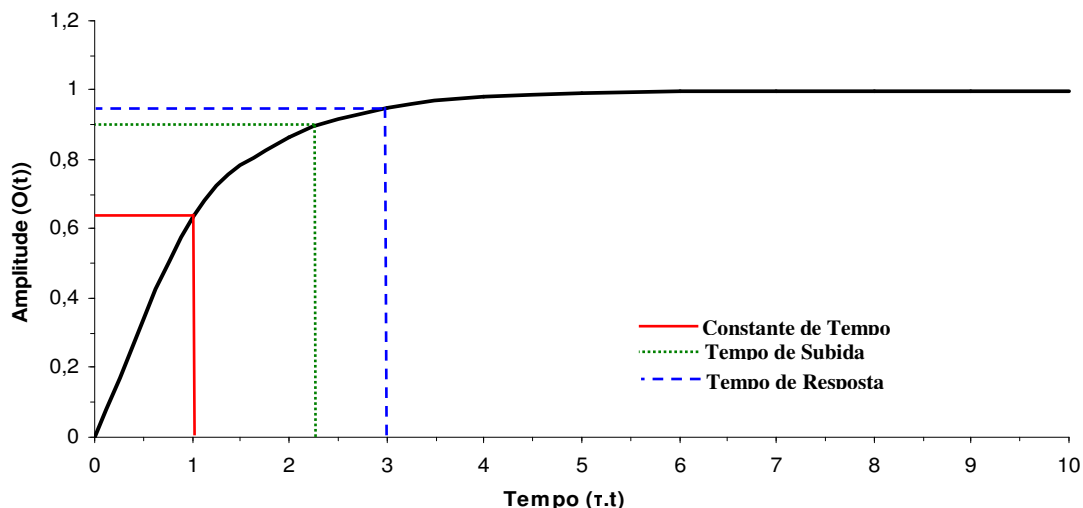


Figura 6.6 – Resposta de um transdutor de primeira ordem submetido a um degrau de Heaviside.

Aplicando o mesmo procedimento para um transdutor de segunda ordem, tem-se que a transformada de Laplace da resposta é igual ao produto da função de transferência pela transformada de um degrau.

$$\frac{\bar{O}(s)}{K} = G(s) \cdot \bar{I}(s) = \frac{1}{\left(\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{\omega_n} \cdot s + 1 \right) \cdot s} \quad \text{Eq. 6.38}$$

Desenvolvendo a Eq. 6.38 chega-se a resposta de um elemento de segunda ordem submetido a um degrau unitário, Bentley (1988).

$$\frac{\bar{O}(s)}{K} = \frac{1}{s} - \frac{(s + \xi \cdot \omega_n)}{(s + \xi \cdot \omega_n)^2 + \omega_n^2(1 - \xi^2)} - \frac{\xi \cdot \omega_n}{(s + \xi \cdot \omega_n)^2 + \omega_n^2(1 - \xi^2)} \quad \text{Eq. 6.39}$$

A Eq. 6.39 pode ser avaliada em termos do valor do coeficiente de amortecimento, isto é para $\xi < 1$, tem-se uma resposta subamortecida, para $\xi = 1$ um amortecimento crítico e para $\xi > 1$ uma resposta superamortecido. Aplicando a transformada inversa para cada um dos casos tem-se as equações que representam o sinal de saída.

Tabela 6.2 – Respostas de um elemento de segunda ordem a um degrau Bentley (1988).

Amortecimento	Transformada Inversa
$\xi < 1$ Sub-amortecido	$\frac{\bar{O}(t)}{K} = 1 - e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot t} \cdot \left[\cos(\omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \cdot t) + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot \text{sen}(\omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \cdot t) \right]$
$\xi = 1$ Crítico	$\frac{\bar{O}(t)}{K} = 1 - e^{-\omega_n \cdot t} \cdot (1 + \omega_n \cdot t)$
$\xi > 1$ Super amortecido	$\frac{\bar{O}(t)}{K} = 1 - e^{-\xi \cdot \omega_n \cdot t} \cdot \left[\cosh(\omega_n \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} \cdot t) + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - 1}} \cdot \text{senh}(\omega_n \cdot \sqrt{\xi^2 - 1} \cdot t) \right]$

A figura 6.7 mostra a resposta de um elemento de segunda ordem para diferentes valores do fator de coeficiente de amortecimento.

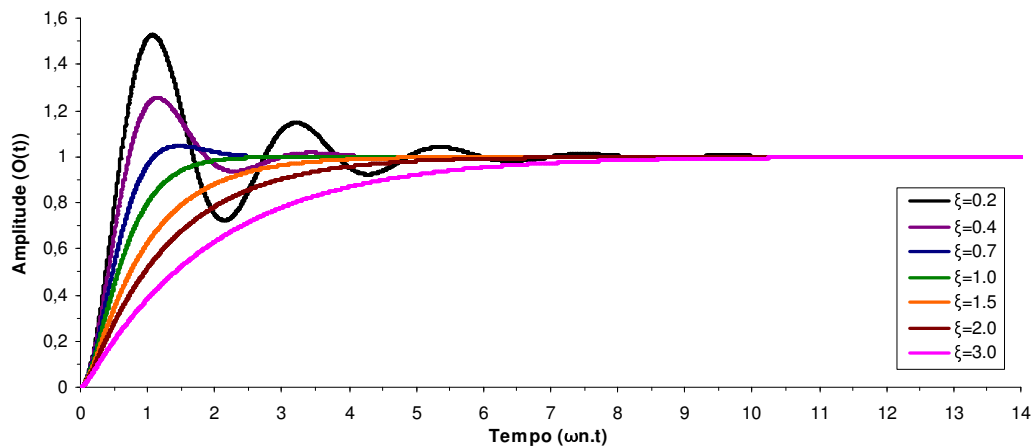


Figura 6.7 – Resposta de um transdutor de segunda ordem submetido a um degrau de Heaviside.

A partir da resposta de um elemento de segunda ordem submetido a um sinal padrão e da sua função de transferência, determina-se as características dinâmicas (Oliveira, A.B.S., 2004; Vianna, 1999 e Villa, 2000). A tab. 6.3 mostra essas características e suas definições.

Tabela 6.3 – Características dinâmicas para um elemento de segunda ordem (Oliveira, A.B.S., 2004 e Villa, 2005).

Característica	Definição
Banda Passante	É o intervalo em que o transdutor ou um sistema é capaz de medir o fenômeno.
Frequência de Ressonância	É a frequência onde a amplitude da função de transferência seja máxima.
Frequência Própria	É uma frequência natural do amortecimento. $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1 - \zeta^2}$
Coefficiente de Amortecimento	Caracteriza a dissipação de energia do sistema.
Tempo de Subida	É o tempo em que o sinal leva para passar entre os níveis de 10% e 90% da estabilização.
Overshoot	É o valor máximo alcançado pela resposta do sistema ou transdutor.
Tempo de Resposta	É o tempo compreendido entre o início da subida do sinal e a estabilização dentro de um intervalo definido $\pm \epsilon$.

A fig. 6.8 mostra as representações gráficas das características dinâmicas sobre o sinal de resposta de um elemento de segunda ordem submetido a um degrau.

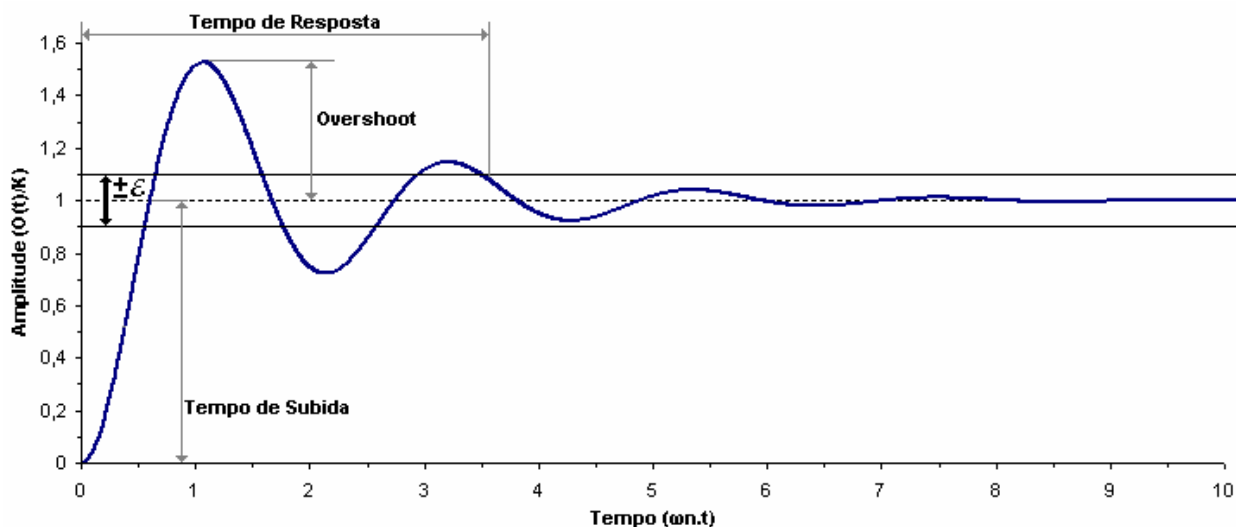


Figura 6.8 – Características dinâmicas de elemento de segunda ordem.

Os instrumentos clássicos geradores de degraus usados na calibração dinâmica são divididos em dois grupos:

- Periódicos: têm como característica principal a geração de estímulos periódicos;
- Aperiódicos: geram estímulos únicos e com duração finita ou infinita.

Como exemplo a tab. 6.4 mostra os principais dispositivos usados na calibração dinâmica de transdutores de pressão.

Tabela 6.4 – Exemplos de dispositivos usados na calibração dinâmica de transdutores de pressão.

Tipo	Nome do Dispositivo	Características
Periódico	Cavidade	Utiliza um sistema de êmbolo/pistão e motor, que gera pulsos de pressão proporcionais à variação da velocidade do motor.
Periódico	Coluna de Líquido	Uma coluna de líquido dentro de uma cavidade cilíndrica é vibrada por um excitador eletromagnético. Usado para altas frequências;
Aperiódico	Bomba de Pressão	Este dispositivo gera degraus ou impulsos de pressão de grandes amplitudes, a partir de uma carga explosiva detonada dentro de uma câmara.
Aperiódico	Dispositivo de Abertura Rápida	É composto por duas câmaras com volumes diferentes, onde a razão de volume é da ordem de mil, por isto esse dispositivo gera um degrau de pressão com duração infinita. É usado na calibração de transdutores de baixa frequência.
Aperiódico	Tubo de Choque	É composto por dois tubos separados por uma membrana e quando essa é rompida, uma onda de pressão se desloca por um dos tubos, gerando um degrau de pressão com duração finita. É usado para transdutores de alta frequência.

7. DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

Dentro da metodologia proposta, este capítulo contempla a análise do método utilizado para a calibração de transdutores de dióxido de carbono, o uso do modelo teórico do processo físico e dos meios clássicos de calibração dinâmica para determinar os parâmetros de projeto e identificar possíveis limitações que devem ser consideradas no desenvolvimento do novo dispositivo de calibração.

7.1 CALIBRAÇÃO ATUAL DE TRANSDUTORES DE CO₂

Os fabricantes de transdutores de CO₂ do tipo NDIR, geralmente, fazem a calibração utilizando como padrão um gás com concentração conhecida. A fabricante Licor (2001) mostra a rotina de calibração que é utilizada em seus dispositivos, onde um gás com concentração conhecida passa por um tubo colocado no caminho óptico do transdutor (Fig. 7.1a e b).

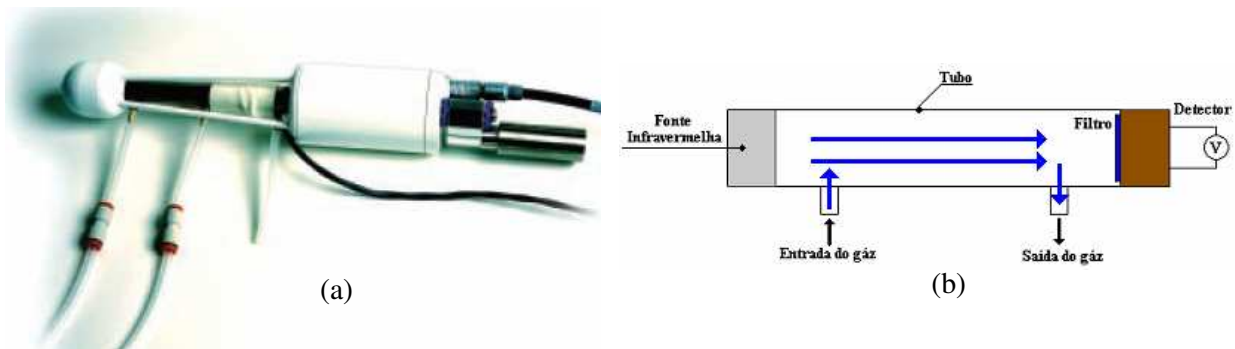


Figura 7.1 – Calibração de transdutores de CO₂
(a) Imagem da montagem experimental (Licor, 2001); (b) Esquema.

Embora esse método de calibração permita determinar as características do transdutor em regime permanente, a determinação das características dinâmicas não pode ser feita, já que seria necessário submeter o transdutor a uma variação rápida do mensurando, por exemplo, um degrau de concentração. A caracterização dinâmica dos transdutores de CO₂ é requerida quando esses são submetidos à variações rápidas do mensurando, como ocorre em medições do fluxo de CO₂, em respiradores artificiais, em fontes móveis, etc. Outra desvantagem desse método de calibração é o uso de um escoamento forçado em um volume pequeno, o que eleva um pouco a pressão. Com isso o transdutor não é calibrado no mesmo nível de pressão em que será utilizado, podendo gerar incerteza na medição.

7.2 METODOLOGIA PROPOSTA

O desenvolvimento do novo método de calibração é baseado na teoria da difusão mássica do dióxido de carbono e nas técnicas tradicionais de determinação das características estáticas e dinâmicas. Em primeiro lugar analisou-se a calibração dinâmica, já que essa exige um aparato instrumental mais

complexo. Dentre os dispositivos tradicionais de calibração, buscou-se um que gerasse uma excitação compatível com o transdutor e com o processo físico da transferência de massa.

Para avaliar a dinâmica do transdutor, o objetivo dessa dissertação propõe a utilização de um degrau de concentração, dessa forma o Dispositivo de Abertura Rápida (DAR), devido às suas características, mostrou-se o mais adequado para gerar um degrau de concentração. Normalmente DAR é utilizado na calibração de transdutores de pressão de baixa frequência e sua característica principal é a geração de um degrau com duração infinita.

7.2.1 DISPOSITIVO DE CALIBRAÇÃO

Conforme mostra a tab. 6.4 o DAR é um instrumento aperiódico gerador de degraus, constituído basicamente por duas câmaras e um sistema de abertura rápida que faz a comunicação entre as câmaras. No DAR o tempo de subida do degrau é determinado por suas características construtivas.

Os ensaios foram realizados no Dispositivo de Abertura Rápida DOR 10 (fig. 7.2) do Laboratoire de Metrologie Dynamique da ENSAM/Paris, que trabalha com pressões até 1000 kPa . O controle da pressão das câmaras é independente e é feito pelos equipamentos Druck DPI 520 que são controlados remotamente. A aquisição dos dados foi feita através de um osciloscópio Nicolet Accura.

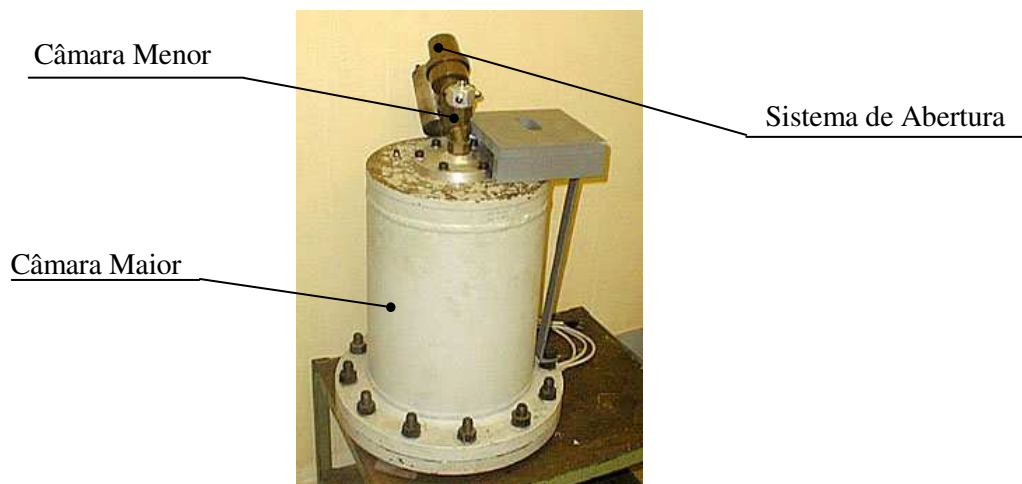


Figura 7.2 – Dispositivo de Abertura Rápida – DOR 10. LMD-ENSAM/Paris.

Para a realização dos ensaios no DOR 10, foi necessária a realização de algumas modificações estruturais para a montagem dos transdutores e dos elementos de controle. A fig. 7.3 mostra o desenho esquemático das modificações que foram realizadas para possibilitar a geração de um degrau de concentração, a fixação dos transdutores e dos dispositivos de controle. Como o transdutor a ser calibrado deve ser fixado na câmara menor, foi necessária a fabricação de uma nova câmara que permitisse a instalação do transdutor e que tivesse um volume menor que a utilizada para a calibração de transdutores de pressão. Na câmara maior foi instalado outro transdutor, para monitorar a concentração. Um ventilador foi usado para manter a uniformidade da mistura, já que o DOR 10 trabalha na vertical e como o CO_2 é mais pesado que o ar, haveria acúmulo desse gás no fundo da câmara maior.

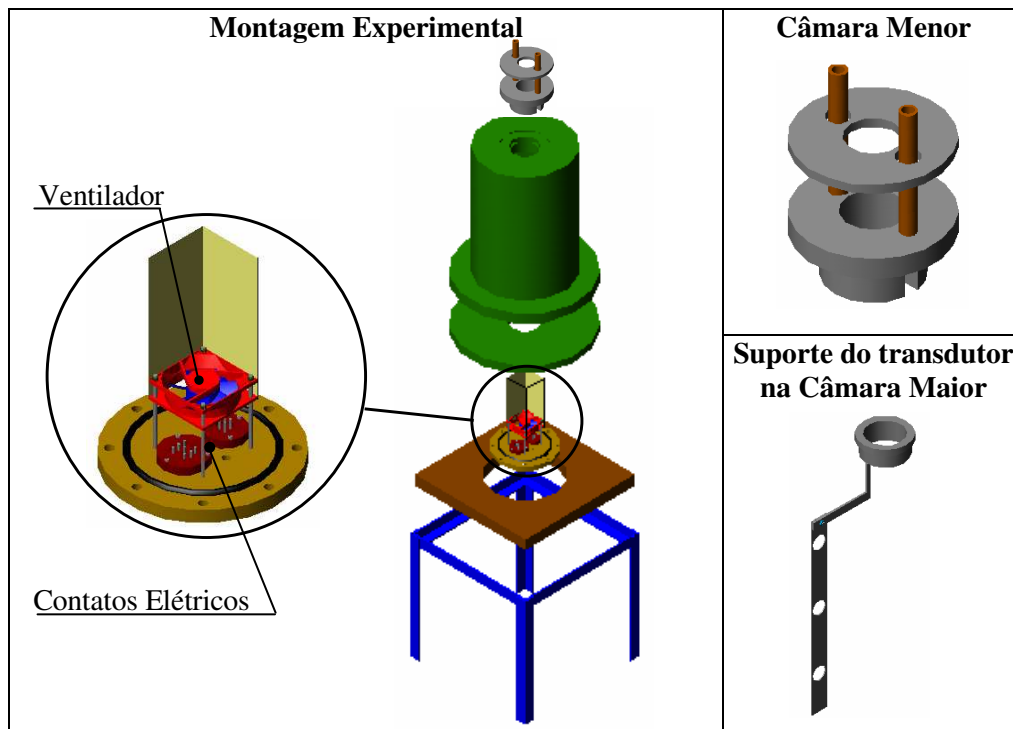


Figura 7.3 – Alterações realizadas no dispositivo de abertura rápida DOR 10.

Como visto na fig. 7.3, foram instalados dois tubos na câmara menor, que têm a função de retirar a mistura após o ensaio, além de permitirem o controle da pressão. No suporte do transdutor da câmara maior observa-se que há três orifícios para fixação do transdutor, usados para verificar a homogeneidade da mistura. Na parte inferior da câmara maior foram fixados os contatos elétricos que alimentavam o transdutor, o ventilador e o ponto de entrada do CO₂. A fig. 7.4 mostra o DOR 10 e os detalhes das montagens realizadas.

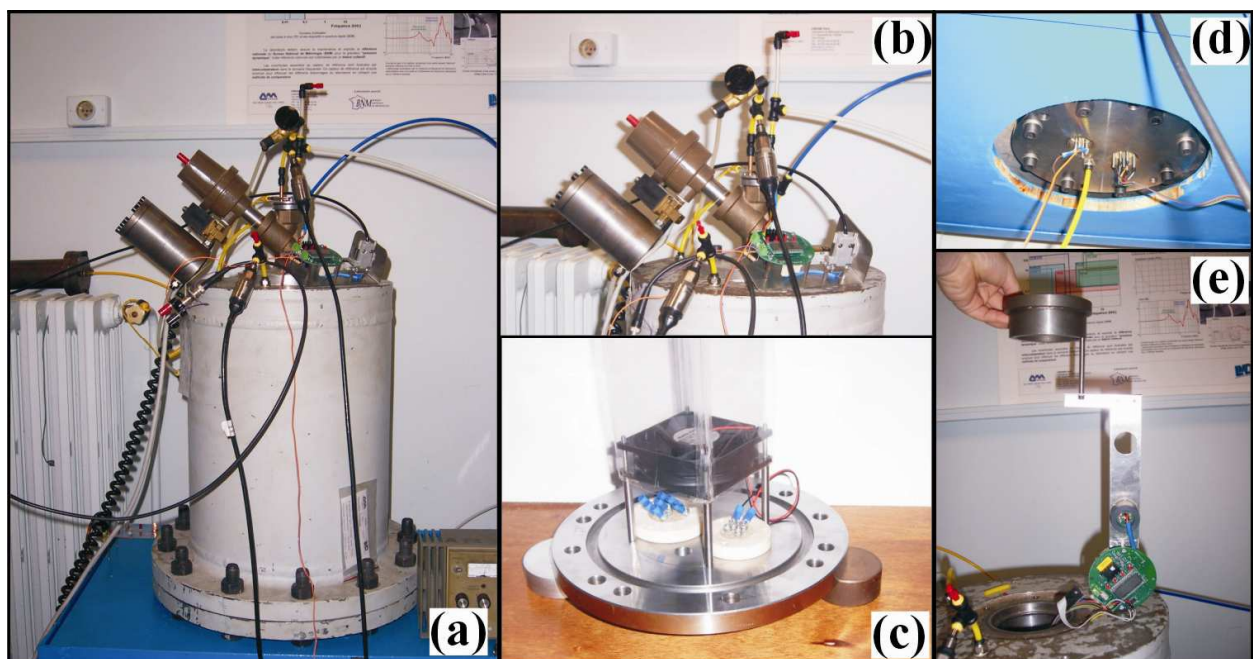


Figura 7.4 – (a) Vista Geral do DOR 10; (b) Detalhe da câmara menor, do sistema de abertura e dos pontos de controle da pressão; (c) Peça do fundo da câmara maior com o ventilador e os contatos elétricos; (d) Fundo da câmara maior e (e) Suporte do transdutor da câmara maior e esse fixado no orifício central.

7.3 ENSAIOS

Foram feitas diferentes montagens experimentais para analisar o comportamento do transdutor de CO₂ e o de grau de concentração. Dessa forma, para que os resultados pudessem ser comparados estabeleceram-se condições de ensaio que foram mantidos em todos os testes. Essas condições são aquelas que podem influenciar no desempenho do transdutor, como: o nível de concentração na câmara maior, a temperatura e a pressão.

Como discutido na seção 5.4.4 o transdutor possui um termistor que faz a compensação do efeito da temperatura, mas que não suporta mudanças bruscas. Por isso, a temperatura do ambiente foi mantida entre 19.5 °C e 20.5 °C. A concentração da câmara maior foi definida entre 20% e 80% da faixa nominal (1% e 4% de CO₂ em volume), uma vez que os transdutores trabalham de forma mais estável dentro desse intervalo.

Um problema identificado no método de calibração estática, usada pelos fabricantes, é a diferença entre a pressão de trabalho e a de calibração. Por isso, inicialmente buscou-se verificar o efeito dessa grandeza de influência no tempo de subida do transdutor.

Os passos para a realização dos ensaios no DOR 10 são:

- Concentração de CO₂ na câmara maior – o dióxido de carbono era introduzido na câmara, próximo ao ventilador. Dessa forma, rapidamente a mistura atingia a concentração desejada de forma homogênea;
- Controle da pressão – as pressões nas câmaras eram mantidas iguais através dos transdutores de pressão instalados nas câmaras e dos dispositivos controladores.
- Sistema de Abertura – com a concentração ajustada e a pressão controlada, o sistema de abertura era acionado. Com as duas câmaras em comunicação, o processo de difusão era medido pelo transdutor fixado na câmara menor.
- Limpeza – as câmaras são novamente separadas, no término do ensaio. A limpeza da câmara menor foi feita com ar atmosférico.

7.3.1 INFLUÊNCIA DA PRESSÃO

Para analisar a influência do escoamento induzido pelo ventilador sobre o desempenho do transdutor, foram realizados ensaios com o ventilador desligado e ligado. No primeiro caso, a mistura perdeu homogeneidade, já que o CO₂ tende a concentrar-se no fundo da câmara maior, comprometendo o processo de difusão. Os resultados, para esse caso, mostraram que mesmo com um tempo longo de aquisição, o sinal não estabilizou no mesmo nível da concentração na câmara maior. Com o ventilador ligado, a mistura permaneceu homogênea e o processo de difusão pode ser analisado. A fig. 7.5 mostra a

média, de quatro ensaios, da resposta do transdutor da câmara menor, para cada montagem com concentração de 1% e com diferentes pressões (*atmosférica e atmosférica + e - 10 kPa*).

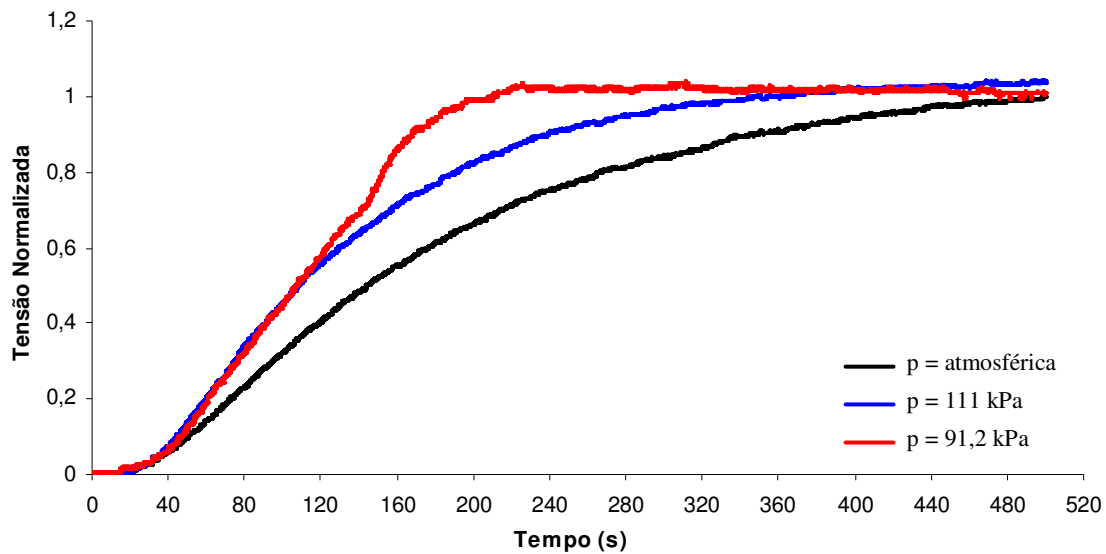


Figura 7.5 – Resposta do transdutor para concentração igual a 1% com diferentes níveis de pressão.

Analisando a figura 7.5 observa-se que a variação da pressão provocou mudanças significativas na resposta do transdutor. Mas, avaliando a montagem experimental, verifica-se que essa melhora não representa claramente o efeito da pressão, já que os controladores da pressão introduziram no processo, variáveis não controladas. Esses dispositivos utilizam uma eletroválvula que insufla ar ou libera a saída de mistura do DOR 10, provocando um fluxo de massa não controlado, comprometendo a manutenção da concentração constante. E como a concentração na câmara era baixa (1%), a retirada e/ou o insuflamento feitos pelo controle da pressão provocava uma variação significativa na composição da mistura.

No ensaio com $p = 91,2 \text{ kPa}$ apenas um ensaio foi bem sucedido, uma vez que o movimento induzido pelo controle da pressão e com a diferença de volume entre as câmaras, manter pressão e concentração constantes fosse mais complicado do que no caso onde $p = 111 \text{ kPa}$, devido aos problemas de controle relatados no parágrafo anterior. A forma diferenciada da resposta do transdutor para o ensaio com $p = 91,2 \text{ kPa}$ vista na fig. 7.5, provavelmente, deve-se a uma pequena diferença de pressão entre as câmaras, antes do sistema de abertura ser acionado, provocando um fluxo mássico para a câmara menor. Os problemas de controle da pressão e da concentração poderiam ser minimizados usando-se um gás padrão com a concentração desejada.

Já com a concentração igual a 4%, as flutuações de concentração impostas pelo controle da pressão são pouco significativas. Dessa, forma os resultados foram mais significativos para avaliar o efeito da pressão. A fig. 7.6 mostra a média das respostas do transdutor para os mesmos três níveis de pressão usados para a concentração de 1%.

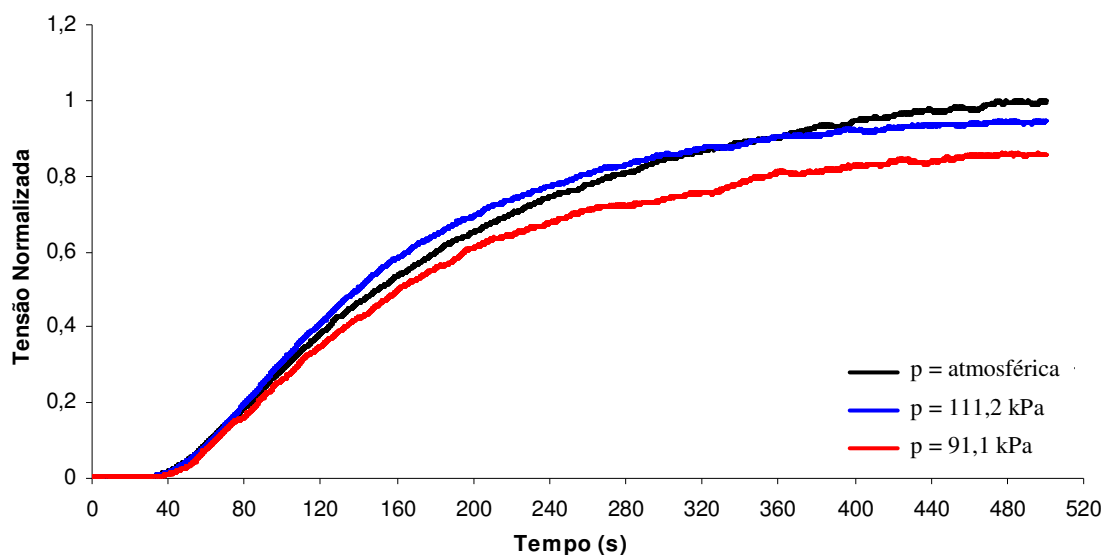


Figura 7.6 – Resposta do transdutor para concentração igual a 4% com diferentes níveis de pressão.

Analisando a fig. 7.6 observa-se que nos ensaios com $p = \text{atmosférica}$ e $p = 111,2 \text{ kPa}$, a diferença entre as respostas do transdutor é pequena. Já na curva do ensaio com $p = 91,1 \text{ kPa}$ verifica-se que a pressão causou uma mudança significativa na performance do transdutor, em média 11% menor, em relação ao ensaio com a pressão atmosférica, isto indica que a pressão altera o desempenho do transdutor. Mas, devido a algumas limitações estruturais do DAR, a análise completa da pressão será feita com o novo dispositivo.

Observa-se, também, que no nível inferior, a diferença é pequena e cresce à medida que a concentração aumenta. Isto indica que a pressão é uma entrada modificadora, pois, percebe-se que há uma modificação na sensibilidade do transdutor e não no zero. Entretanto, como o sinal não chega a estabilizar, é necessário outros ensaios para avaliar melhor a influência da pressão. Com base nas fig. 7.5 e 7.6, foi construída a tab. 7.1, que mostra o valor da constante de tempo e o tempo de subida para cada combinação de concentração e pressão testadas no DOR 10.

Tabela 7.1 – Características dinâmicas para os ensaios realizados no DOR 10.

Configuração Concentração/Pressão	Constante de Tempo (s)	Tempo de Subida (s)
1% / atmosférica	154	280
1% / atmosférica +10 kPa	113	253
1% / atmosférica -10 kPa	98	124
4% / atmosférica	149	287
4% / atmosférica +10 kPa	122	230
4% / atmosférica -10 kPa	134	272

Tanto para a concentração igual a 1% como para a de 4%, observa-se que o tempo de subida para todas as configurações foi muito grande. Outro ponto observado é que mesmo, com o elevado tempo de aquisição, o sinal não chegou a uma estabilização perfeita. Com isso, pode-se dizer que algum componente do DOR10 ofereceu alguma resistência ao movimento mássico de CO_2 . Analisando a estrutura do DOR 10 verifica-se que na comunicação entre as duas câmaras há um estrangulamento

(fig. 7.7), que restringe o escoamento, além da posição vertical das câmaras que prejudica a difusão do CO_2 , uma vez que, esse é mais pesado que o ar e tende a concentrar-se no fundo do dispositivo.

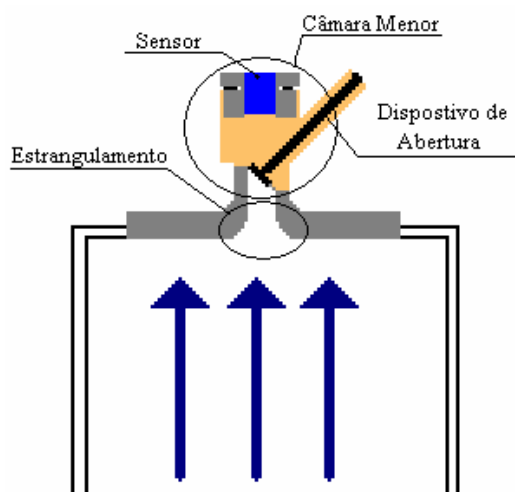


Figura 7.7 – Desenho esquemático da Câmara menor do DOR 10.

Aqui já é possível identificar dois parâmetros que devem ser levados em conta no desenvolvimento do novo dispositivo. O primeiro, é a montagem da câmara menor e do sistema de abertura, que devem ser desenvolvidos de forma a permitir o livre movimento do CO_2 , sem que a estrutura interfira no processo físico. O segundo parâmetro é a posição das câmaras que devem ser montadas na horizontal. Para diminuir o efeito causado pelo fato do CO_2 ser mais pesado.

7.3.2 CONFIRMAÇÃO DOS PARÂMETROS IDENTIFICADOS

Diante disso, fez-se necessário a realização de uma montagem experimental que gerasse um degrau de concentração, onde todo o volume na frente do transdutor ficasse livre e o transporte de CO_2 acontecesse sem a interferência das características físicas do dispositivo. Com isso, pensou-se em um dispositivo baseado no princípio de funcionamento de um DAR, mas, que não houvesse um estrangulamento entre as câmaras. Dessa forma, o volume da câmara menor entraria, imediatamente, em contato direto com a mistura, após o acionamento do sistema de abertura.

Para atender esses critérios, foi realizada uma montagem experimental (fig. 7.8), onde se gerou um degrau negativo. Essa montagem consiste em utilizar uma parte da mesma câmara menor construída para o DOR 10, isolar o transdutor do ambiente com um balão, em seguida, aumentar a concentração dentro do balão e, com o auxílio de uma tesoura, cortar de uma só vez o balão. Essa montagem, na verdade, funciona com o mesmo princípio de um dispositivo de abertura rápida, isto é, o balão é a câmara menor, o ambiente é a câmara maior e o corte do balão o sistema de abertura, porém nesse caso o degrau é negativo.

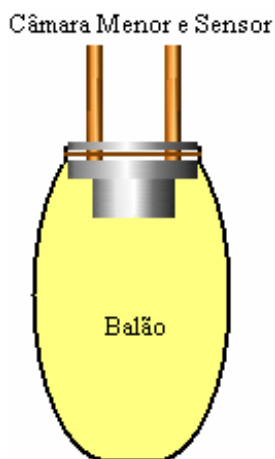


Figura 7.8 – Montagem Experimental com o uso de um balão.

Ensaio com degrau negativo também foram realizados no DOR 10 para que fosse feita a comparação com os testes com o balão. As fig. 7.9 e 7.10 mostram os resultados feitos com o balão e com o DOR 10 para uma concentração de 1%. No detalhe das figuras observa-se os sinais sobre uma mesma base de tempo.

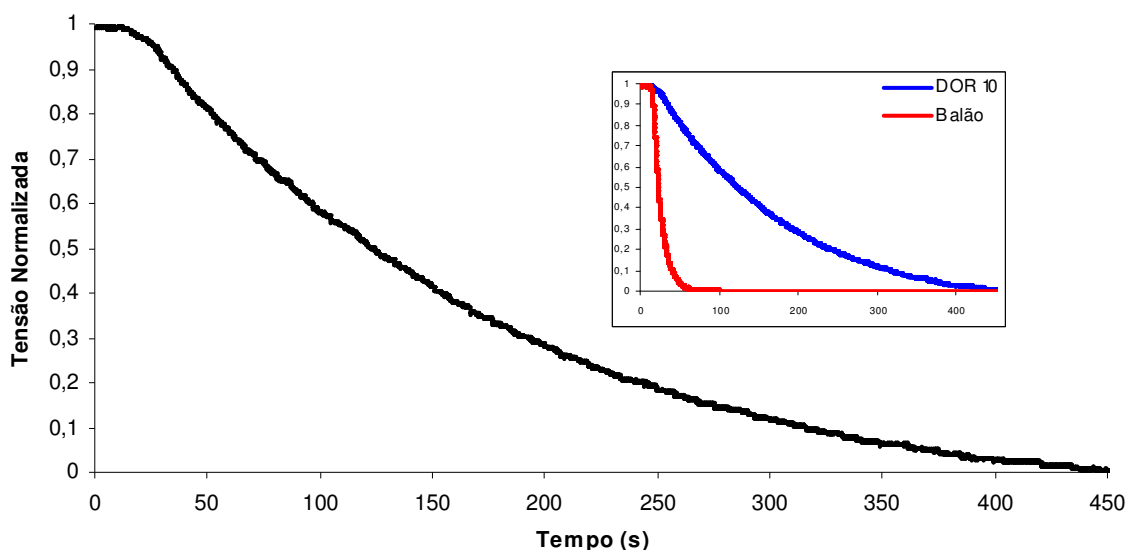


Figura 7.9 – Ensaio com concentração igual a 1%, no DOR10.

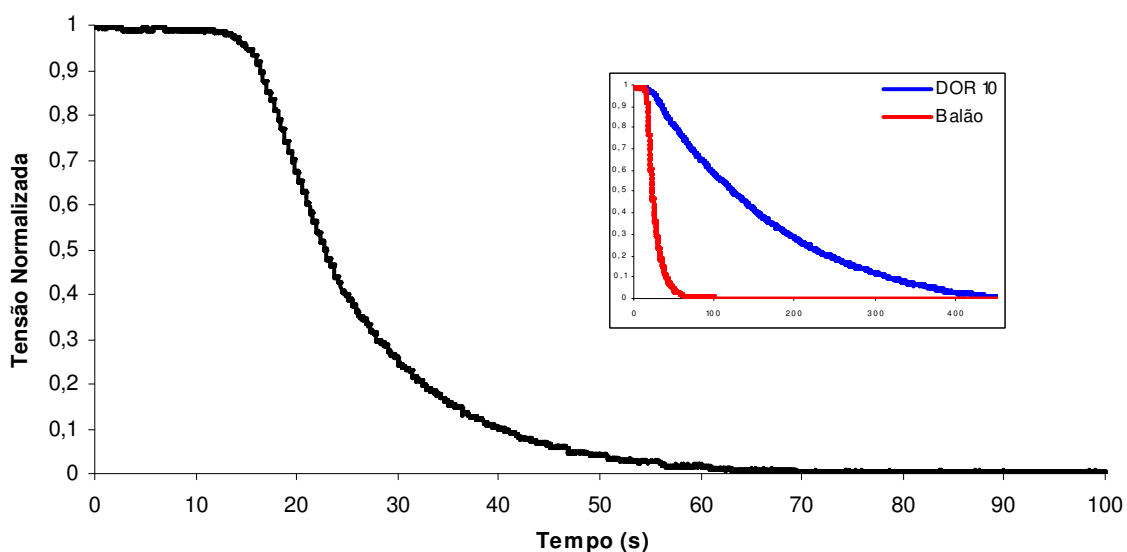


Figura 7.10 – Ensaio com concentração igual a 1%, com balão.

A fig. 7.11 é 7.12 mostram os resultados com o DOR10 e com o balão para uma concentração de 4%.

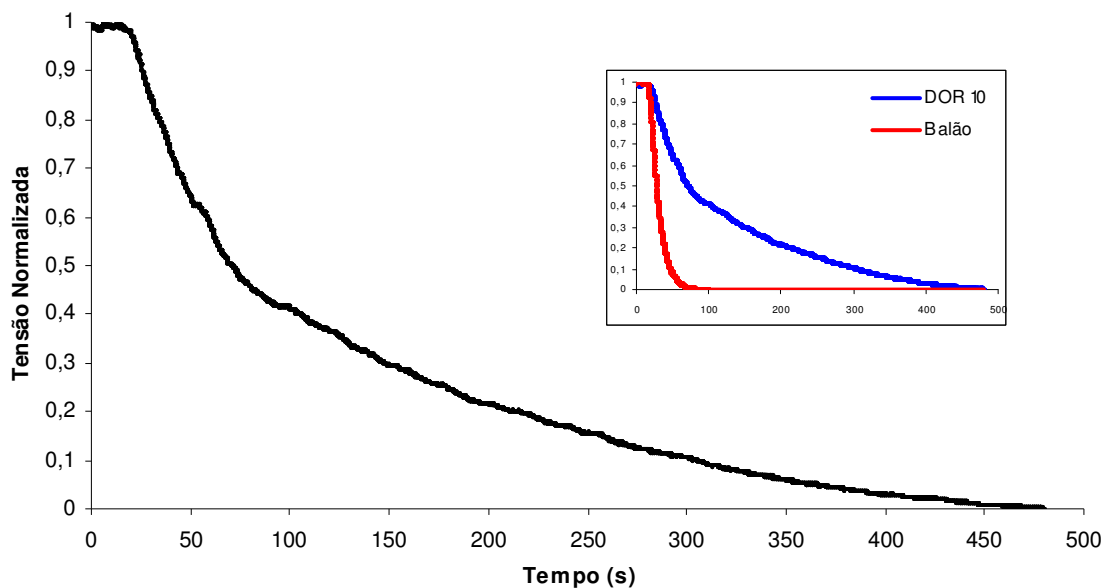


Figura 7.11 – Ensaio com concentração igual a 4%, no DOR 10.

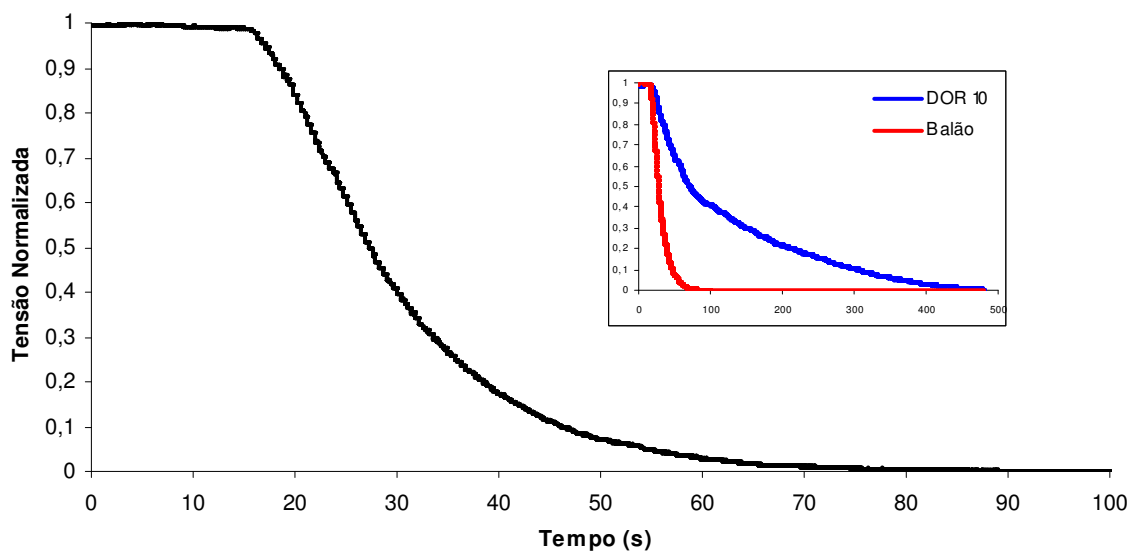


Figura 7.12 – Ensaio com concentração igual a 4%, com balão.

Fazendo uma análise quantitativa das fig. 7.9 a 7.12, foi construída a tab. 7.2 que mostra o tempo de descida para cada ensaio.

Tabela 7.2 – Tempo de Descida com o DOR 10 e Balão.

Configuração Concentração/Pressão	Tempo de Descida – DOR 10 (s)	Tempo de Descida – Balão (s)
<i>1% / atmosférica</i>	<i>275</i>	<i>23</i>
<i>4% / atmosférica</i>	<i>275</i>	<i>27</i>

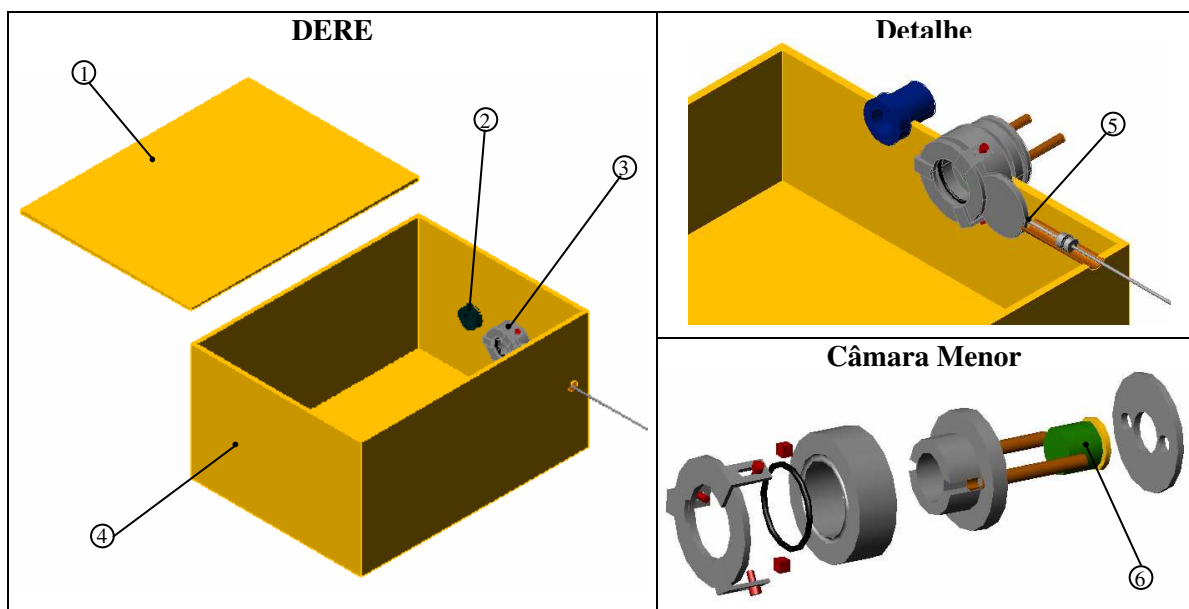
Observando as fig. 7.9 a 7.12 e a tab. 7.2 observa-se que, houve uma melhora significativa na resposta do transdutor. Isto mostra que, quando não há obstáculos ao movimento mássico, um degrau de concentração pode ser formado.

8. NOVO DISPOSITIVO DE CALIBRAÇÃO

8.1 CRITÉRIOS DO NOVO DISPOSITIVO

Com os resultados obtidos nos ensaios com os balões e baseando-se no princípio de funcionamento do Dispositivo de Abertura Rápida, foi desenvolvido um dispositivo específico para gerar um degrau de concentração, o Dispositivo de Exposição Rápida a Emissões (DERE, fig. 8.1). Os critérios básicos exigidos para o desenvolvimento do DERE foram: capacidade de gerar um degrau de concentração com padrão metrológico, possibilidade de realização da calibração estática e controle das grandezas de influência. Esses critérios conduziram a concepção de um dispositivo composto por duas câmaras, um sistema de abertura rápida e um ventilador (fig. 8.1). No DERE, as câmaras ficam na horizontal e quando o sistema de abertura é acionado, toda a frente do transdutor fica exposta, ou seja, não há nenhum obstáculo físico ao movimento mássico do CO₂.

As grandezas de influências que podem provocar efeitos indesejáveis na operação do transdutor e que foram analisadas são: pressão, temperatura e luminosidade. A pressão e a temperatura influenciam no processo, pois, modificam algumas características físicas do CO₂ (Eq. 4.8). A luminosidade influencia diretamente no funcionamento do transdutor, que utiliza a intensidade da luz para determinar a concentração do gás.



- ① Tampa do Dispositivo;
- ② Sede do transdutor que monitora a concentração na Câmara Maior;
- ③ Câmara Menor;
- ④ Câmara Maior
- ⑤ Sistema de Abertura;
- ⑥ Transdutor da Câmara Menor.

Figura 8.1 – Novo Dispositivo de Calibração.

8.2 CONTROLE DAS GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA

As grandezas de influência a serem controladas são aquelas que poderiam influenciar na geração do degrau e no desempenho do transdutor e do DERE. As grandezas consideradas foram: pressão, temperatura, luminosidade e umidade.

Pressão

A principal influência da pressão é a alteração que ela provoca no coeficiente de difusividade (Eq. 4.8). O monitoramento da pressão é feito pelos manômetros das válvulas reguladoras de pressão e por um transdutor de pressão fixado no DERE.

Temperatura

Assim como a pressão, uma variação da temperatura provoca alteração no valor do coeficiente de difusividade do CO₂ (Eq. 4.8). Por isso, a temperatura da mistura era medida através de um termopar fixado em uma das conexões da câmara maior.

Luminosidade

A necessidade de avaliar a intensidade luminosa surge do princípio de funcionamento do fotodetector, que necessita de momentos claros e escuros. Dessa forma, é possível que em ambientes mais claros o transdutor perca sensibilidade, uma vez que o momento escuro não seria ideal. Para medir a luminosidade foi usado um luxímetro digital da marca BEHA (modelo 93-1065L), que foi colocado sobre a câmara maior.

Umidade

Como o DERE foi construído em acrílico, um instrumento medidor de umidade pode ser introduzido no interior do dispositivo e a leitura feita visualmente.

8.3 DESCRIÇÃO DO DERE

8.3.1 CÂMARA MAIOR E MENOR

A câmara maior é retangular e foi construída em acrílico de 4 mm de espessura. A escolha do acrílico se deu pela possibilidade de controlar a luminosidade dentro do DERE e, com isso, avaliar essa grandeza de influência, além de permitir a visualização do funcionamento do sistema de abertura e do ventilador. O DERE opera com baixas pressões (+ ou - 20 kPa).

A câmara menor é a mesma utilizada no DOR 10 (fig. 7.3) e para a sua fixação no DERE foi necessário a fabricação de uma peça cilíndrica de alumínio. Na frente dessa peça foi fixado o dispositivo de vedação do sistema de abertura.

Os volumes das câmaras maior e menor são, respectivamente, iguais a $2,24 \cdot 10^{-2} m^3$ e $1,06 \cdot 10^{-5} m^3$ e a razão entre os volumes é de 2113. Com essas características, as dificuldades identificadas nos ensaios com o DAR e com o balão, foram superadas.

8.3.2 SISTEMA DE ABERTURA

O sistema de abertura consiste de uma haste com um êmbolo no meio que é presa a um pistão pneumático numa ponta e na outra é fixada uma tampa. O êmbolo da haste fica dentro de um cilindro preso à parede da câmara maior, dessa forma, o sistema pode ser acionado sem prejudicar o vedamento do DERE (fig. 8.1).

O pistão pneumático é controlado por uma válvula de três vias e a velocidade de abertura pode ser variada, modificando a pressão (100 a 600 kPa) que atua sobre o pistão. Para medir o tempo de abertura foi montado um circuito elétrico, conforme mostra a fig. 8.2. O contato elétrico instalado na haste do pistão movimenta-se entre dois contatos, fechando e abrindo o circuito. O tempo de abertura é o tempo em que o circuito fica aberto.

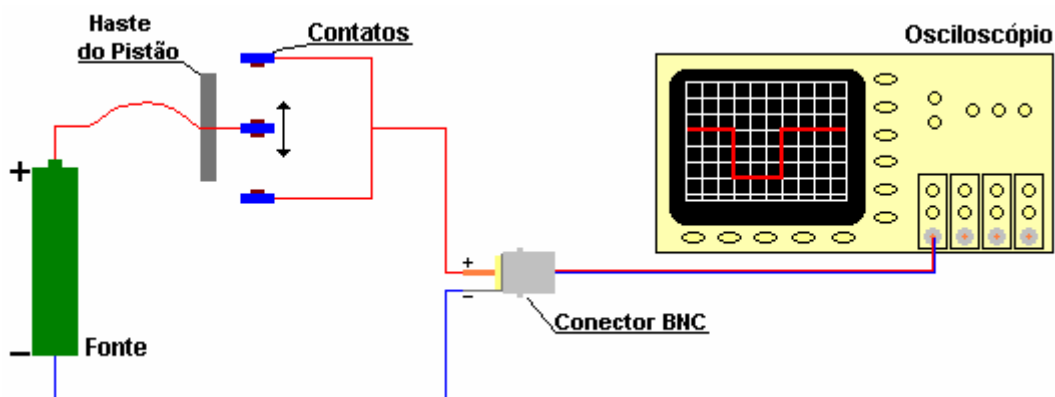


Figura 8.2 – Esquema do circuito elétrico montado para medir a velocidade do sistema de abertura.

A tab. 8.1 mostra os tempos de acionamento do sistema de abertura de acordo com a pressão imposta ao pistão pneumático.

Tabela 8.1 – Tempo de acionamento do sistema de abertura.

Pressão (kPa)	Tempo (ms)
200	83
300	76
400	71
500	64
600	60

8.3.3 VENTILADOR

Para manter a homogeneidade da mistura dentro da câmara maior, foi instalado um ventilador diferentemente do DOR 10. O ventilador no DERE pode ser colocado em diferentes posições (fig. 8.3). Com esse recurso, é possível avaliar a influência do escoamento induzido sobre o desempenho do transdutor e, conseqüentemente, analisar o movimento mássico por convecção pura ou por difusão pura.

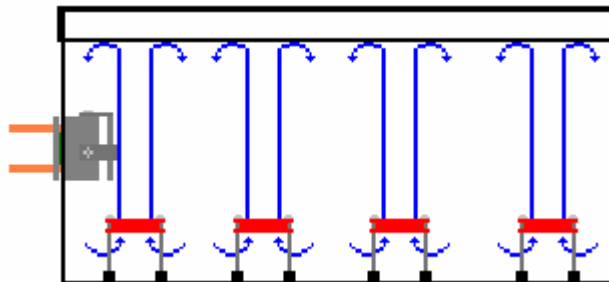


Figura 8.3 – Esquema da montagem do ventilador dentro da câmara maior.

8.3.4 SISTEMA PNEUMÁTICO E DE ALIMENTAÇÃO

A fig. 8.4 mostra o esquema pneumático e de alimentação do DERE. São utilizados: um cilindro pneumático que faz a abertura e fechamento da câmara menor, duas válvulas reguladoras que controlam a pressão no interior do DERE e a que alimenta o pistão.

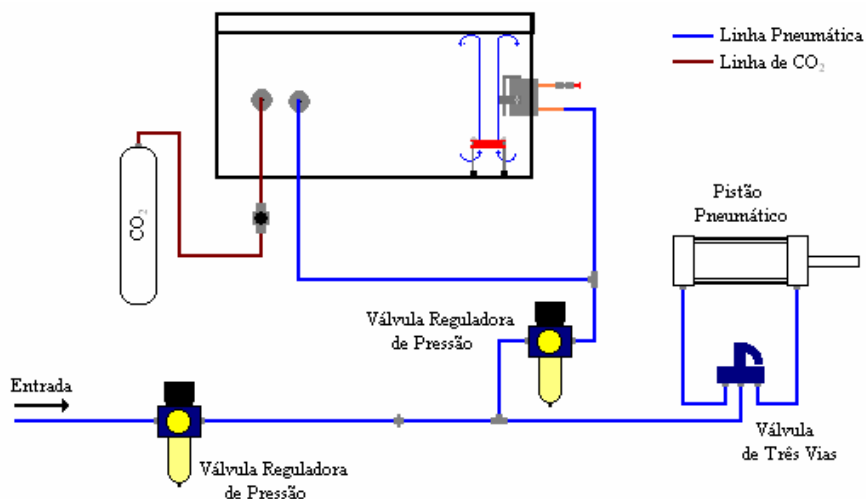


Figura 8.4 – Esquema pneumático e de alimentação de CO₂ do DERE.

8.3.5 BANCADA

Uma visão global da bancada, bem como seus componentes são mostrados na fig. 8.5. Todos os instrumentos, controles e pontos de aquisição do sinal foram instalados na bancada, permitindo uma boa organização do dispositivo e uma boa visualização do experimento.

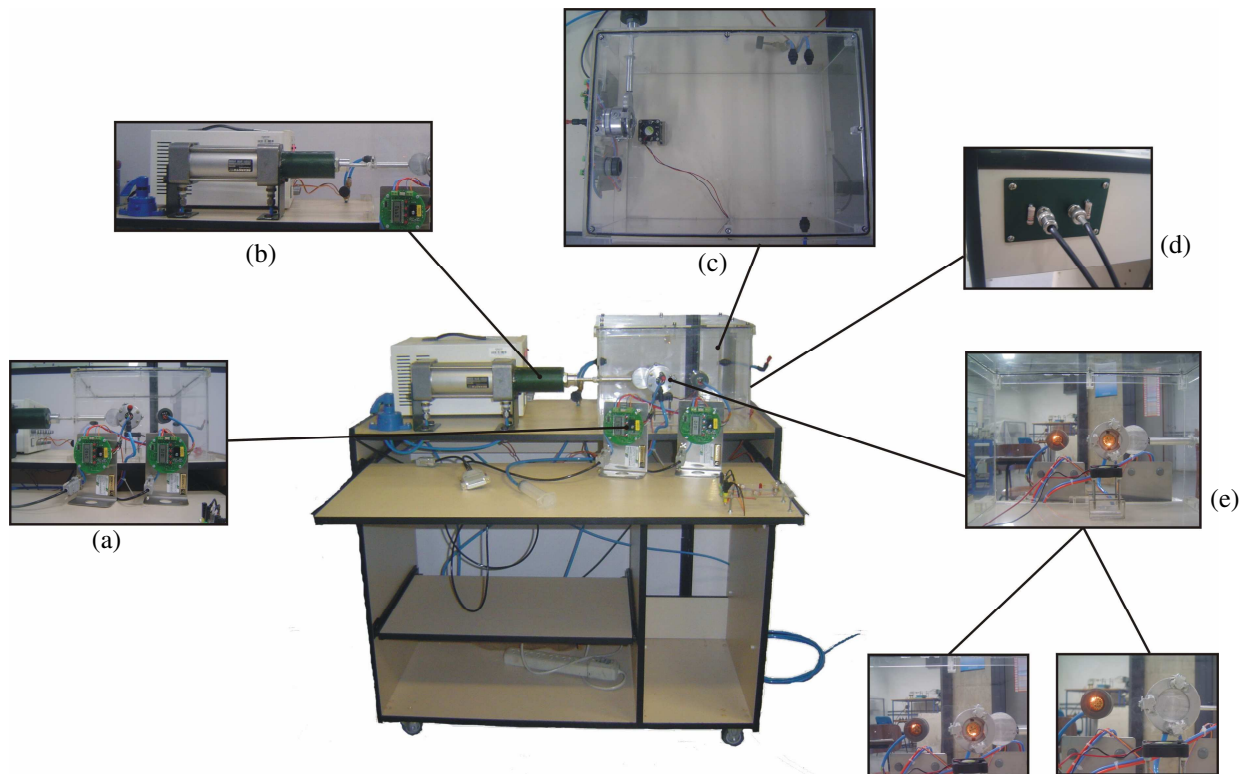


Figura 8.5 – Bancada e detalhes de controle do DERE.

(a) Transdutores com kits eletrônicos; (b) Sistema de abertura; (c) Vista superior do dispositivo; (d) Saída analógica do sinal – 4 a 20 Volts; (e) Câmara menor aberta e fechada.

8.3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA BANCADA

Para avaliar o processo da difusão no interior do DERE, foi feita uma simulação numérica 2-D do processo físico, onde o movimento mássico ocorre somente por difusão pura. A simulação utiliza o método de elementos finitos: Characteristic-Based Split. A fig. 8.6 mostra a malha gerada para o DERE.

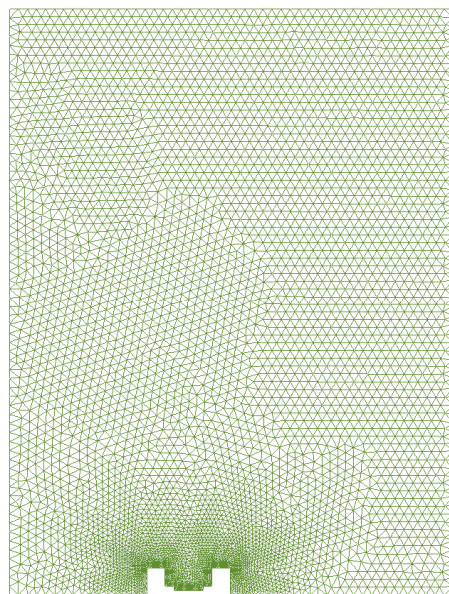


Figura 8.6 – Malha 2-D para o DERE.

O resultado da simulação numérica é mostrado na fig. 8.7. A simulação 3-D e a do caso onde há um termo convectivo, demandam mais tempo que a simulação aqui apresentada, uma vez que um novo código teria que ser desenvolvido, por isso essa simulação será objeto de estudo futuro. Dessa forma, nos ensaios de convecção pura será considerada a solução analítica (Eq. 4.16).

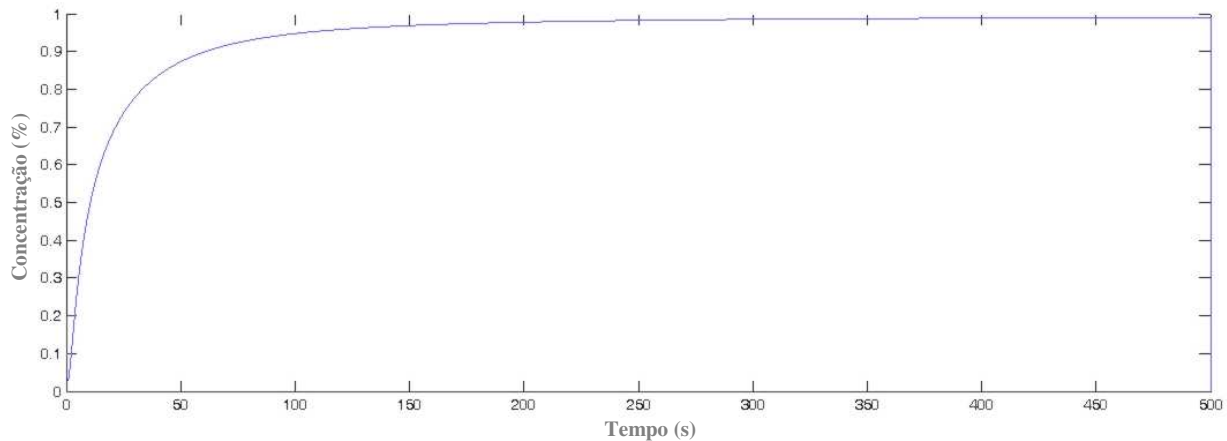


Figura 8.7 – Resultado da simulação numérica 2-D da Difusão Pura, para um nó localizado no fundo da câmara menor, com a concentração inicial igual a 1%.

Comparando o resultado da simulação numérica 2-D com a solução analítica (fig. 4.3), observa-se que são próximas. Além do degrau, o resultado da simulação também foi usado como estímulo ao transdutor no cálculo da sua função de transferência.

8.4 ENSAIOS COM O DERE

Os efeitos que as grandezas de influência (temperatura, a pressão e a luminosidade) poderiam ter sobre o desempenho do transdutor foram avaliados de acordo com o procedimento de calibração descrito no item 6.3.1. Outra questão analisada é o efeito do ventilador, já que a velocidade do escoamento causa mudanças no movimento mássico. No caso da calibração estática, o ventilador tem a função de manter a mistura homogênea, diferentemente da calibração dinâmica, onde é usado para introduzir o termo convectivo tornando a equação da convecção pura válida (Eq. 4.16).

8.4.1 DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO CONCENTRAÇÃO X TENSÃO

O transdutor possui uma saída analógica de tensão que é proporcional à concentração, e para determinar a equação que faz essa conversão foi realizado um ensaio onde a aquisição era feita com o osciloscópio e com o programa fornecido pelo fabricante dos transdutores, o qual faz a aquisição utilizando a saída serial do kit Evaluation ligada a um PC.

A aquisição pelo computador foi feita com uma frequência de $0,5\text{ Hz}$ (1 ponto a cada 2 s) e a aquisição pelo osciloscópio foi feita com frequência de 2 Hz (2 pontos por segundo). Após o ajuste dos pontos, foi feito um ajuste de curvas (fig. 8.8 e 8.9).

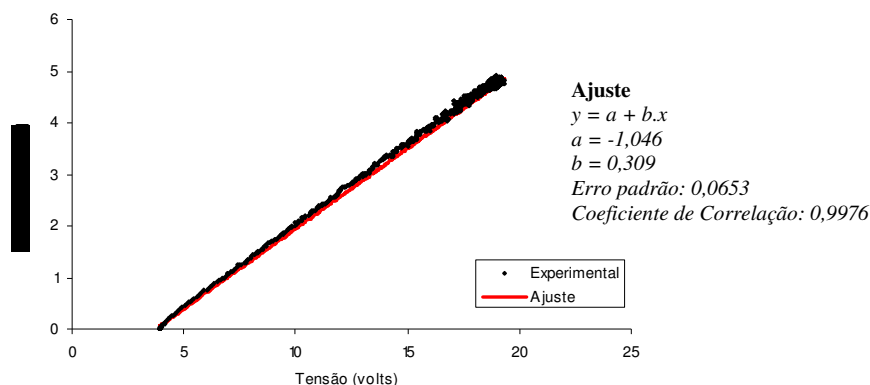


Figura 8.8 – Ajuste de curva para o transdutor instalado na câmara maior.

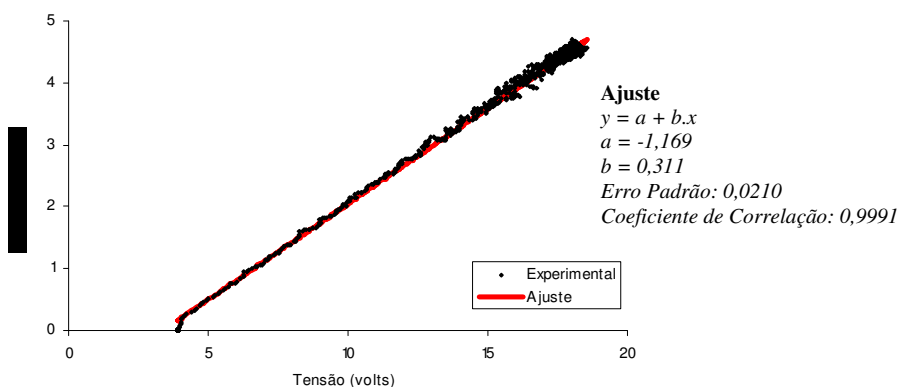


Figura 8.9 – Ajuste de curva para o transdutor instalado na câmara menor.

8.4.2 CALIBRAÇÃO ESTÁTICA

Para a realização da calibração estática o DERE, foi alimentado com um gás padrão com 5% de concentração de CO_2 , conforme laudo fornecido pela fabricante do gás (Anexo III). Para estimar o tempo que o gás preencheria completamente o DERE, foi utilizado o modelo matemático do sistema montado para alimentar o DERE, mostrado na fig. 8.10.

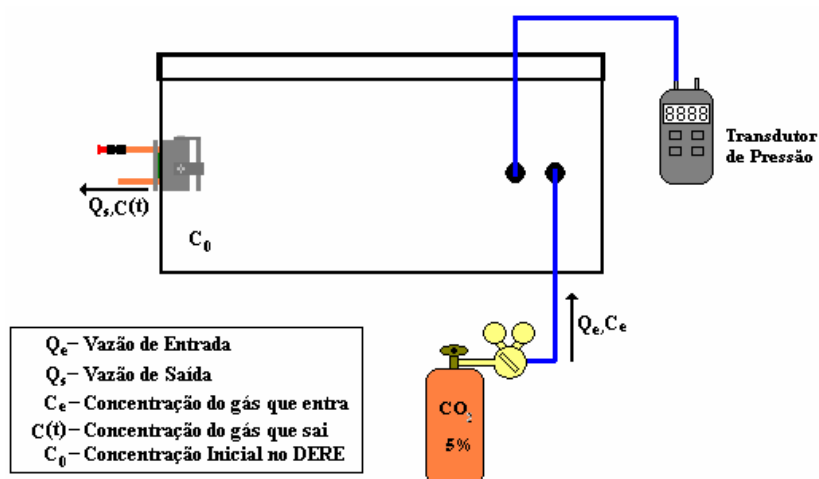


Figura 8.10 – Sistema para o preenchimento do DERE com o gás padrão.

Utilizando as vazões e as concentrações mostradas na fig. 8.10, a equação diferencial que descreve a variação temporal da concentração no interior do DERE diz que: a taxa de aumento da concentração é igual à taxa de gás que entra menos a taxa que sai.

$$\frac{dC}{dt} = taxa_{entrando} - taxa_{saindo} = \frac{C_e \cdot Q_e}{V_{DERE}} - \frac{C(t) \cdot Q_s}{V_{DERE}} \quad \text{Eq. 8.1}$$

onde,

$V_{DERE} = V$, que é o volume do DERE.

Em regime permanente, segundo lei da conservação de massas, para o caso mostrado na fig. 8.10, a vazão que entra é a mesma que sai, dessa forma $Q_s = Q_e = Q$. No tempo $t = 0$ a concentração dentro do DERE é igual à C_0 (concentração do CO_2 no ar atmosférico). Utilizando essas considerações a solução da Eq. 8.1 é:

$$C(t) = C_e + (C_0 - C_e) \cdot e^{-\frac{Q \cdot t}{V}} \quad \text{Eq. 8.2}$$

Na Eq. 8.2 colocando $C_e - C_0$ em evidência chega-se a equação que descreve a variação da concentração no interior do DERE.

$$C(t) = (C_e - C_0) \cdot \left(1 + \frac{C_0}{C_e - C_0} - e^{-\frac{Q \cdot t}{V}} \right) \quad \text{Eq. 8.3}$$

Analisando a Eq. 8.3 verifica-se que no tempo $t = 0$, $C = C_0$ e que no infinito ($t = \infty$) C tende para C_e , que é a concentração do gás padrão. A vazão de entrada deve ser pequena o suficiente para que haja tempo para a homogeneização da mistura.

Com essa consideração sendo verdadeira e resolvendo a Eq. 8.3 para o $V = 22,4 \text{ l}$ (volume do DERE) e $Q = 1 \text{ l/min}$, verifica-se que o tempo para preenchimento é muito longo e que a quantidade de gás necessária é muito grande. Para reduzir o custo do ensaio, o volume do DERE foi, temporariamente reduzido para 5 litros . Para a calibração estática essa redução não prejudica a medição, pois nesse caso o volume das câmaras não influencia o processo, uma vez que deseja-se que a variação do mensurando seja pequena. Utilizando o volume de 5 litros e a vazão de 1 l/min foi construída a curva teórica da variação da concentração (fig. 8.11).

Na montagem experimental, o volume do DERE foi reduzido e a vazão controlada por um rotâmetro na entrada de gás. O ventilador foi mantido ligado para manter a homogeneidade da mistura. A aquisição do sinal foi feita por um sistema de dados Nicolet Accura durante 5000 s e com 10.000 pontos, ou seja, dois pontos por segundo.

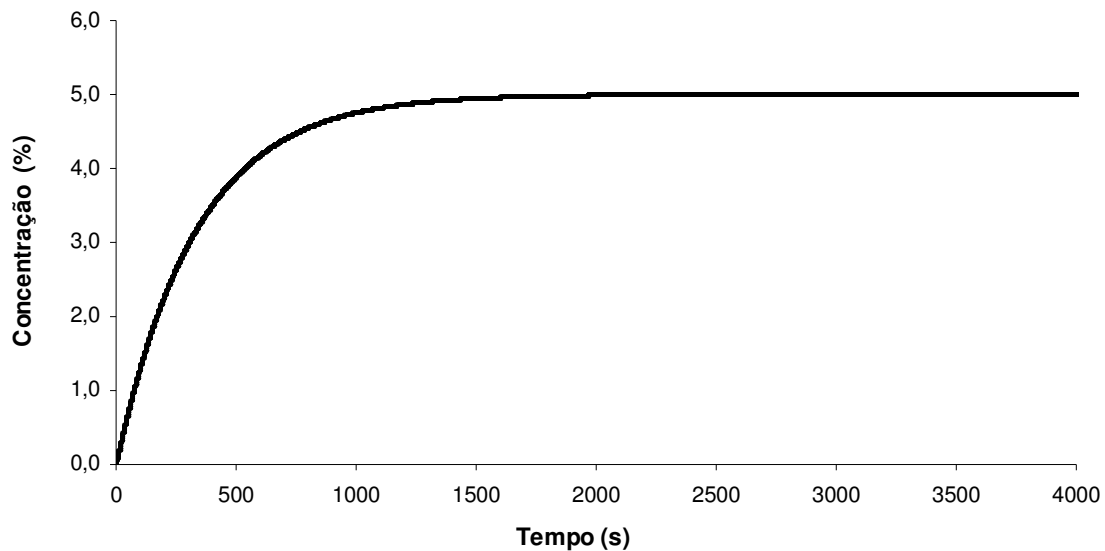


Figura 8.11 – Curva teórica da variação da concentração no interior do DERE com $V = 5 \text{ l}$ e $Q = 1 \text{ l/min}$, na Eq. 8.3.

A resolução do transdutor é de 0,005% de CO_2 , com isso o tempo estimado para a concentração dentro do DERE atingir 4,9991% é de aproximadamente 2860 s ou 47 min, o que significa que com uma vazão de 1 l/min foram gastos em cada ensaio 47 litros de gás.

Essa montagem e os parâmetros de ensaio permitem calibrar estaticamente o transdutor, pois como a vazão de entrada e saída é pequena, o gás é misturado ao ar interno, e a concentração aumenta lentamente, ou seja, é feita a calibração quasi-estática do transdutor. Dessa forma, para determinar qual o valor “verdadeiro” do mensurando, a curva experimental é comparada, ponto a ponto, como a curva teórica (fig.8.11).

Como o rotâmetro foi calibrado com O_2 , os valores lidos devem ser corrigidos por um fator de correção que usa a relação entre os pesos moleculares do oxigênio e do gás padrão que é composto por 5% CO_2 , 20% O_2 e 75% N_2 . Esse fator é usado para dar um passo inicial na determinação do tempo de preenchimento do DERE, pois com o resultado experimental (fig. 8.12) é possível achar a vazão real através de um ajuste de curva.

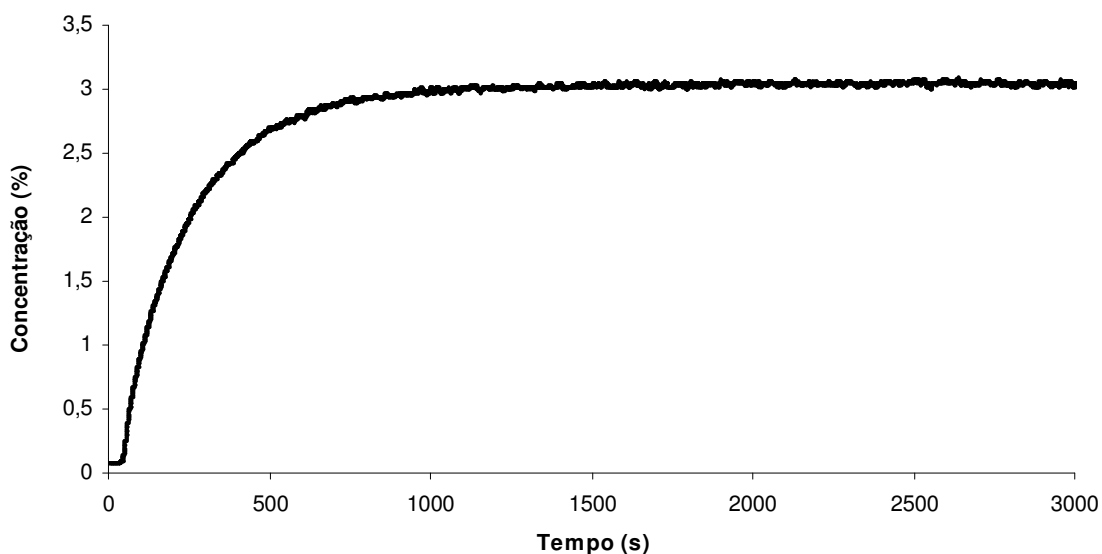


Figura 8.12 – Resultado experimental da variação da concentração dentro do DERE.

Para que não se perdesse o início da subida do sinal, a aquisição foi iniciada um pouco antes que o escoamento fosse iniciado, por isso na fig. 8.12 observa-se um off-set no início do sinal. Desconsiderando esse off-set e realizando um ajuste da curva experimental determina-se qual foi a vazão real. O ajuste da curva tem a seguinte forma:

$$C(t) = a \cdot (b - e^{-c \cdot t}) \quad \text{Eq. 8.4}$$

A fig. 8.13 mostra a curva experimental e o ajuste.

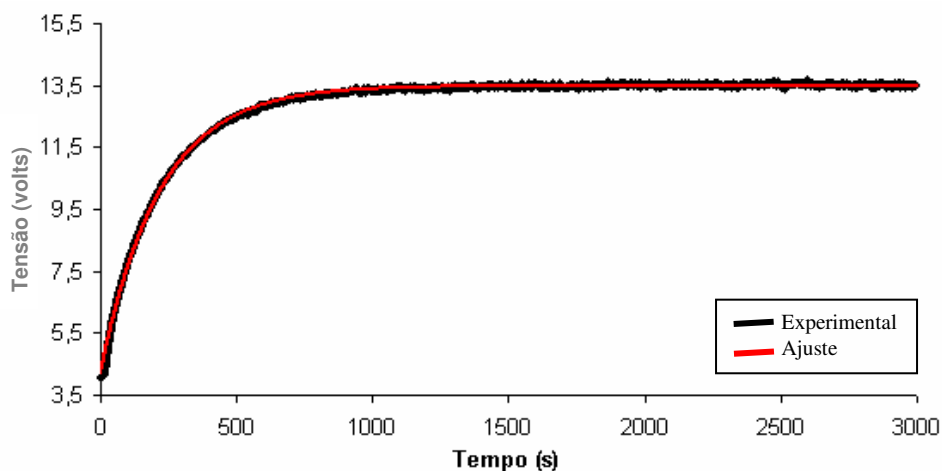


Figura 8.13 – Pontos experimentais e a curva de ajuste.

Comparando as Eq. 8.4 e 8.3, observa-se que a , b e c são iguais a:

$$a = (C_e - C_0) ; b = 1 + \frac{C_0}{C_e - C_0} ; c = \frac{Q}{V} \quad \text{Eq. 8.5}$$

Como os valores de C_e , C_0 e V são conhecidos pode-se determinar o valor do vazão e nesse caso o erro a ser considerado é o erro do ajuste de curva. Pelo ajuste os valores das constantes são: $a = 9,280$, $b = 1,453$ e $c = 0,004$, o coeficiente de correlação é igual à 0,9990 e o erro padrão à 0,0708. Com isso a vazão real foi de 1,49 l/min.

Da fig. 8.12 observa-se que a resposta do transdutor estabilizou aproximadamente em 3%, mesmo o gás padrão tendo 5% de CO_2 . Como foi observado no capítulo 7, fig. 7.6, a pressão influencia no desempenho do transdutor. Analisando as condições experimentais, as características do transdutor e a incerteza do gás, observou-se que essa diferença no desempenho é devido à diferença entre as pressões de calibração e de ensaio, uma vez que o transdutor foi calibrado com uma pressão atmosférica de 101 kPa e nos ensaios realizados no LMD-UnB a pressão atmosférica é de 89 kPa.

Devido o efeito provocado pela pressão foi necessário re-configurar os parâmetros do transdutor e refazer o ensaio. A fig. 8.14 mostra a curva experimental obtida após a re-configuração do transdutor junto com a curva teórica construída a partir do valor real da vazão.

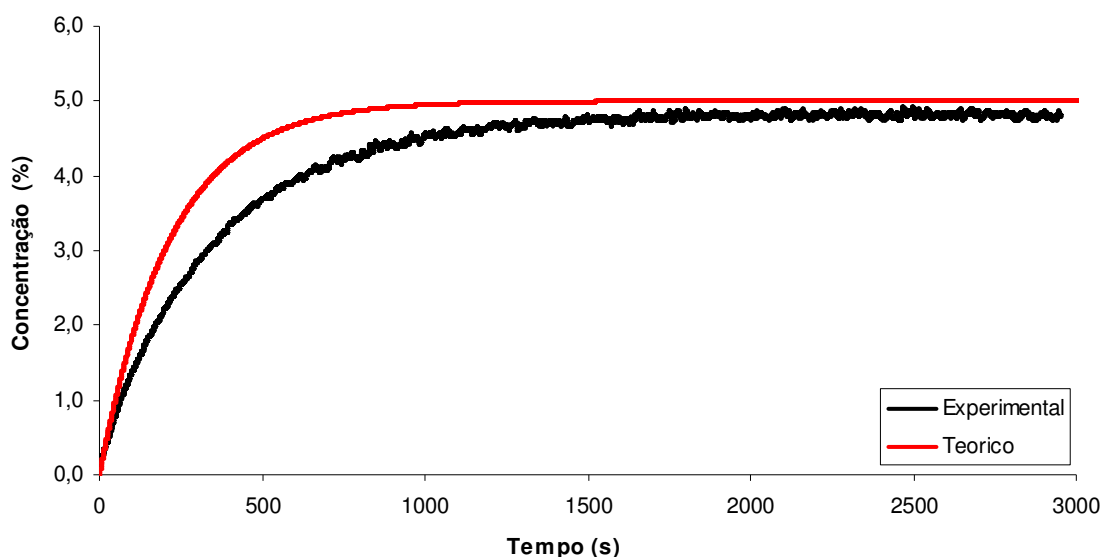


Figura 8.14 – Curvas experimental e teórica (calculada usando a Eq. 8.3 e com a vazão de 1,53 l/min).

A diferença entre as curvas experimental e teórica, observada na fig. 8.14 é devida ao fator de amortecimento do transdutor. E como o transdutor teve que ser re-configurado seriam necessários outros ajustes, por exemplo, a sensibilidade e o zero do transdutor, uma vez que esse apresenta, por mês, uma deriva do zero de 0,05 % em volume de CO₂. Mas com a fig. 8.14 já é possível estimar o erro do transdutor comparando a curva teórica e a experimental.

8.5 GRANDEZAS DE INFLUÊNCIA

Para avaliar as grandezas de influência usou-se a técnica descrita no item 6.3.1. As variáveis testadas foram: pressão e luminosidade, pois a temperatura já é compensada eletronicamente pelo transdutor. Para uma avaliação mais completa a umidade do ar deveria também ser testada, mas não foi possível fazer uma instrumentação adequada. Nas seções anteriores já foi observado que a pressão influencia no desempenho do transdutor, nessa seção o efeito da pressão é testado seguindo a metodologia proposta de forma a quantificar esse efeito.

Nos testes interferentes a concentração foi mantida constante em zero enquanto uma variável era variada e as outras eram mantidas constantes. Os testes modificadores foram feitos da mesma forma que os interferentes, com exceção da concentração que foi mantida constante no meio da escala. Em todos os ensaios, após o ajuste da variável ambiental, a aquisição do sinal do transdutor foi feita com um tempo de 20 s, com 10000 pontos e valor considerado foi a média desses valores. Para cada configuração de valor do mensurando e da variável ambiental foram realizados dois ensaios

8.5.1 PRESSÃO

A fig. 7.6 mostra que a pressão influencia no funcionamento do transdutor, daí surge a necessidade de avaliar o efeito da pressão sobre o transdutor, através de testes que verifiquem se a pressão é uma entrada

interferente e/ou modificadora. Como os ensaios realizados com o DOR 10 na pressão atmosférica de 101 kPa indicaram a pressão como uma entrada modificadora, os testes com o DERE foram realizados de forma a confirmar e avaliar esse efeito, já que a pressão atmosférica local é de 89 kPa.

Segundo a rotina descrita no item 6.3.1 o primeiro teste a ser realizado é o interferente. Como o transdutor de CO₂ em teste é usado para medições ambientais, onde a variação de pressão é pequena, o intervalo de variação da pressão foi definido entre: 89 kPa (pressão atmosférica local) a 106 kPa com incrementos de 3 kPa). A tab. 8.2 e a fig. 8.15 mostram o resultado do teste interferente para a pressão.

Tabela 8.2 – Resultados para verificar se a pressão é uma entrada interferente.

Pressão (kPa)	Temp. (°C)	Luminosidade (lux)	Saída do Transdutor (volts)	Variação (%)
89	20,04	320	3,9698	-----
91	19,91	318	3,9681	-0,04
94	20,00	320	3,9677	-0,05
97	20,00	320	3,9678	-0,05
100	20,30	320	3,9676	-0,05
103	20,30	320	3,9583	-0,30
106	20,30	320	3,9647	-0,13

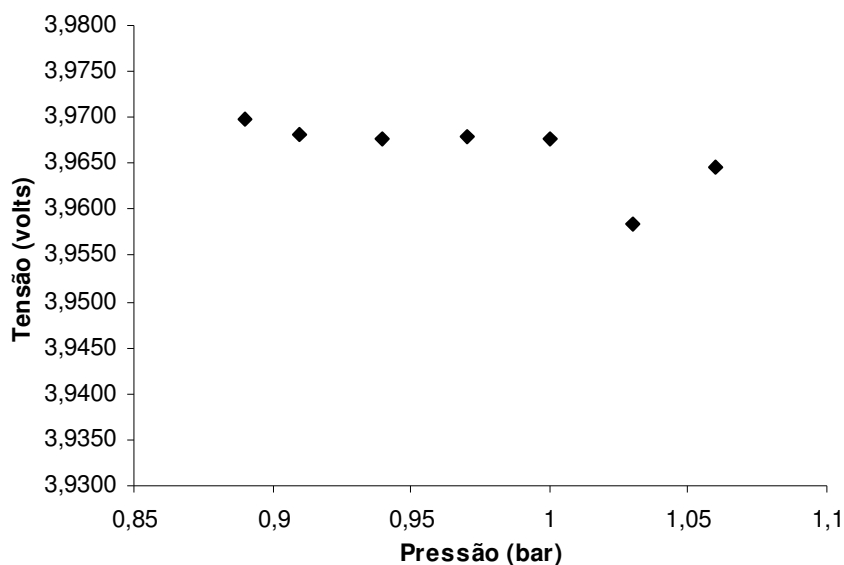


Figura 8.15 – Variação no sinal do transdutor da câmara maior.

Analisando a fig. 8.15 observa-se que a variação do sinal do transdutor é pouco representativa. Da tab. 8.2 verifica-se que a mudança provocada no sinal é da ordem de centésimos de volts, o que não altera o desempenho do transdutor de forma significativa, conforme mostra a última coluna da tabela.

Seguindo a rotina descrita na seção 6.3.1 para o teste modificador, o transdutor apresentou um comportamento atípico e a eletrônica do transdutor bloqueou a aquisição. Entretanto, como o efeito da pressão já havia sido notado nos ensaios com o DOR 10, pode-se calcular o valor de K_m pela Eq. 6.8. Para isto, considera-se a variação da pressão como sendo a diferença entre as pressões atmosféricas locais, com isso o valor de K_m é de $0,0018 \text{ kPa}^{-1}$.

Mas para determinar o efeito da pressão e corrigir os ensaios já realizados foi estabelecida uma relação entre as curvas experimentais mostradas nas fig. 8.12 (antes da re-configuração do transdutor) e 8.14 (após da re-configuração do transdutor).

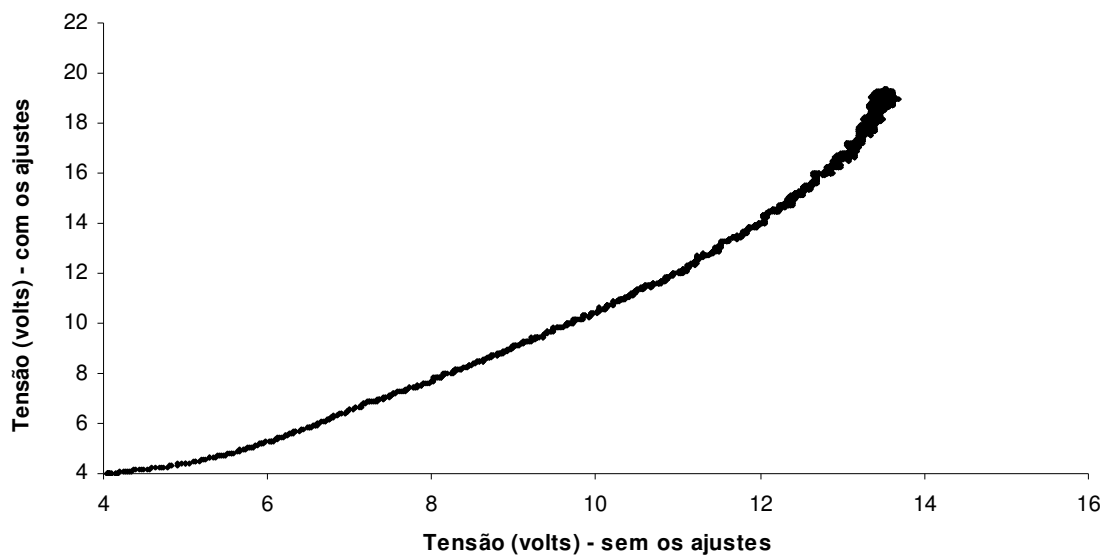


Figura 8.16 – Relação entre as curvas experimentais sem ajuste (pressão de ensaio igual à 101 kPa) e com ajuste (pressão de ensaio igual à 89 kPa).

Como o transdutor fornece uma saída analógica em volts, a correção foi feita nessa escala, que varia de 4 a 20 volts, por um polinômio de grau quatro (Eq. 8.6), e todos os ensaios que já tinham sido realizados antes da re-configuração do transdutor foram corrigidos.

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3 + e \cdot x^4 \quad \text{Eq. 8.6}$$

onde,

$$a = 18,483;$$

$$b = -9,203;$$

$$c = 1,959;$$

$$d = -0,164;$$

$$e = 0,005.$$

Coefficiente de correlação = 0.996

8.5.2 LUMINOSIDADE

Em transdutores IR, a medição feita pelo fotodetector precisa de momentos claros e escuros, que são gerados pela fonte luz pulsada de IR. Caso o ambiente de medição seja muito claro, provavelmente, o fotodetector perderia sensibilidade, pois o momento escuro poderia não ser o ideal. Daí surge a necessidade de testar qual a influência da luminosidade sobre o desempenho do transdutor.

Como o dispositivo de calibração foi construído em acrílico, foi possível analisar se a intensidade da luz influenciaria a medição. Para isso foi utilizado um medidor de intensidade luminosa fabricado pela BEHA e a luminosidade foi variada de 0 lux e 320 lux. A tab. 8.3 e a fig. 8.17 mostra os resultados para o teste interferente.

Tabela 8.3 – Resultados para verificar se a luminosidade é uma entrada interferente.

Luminosidade (lux)	Temp. (°C)	Pressão (kPa)	Saída do Transdutor (volts)	Variação (%)
0	20,16	89	3,9512	-----
15	20,14	89	3,9511	-0,002
64	20,11	89	3,9516	-0,01
96	20,06	89	3,9517	-0,01
130	20,01	89	3,9524	-0,03
179	20,01	89	3,9524	-0,03
251	20,04	89	3,9524	-0,03
264	20,04	89	3,9527	-0,03
317	20,06	89	3,9535	-0,06

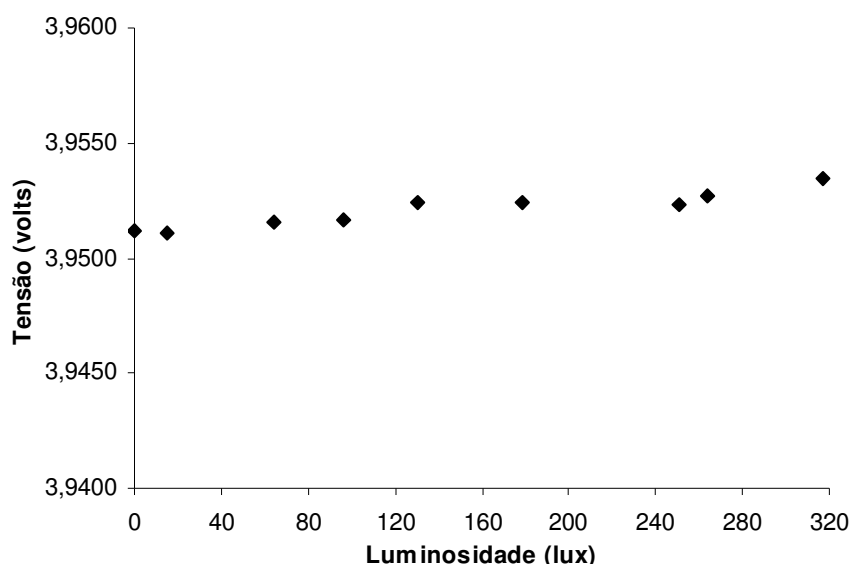


Figura 8.17 – Variação no sinal do transdutor com a luminosidade.

Analisando a tab. 8.3, observa-se que a variação na saída do sinal é muito pequena da ordem de milésimos de volts. Com isso pode-se concluir que a luminosidade não é uma entrada interferente para esse transdutor, onde todos os componentes ficam encapsulados dentro da cavidade ótica, diminuindo o efeito que a luminosidade teria.

No teste modificador, onde a concentração é mantida constante no meio da faixa nominal e a luminosidade é variada, foram realizados ensaios que são mostrados na tab. 8.4 e na fig. 8.18.

Tabela 8.4 – Resultados para verificar se a luminosidade é uma entrada modificadora.

Luminosidade (lux)	Temp. (°C)	Pressão (kPa)	Câmara Maior (volts)	Varição (%)
0	20,13	89	10,9447	-----
6	20,10	89	10,9574	-0,11
150	20,15	89	10,9589	-0,13
220	20,10	89	10,9639	-0,17
280	20,7	89	10,9664	-0,20
350	20,16	89	10,9462	-0,01
478	20,05	89	10,9673	-0,20

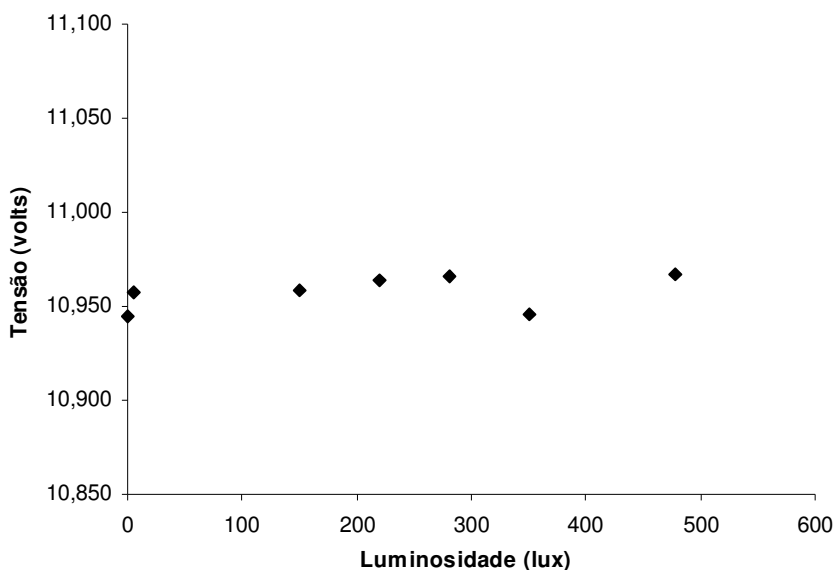


Figura 8.18 – Variação no sinal do transdutor com a luminosidade.

Da tab. 8.4 e da fig. 8.18 observa-se que a luminosidade também não é uma entrada modificadora, já que a variação da saída do sinal não é significativa.

8.6 CALIBRAÇÃO DINÂMICA

Para avaliar o desempenho dinâmico do sistema foram realizados testes com o ventilador ligado e desligado, pois como já foi visto o ventilador tem a função de homogeneizar a concentração do CO₂ na câmara maior e de introduzir o termo convectivo no processo de difusão mássica de forma a tornar válida a eq. 4.16. Inicialmente foram feitos testes com o ventilador em diferentes posições e com a mesma velocidade no interior da câmara maior.

Como esse transdutor tem uma limitação operacional de sensibilidade a escoamentos diretos e fortes (vazões maiores que 1 l/min, afetam a operação do transdutor), portanto para superar essa dificuldade foi necessário estabelecer a melhor posição para que o desempenho do transdutor não fosse prejudicado. As fig. 8.19 a 8.22, mostram os resultados e as legendas indicam a posição do ventilador. Todos os ensaios foram realizados com a concentração na câmara maior igual a 1%.

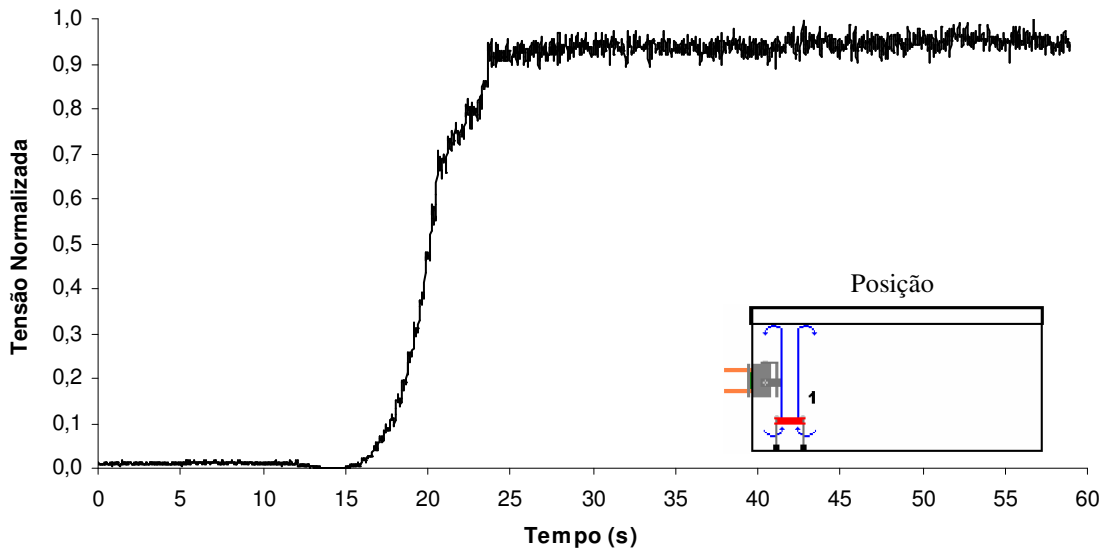


Figura 8.19 – DERE, concentração de 1%, Posição 1.

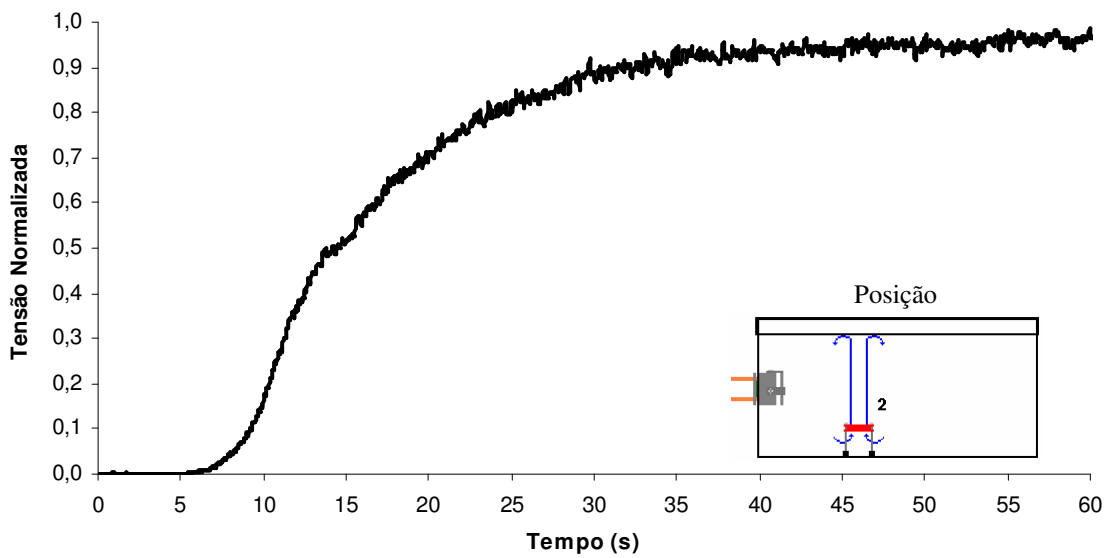


Figura 8.20 – DERE, concentração de 1%, Posição 2.

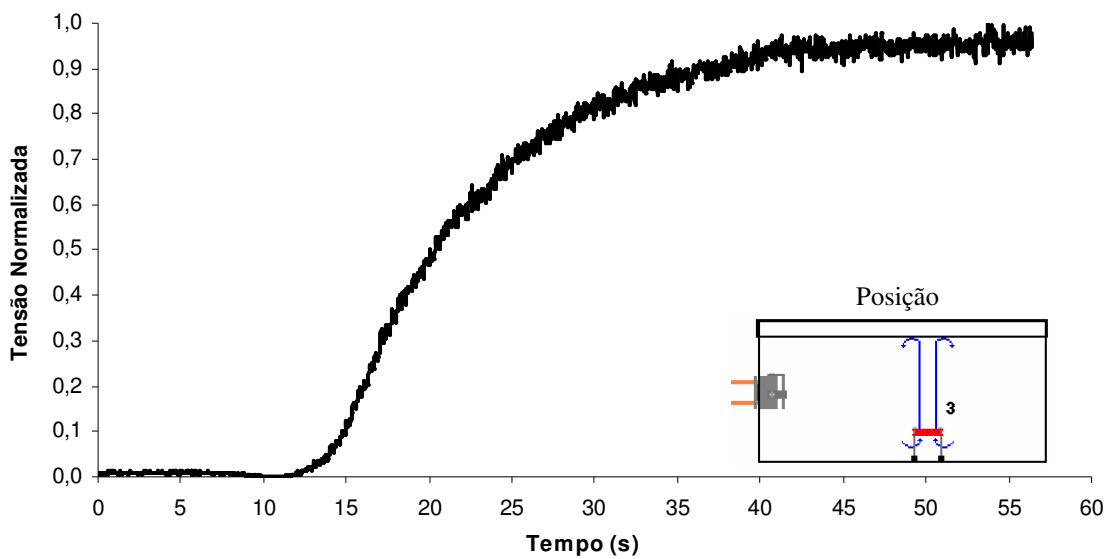


Figura 8.21 – DERE, concentração de 1%, Posição 3.

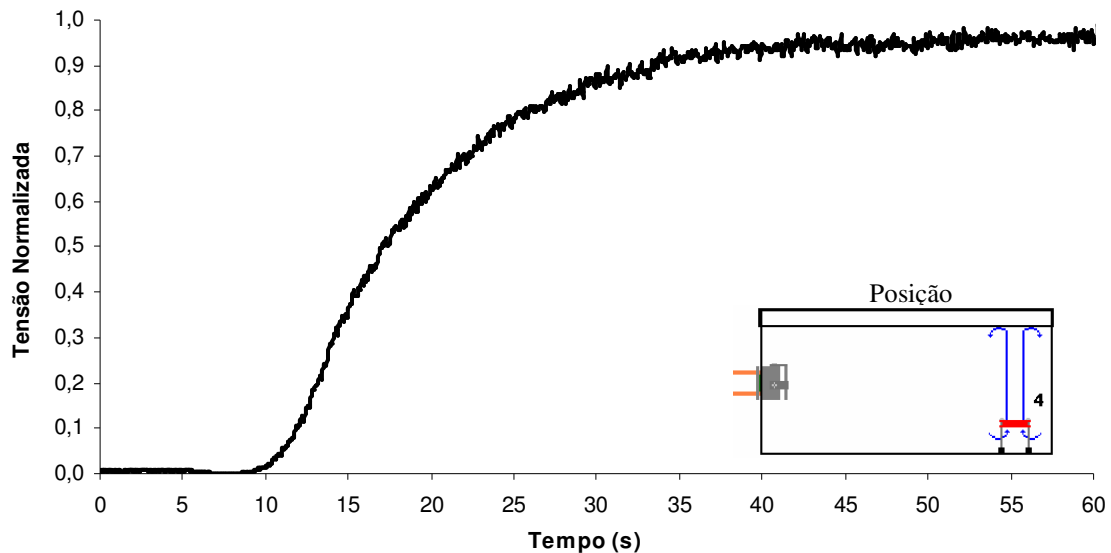


Figura 8.22 – DERE, concentração de 1%, Posição 4.

Tabela 8.5 – Tempos de Subida para o transdutor da câmara menor, com o ventilador em várias posições.

Distância	Tempo de Subida (s)
1	9,8
2	19,4
3	20,5
4	20,0

Foram realizados ensaios em posições mais próximas à câmara menor, inclusive com o ventilador insuflando diretamente para dentro da câmara, mas verificou-se que nesses casos a limitação eletrônica do transdutor bloqueava a aquisição. Com os ensaios em diferentes posições foi possível determinar até que ponto o escoamento induzido pelo ventilador não bloqueava o transdutor e a partir de qual ponto a operação do ventilador apenas manteria a homogeneidade da mistura, isto é, não influenciando no movimento mássico para dentro da câmara menor. Durante esses ensaios constatou-se que a eletrônica do transdutor é influenciada não só pela velocidade, mas também pela estrutura do escoamento, assim após definir o melhor posicionamento do ventilador foram feitos ensaios com diferentes velocidades de rotação.

Das fig. 8.19 a 8.22 e da tab. 8.5, observa-se que na medida em que o ventilador é afastado da câmara menor o tempo de subida aumenta, pois a influência do termo convectivo na difusão mássica diminui. Observa-se que a partir da posição 2, a variação no tempo de subida é pequena, com isso pode-se dizer que a partir desse ponto o ventilador atua somente como um homogeneizador da mistura. Com base nessas observações, para os ensaios seguintes o ventilador foi fixado na posição 1. Com a posição do ventilador determinada fez-se ensaios com quatro velocidades de rotação diferentes, obtidas pela modificação da tensão de alimentação do ventilador.

Além da mudança de velocidade do ventilador outra técnica usada para melhorar o degrau foi a realização de um vácuo (aproximadamente 55 kPa) na câmara menor antes que o sistema de abertura fosse acionado. Dessa forma, quando as câmaras eram colocadas em comunicação, a mistura que está na câmara maior preenchia toda a câmara menor, com isso voltando ao modelo matemático do processo. Foi considerado que o vácuo contribui para aumentar o termo convectivo.

Para cada velocidade foram realizados ensaios o ventilador desligado, ligado, somente com vácuo ou uma combinação de ventilador com vácuo. A fig. 8.23 mostra a média de quatro ensaios para cada montagem experimental e para tensão de alimentação no ventilador igual a **10 volts**.

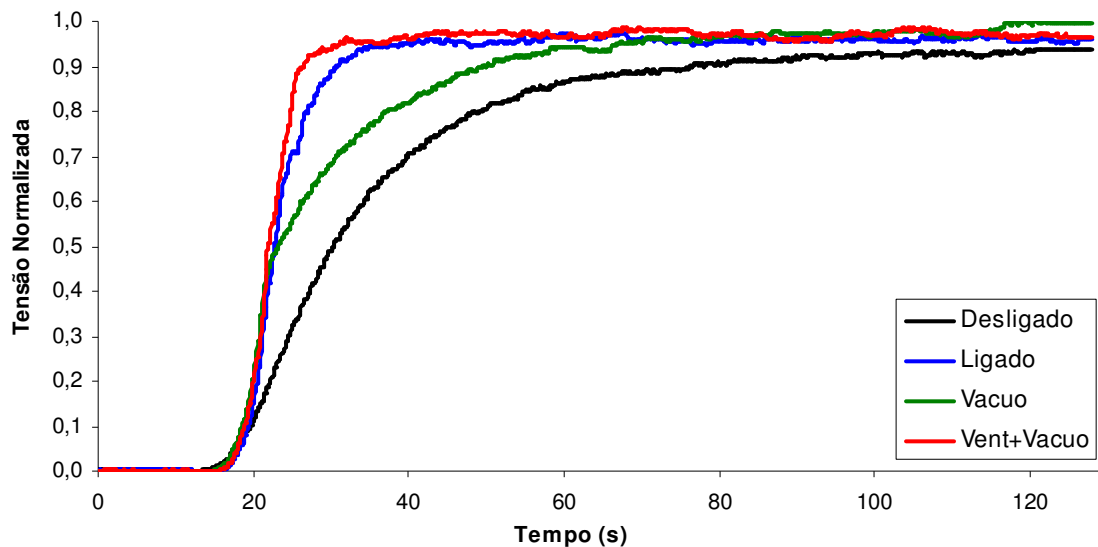


Figura 8.23 – Tensão no ventilador igual a 10 volts.

A fig. 8.24 mostra a média de quatro ensaios para cada montagem experimental e para tensão de alimentação do ventilador igual a **12 volts**.

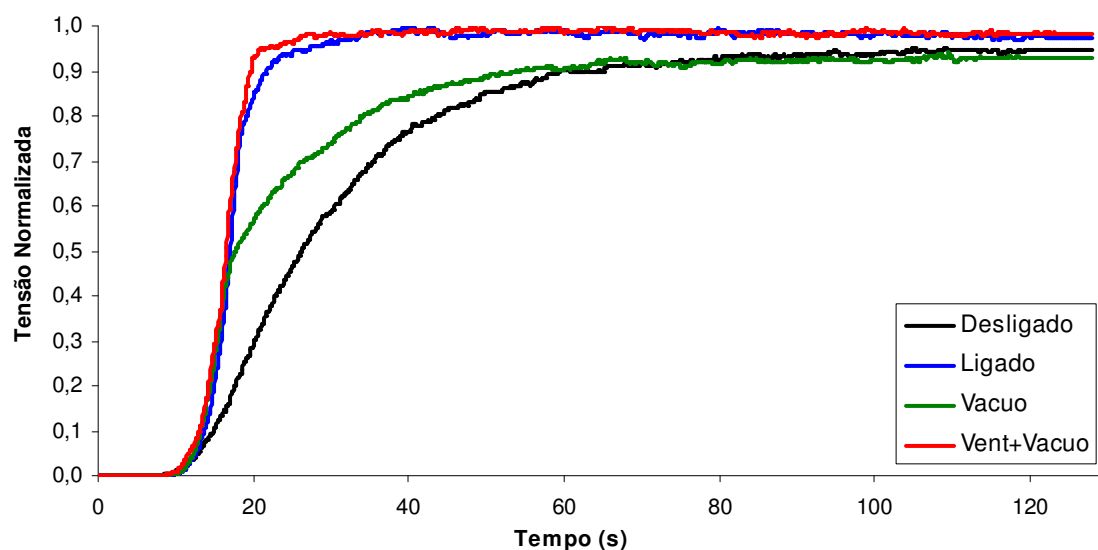


Figura 8.24 – Tensão no ventilador igual a 12 volts.

A fig. 8.25 mostra a média de quatro ensaios para cada montagem experimental e para tensão de alimentação do ventilador igual a **13 volts**.

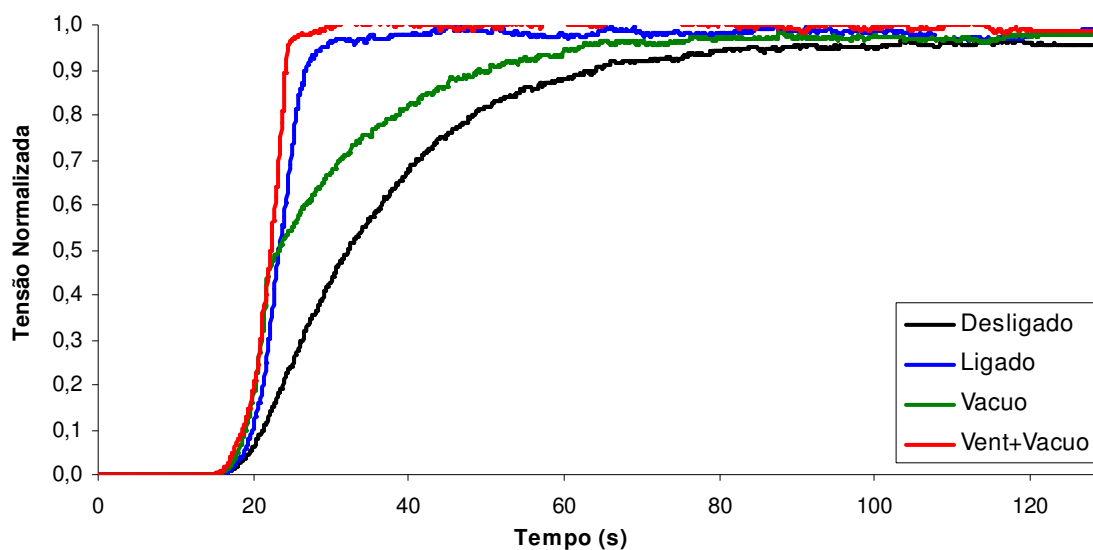


Figura 8.25 – Tensão no ventilador igual a 13 volts.

A fig. 8.26 mostra a média de quatro ensaios para cada montagem experimental e para tensão de alimentação do ventilador igual a **15 volts**.

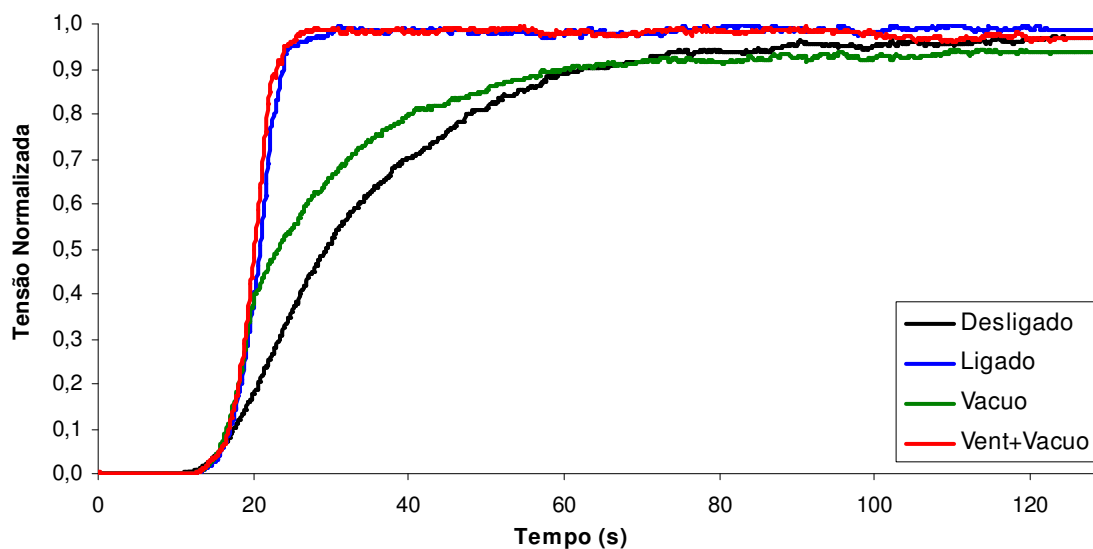


Figura 8.26 – Tensão no ventilador igual a 15 volts.

Tabela 8.6 – Tempos de Subida para cada velocidade com diferentes montagens, com o ventilado na posição 1.

Montagem	Tempo de Subida (s)			
	Tensão no Ventilador (volts)			
	10	12	13	15
Vent. Ligado	11.0	8.9	8.7	9.5
Vent. Desligado	32.5	33.2	31.7	36.9
Vácuo	25.0	22.3	23.5	25.7
Vent. e Vácuo	8.7	8.6	8.0	8.6

Para que o ponto de início da subida fosse o mesmo para os ensaios, foi regulado no sistema de aquisição um atraso, que é observado nas fig. 8.23 a 8.26, mas nos cálculos da função de transferência essa parte do sinal é desprezada.

Nos ensaios com o ventilador desligado, esse era desligado antes que o sistema de abertura fosse acionado, dessa forma poderia haver alguma influência do escoamento sobre o processo. Analisando as curvas para esses ensaios e a tab. 8.6 observa-se que os tempos de subida ficaram próximos, assim pode-se dizer que o ventilador, nesse caso, só teve a função de manter a mistura homogênea.

Para a caracterização dinâmica de um transdutor é necessário submetê-lo a um degrau de concentração, para isso foram usadas duas técnicas para aumentar a velocidade média da mistura e tornar válida a Eq. 4.16. Na primeira, o ventilador permanecia ligado durante toda a aquisição, na segunda analisou-se apenas o efeito do vácuo. Analisando os resultados desses ensaios, observa-se que houve uma significativa melhora no tempo de subida, quando comparados com os ensaios realizados no DAR.

Para avaliar o efeito do vácuo foram realizados ensaios onde utilizou-se somente o vácuo (com o ventilador desligado) e ensaios utilizando o ventilador em conjunto com o vácuo. A diferença de pressão entre as câmaras aumenta a velocidade da mistura quando são colocadas em comunicação. Nos ensaios onde somente utilizou-se o vácuo observa-se que até certo ponto há uma melhora no tempo de subida, entretanto não é suficiente para formar um degrau de concentração.

Dessa forma, a combinação entre o vácuo e velocidade mostrou-se a melhor montagem para a geração de um degrau, observa-se que o uso do vácuo diminuiu o tempo de subida para todas as velocidades. A variação do tempo de subida entre as diferentes velocidades foi 7,3% em média, e o menor tempo foi com a tensão no ventilador igual a 13 volts. Analisando a tab. 8.6 observa-se que até o ensaio com a tensão igual a 13 volts o tempo de subida diminui e depois volta a aumentar. Isso mostra que até esse ponto o ventilador e o vácuo contribuem para melhorar o desempenho do transdutor, isso indica que o limite de resposta do transdutor foi alcançado, ou seja, não importa quão melhor seja o degrau formado, a resposta do transdutor não melhorará. Isso ocorre devido às limitações do princípio de funcionamento e da eletrônica do transdutor.

8.6.1 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DO TRANSDUTOR

Para determinar as características dinâmicas do transdutor utilizou-se a montagem experimental onde o desempenho do transdutor foi melhor, ou seja, no ensaio com o ventilador ligado, vácuo e tensão de alimentação do ventilador igual a 13 volts. A partir do resultado experimental com essa configuração foi calculado o tempo de resposta e a constante tempo, uma vez que o tempo de subida já tinha sido calculado, conforme mostra a tab. 8.6. A fig. 8.27 mostra o resultado experimental e a representação gráfica das características dinâmicas.

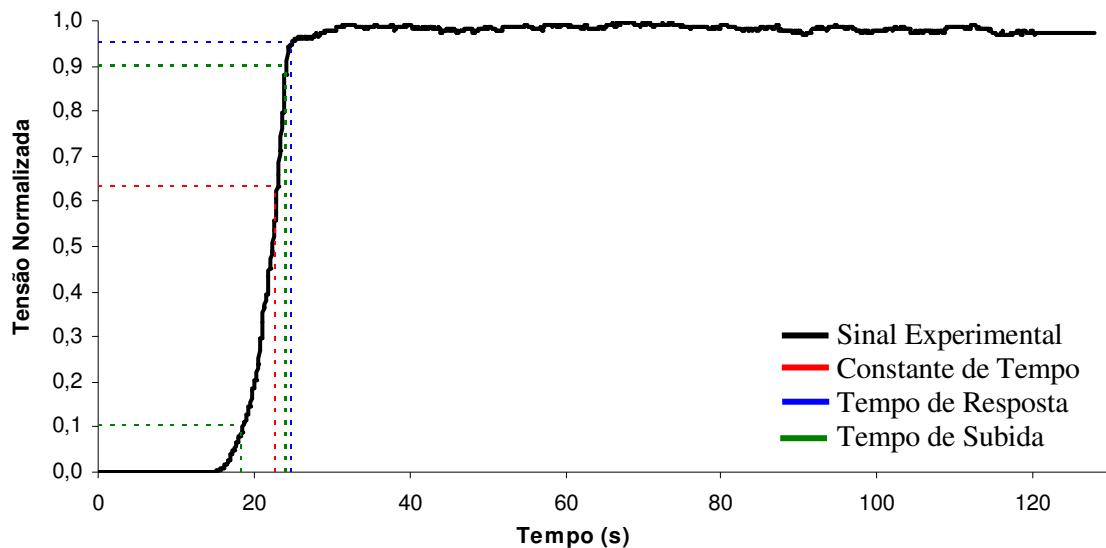


Figura 8.27 – Curva experimental e representação gráfica da constante de tempo e do tempo de resposta.

Função de Transferência

Para calcular a função de transferência foi usado o programa RFreq desenvolvido pelo LMD-UnB (Villa, 2000) e o método utilizado foi o método da derivação. Esse método calcula a função de transferência fazendo a derivação do sinal experimental, pois como esse é a resposta do transdutor a um degrau e a derivada da resposta ao degrau é igual a resposta ao impulso, a função de transferência é a própria resposta ao impulso no domínio da frequência, pois a transformada do impulso é 1. Para passar do domínio do tempo para o domínio da frequência aplica-se a transformada de Fourier à derivada da resposta ao degrau.

Como dito anteriormente, a resposta do transdutor apresenta pontos onde a aquisição foi bloqueada, como isso a derivada nesses pontos é igual a zero, o que dificulta a análise do resultado. Para contornar esse problema foi realizado um ajuste de curva à resposta do transdutor e esse ajuste foi usado no cálculo da função de transferência. A fig. 8.28 mostra a resposta do transdutor e o ajuste.

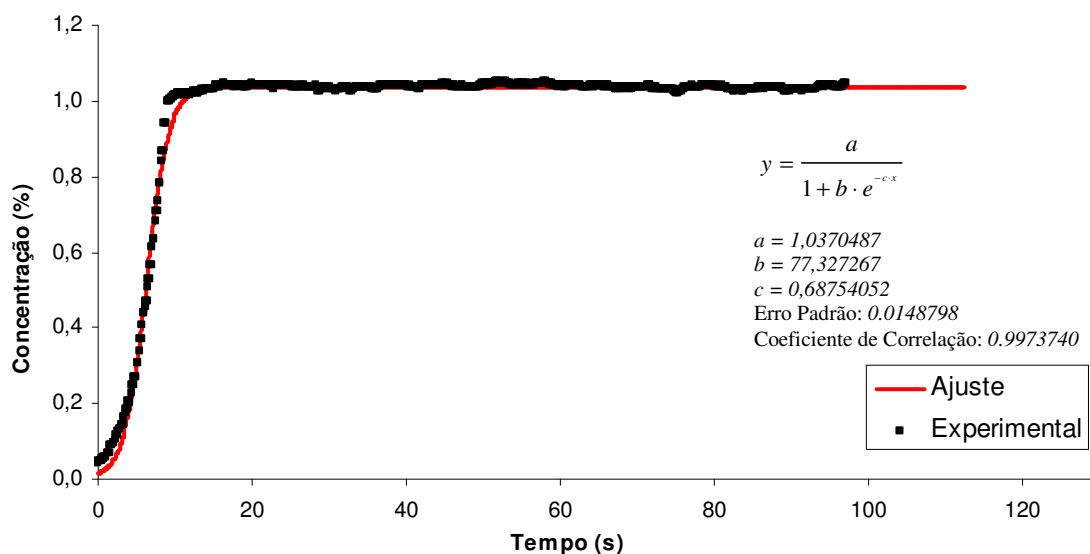


Figura 8.28 – Curva experimental e ajuste.

Foi escolhida uma banda passante de $\pm 5\%$, pelo sinal percebe-se que não há overshoot e que o transdutor é um instrumento de segunda ordem superamortecido. A fig. 8.29 representa a função de transferência calculada usando como estímulo um degrau perfeito.

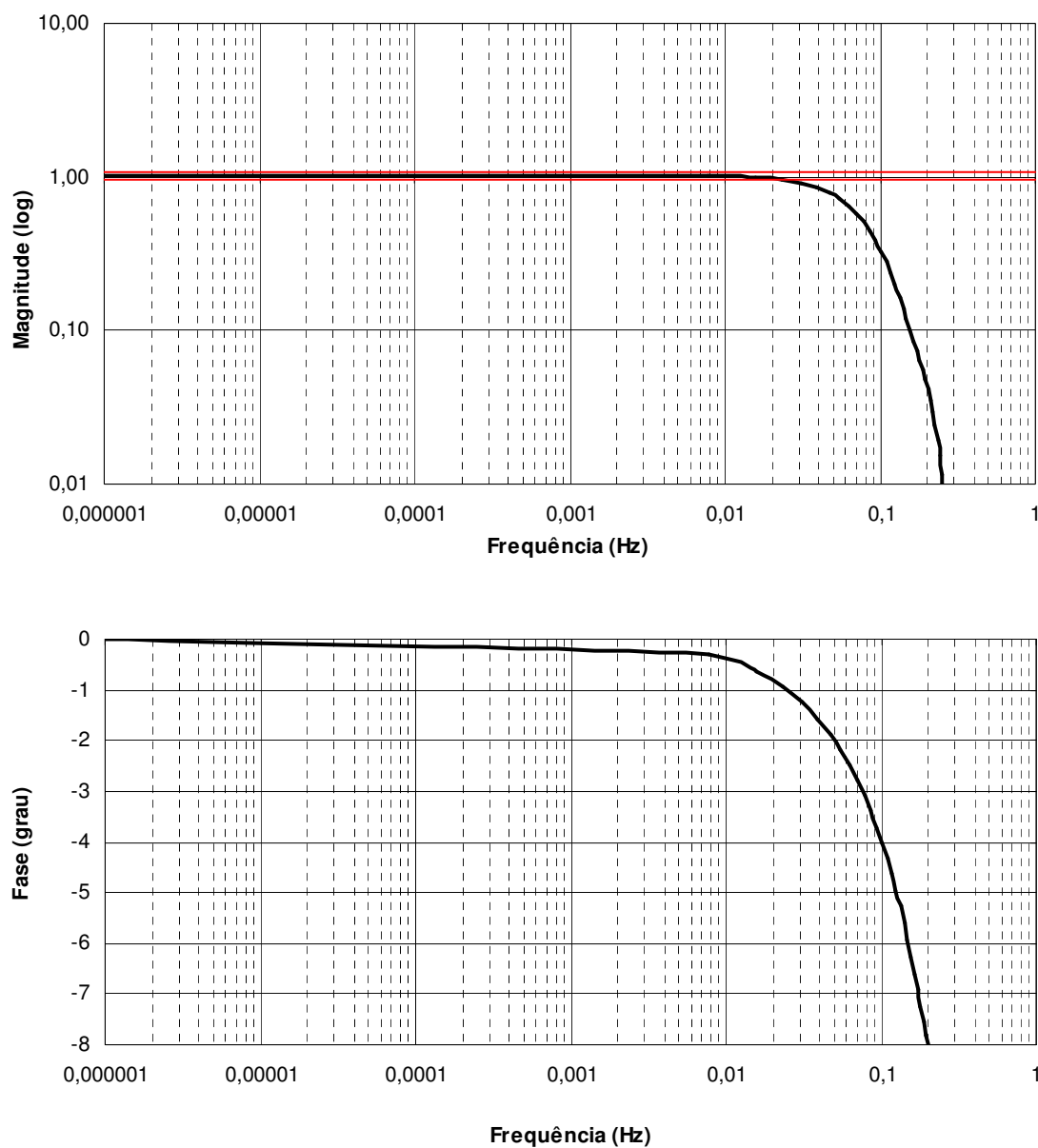


Figura 8.29 – Função de transferência (Magnitude e fase).

Da fig. 8.29 observa-se que para a banda passante escolhida o transdutor terá um comportamento linear até a frequência de $0,02\text{ Hz}$, isso significa que em situações onde a taxa de amostragem do mensurando seja maior que $0,02\text{ Hz}$, o transdutor apresentará uma resposta amortecida e defasada.

A hipótese apresentada no Capítulo 1, de que a solução teórica do processo físico da difusão mássica pode ser usada como referência para o cálculo da função de transferência, foi confirmada utilizando o programa EDYCAP, desenvolvido pelo LMD da ENSAM – Paris (detalhado no Anexo IV), onde a função de transferência foi calculada inicialmente, utilizando-se como entrada o degrau perfeito e como saída o resultado experimental da resposta do transdutor ao degrau (fig.8.25) e depois utilizando-se a

simulação numérica (fig. 8.7) como entrada e como saída a resposta do transdutor ao processo de difusão pura (fig. 8.25). Como considera-se que o sistema é invariante com o tempo, as funções de transferência calculadas devem dentro da banda passante ser equivalentes. Utilizou-se o programa EDYCAP para fazer essa análise, pois ele utiliza o mesmo método para calcular as funções de transferência que são mostradas nas fig. 8.30 e 8.31.

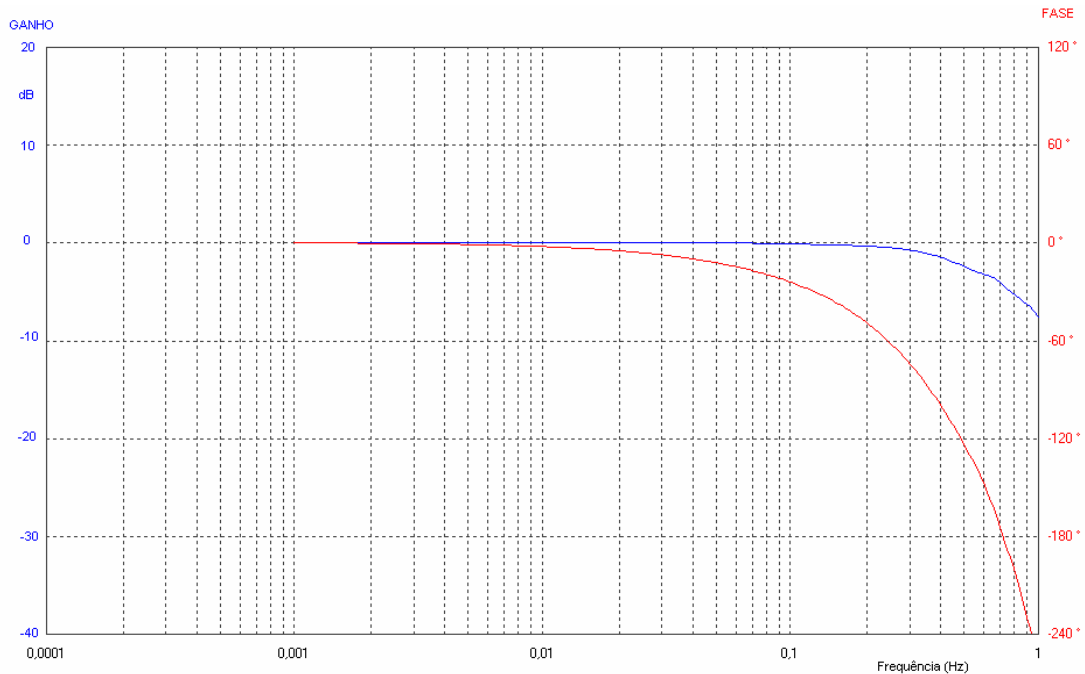


Figura 8.30 – Função de transferência calculada utilizando como entrada o degrau perfeito.

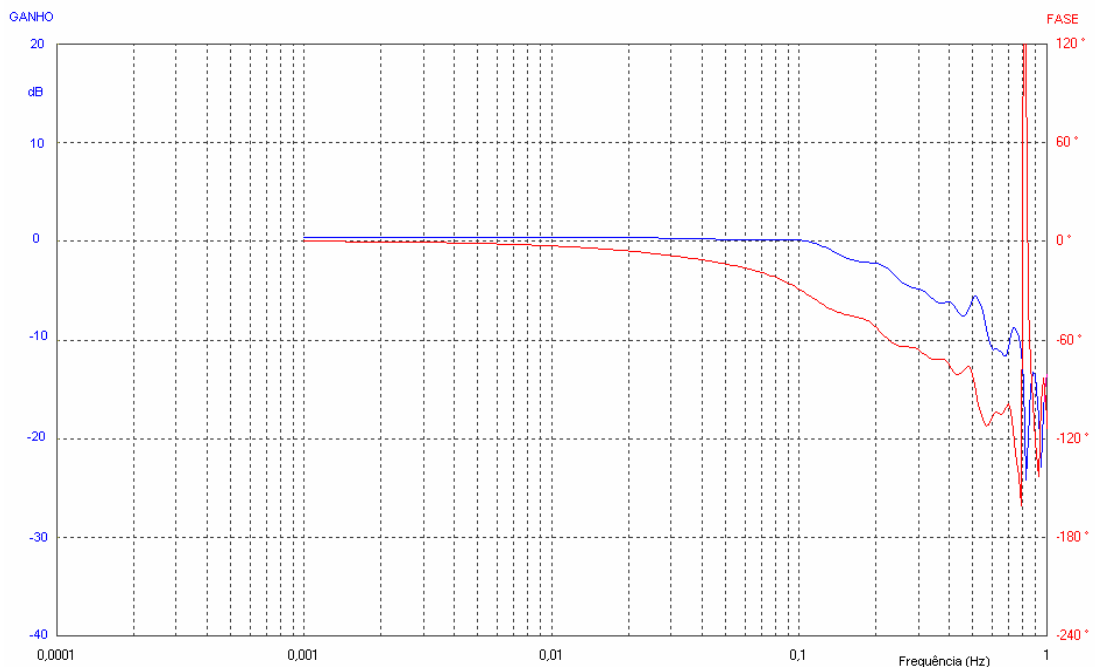


Figura 8.31 – Função de transferência calculada utilizando como entrada a simulação da difusão mássica.

Analisando as fig. 8.30 e 8.31 observa-se que até a frequência de $0,02 \text{ Hz}$, que é até onde o transdutor tem um comportamento linear, as funções de transferência são equivalentes. Isso mostra que o modelamento do processo físico pode ser usado como referência para o cálculo da função de

transferência. Essa análise pode ser usada em casos onde a calibração não seja feita por comparação, uma vez que nesses casos utiliza-se como entrada a resposta de um transdutor padrão submetido ao mesmo estímulo.

9. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

9.1 CONCLUSÕES

A completa caracterização metrológica de um transdutor contempla a avaliação de seu desempenho dinâmico, a determinação de suas propriedades estáticas, bem como sua reação às grandezas de influência. No que diz respeito aos transdutores de CO₂ atmosféricos, a caracterização metrológica está limitada à calibração estática. Partindo da constatação dessa lacuna esse trabalho pretende contribuir para superar essas limitações metrológicas.

Dessa forma, o objetivo dessa dissertação foi formular teoricamente o processo físico de difusão a que é submetido o transdutor, propor uma nova metodologia de calibração e desenvolver o meio adequado para a calibração dinâmica do transdutor que, simultaneamente, permitisse avaliar os efeitos das grandezas de influência. Assim, a partir dessa discussão e da análise dos resultados apresentados nos capítulos anteriores, pode-se concluir que:

1. O meio desenvolvido, denominado Dispositivo de Exposição Rápida à Emissões (DERE), possui as características necessárias para permitir uma completa caracterização metrológica dos transdutores de CO₂. Dessa forma, pode-se afirmar que tanto o dispositivo quanto a metodologia desenvolvida cumprem o objetivo geral proposto no Capítulo 1.
2. A formulação teórica e os resultados analíticos e numéricos dos processos que ocorrem no interior do DERE, são adequados para descrever os processos físicos aos quais o transdutor é submetido. Esses resultados mostrados no Capítulo 4 contemplam dois processos físicos, difusão pura e convecção pura, que estimulam o transdutor para a calibração estática e dinâmica respectivamente.
3. Os resultados das calibrações estática e dinâmica apresentados no Capítulo 8 mostram que a metodologia de calibração proposta é consistente para caracterizar um transdutor de CO₂, uma vez que o DERE é capaz de gerar um degrau de concentração para a calibração dinâmica e permite que o resultado da calibração estática contemple também a influência das variáveis ambientais.
4. Analisando os resultados da calibração dinâmica observa-se que na determinação da função de transferência, quando utiliza-se como estímulo ao transdutor um degrau perfeito ou a solução numérica do processo de difusão pura, as funções de transferência dentro da banda passante são iguais. Isso indica que o sistema é invariante no tempo e que a solução teórica pode ser usada como padrão teórico, o que comprova a hipótese 1 dessa dissertação.
5. O DERE foi desenvolvido com base nas soluções teóricas do processo de difusão e os resultados apresentados no capítulo 8 mostraram que o DERE é adequado tanto para calibração dinâmica como para a estática, o que confirma a hipótese 2 dessa dissertação.

9.2 RECOMENDAÇÕES

Como sugestão de trabalhos futuros sugere-se que, para melhor caracterizar o processo físico no DERE, seja feita uma simulação numérica 3-D com o termo difusivo, de forma a melhorar os ajustes dos componentes do DERE (ventilador, vácuo, etc.) e conseqüentemente aumentar qualidade do degrau de concentração.

Como discutido na dissertação o transdutor utilizado possui limitações eletrônicas que dificultam a realização dos ensaios. Dessa forma sugere-se a construção de um dispositivo que elimine a eletrônica do transdutor. Com esse dispositivo e com o uso de gases padrões, a Eq. 5.3 poderá ser usada diretamente e as constantes “*a*”, “*b*” e “*Span*” poderão ser determinadas levando em consideração a influência não só da temperatura, que já é estimada pelo fabricante, como também da pressão.

Outro ponto fundamental a ser objeto de trabalhos futuros é o cálculo da incerteza associada a todo o sistema de medição, contemplando desde as incertezas do processo até as da aquisição e tratamento, além da elaboração de procedimentos de qualidade, planilhas de cálculos, normas para a realização dos ensaios e laudos de calibração. Também deve ser dado destaque a formalização de um transdutor padrão que será utilizado em calibrações por comparação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BANWELL, C.N. e MCCASH, E.M. – *Fundamentals of molecular Spectroscopy* - London: McGraw-Hill, 4th ed., 1972.
- BARROS, F.C. e BRASIL Jr., A.C.P. – Estudo de problemas de dispersão turbulenta utilizando metodologia estocástico-lagrangeana – NUTAU-Architecture and urbanism: Technologies for XXI Century, 1998.
- BARTHOLOMEU, D.B.; CENAMO, M.C. e PINTO, T.M. – Os Projetos Florestais de Pequena Escala e a COP 10 – CEPEA, São Paulo, Brasil, 2004.
- BENNETT, M. – *Air Pollution Measurement – Measurement Instrumentation Transducers Handbook* – Capítulo 73.2, CRC Press, Estados Unidos, 1999.
- BENTLEY, J.P. – *Principles of Measurement* – 1988.
- BEZERRA, M.O.; PINTO, T.M.; CASARIM, F. M.; BARTHOLOMEU, D.B e CENAMO, M.C. – Rússia Ratifica o Protocolo de Quioto - CEPEA, USP, São Paulo, 2004.
- BNDES e MCT – Efeito Estufa e a Convenção sobre a Mudança do Clima – Brasil, 1999.
- BOÇON, F.T. – Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica – Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 1998.
- BROWN, F. ; MATINELLI, L.A.; THOMAS, W.W.; MOREIRA, M.Z.; FERREIRA, C.A.C. E VICTORIA, R.A. – Uncertainty in the biomass of Amazonian forests: An example from Rondônia, Brazil – *Forest Ecology and Management* 75, pp. 175-189, Inglaterra, 1995.
- CAMPOS, C.P. de – A Conversão das Florestas no Brasil, Mudança de Clima e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto – Tese de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- CARDOSO, A.N.; SAMINÉZ, T.C. e VARGAS, M.A. – Fluxo de Gases-traços de Efeito Estufa na Interface Solo/Atmosfera em Solos de Cerrado – Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 17, Embrapa Cerrados, Brasília, Brasil, 2001.
- CARVALHO, M. A. M. de - Estudo e Aplicação Metrológica do Tubo de Choque para Calibração Dinâmica de Sensores de Pressão – Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 1995.
- CARVALHO Jr., V.N.de – Deposição Atmosférica e Composição Química da Água de Chuva – Revista Tecnologia, v. 25, pp. 61-71, Ceará, Brasil, 2004.
- CDM – Vale do Rosário Bagasse Cogeneration: A GHG Emission Reductions Project Activity in Brazil – ECONERGY Brasil e Cia Açucareira Vale do Rosário, Brasil, 2003.

- CEBDS – Mercado de Carbono – Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- CENAMO, M.C. – Mudanças Climáticas, o Protocolo de Quioto e Mercado de Carbono – CEPEA, São Paulo, Brasil, 2004.
- CHECS – Carbon dioxide optical sensor – Informações do produto, 2006.
- CNI – Novo Ciclo da Cana-Estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e prospecção de novos empreendimentos – Confederação Nacional da Indústria e SEBRAE, Brasil, 2005.
- COPPE – Emissões de Dióxido de Carbono e de Metano pelos Reservatórios Hidroelétricos Brasileiros – Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasil, 2002
- DOEBELIN, E.O. – “Measurement System : Application and Design” – Fourth Edition, Mc Graw-Hill.
- DYNAMENT-AN1 – Application Note AN1 – Inglaterra, 2003.
- DYNAMENT-AN4 – Application Note AN4 – Inglaterra, 2003.
- DYNAMENT – TDS 0003 – Inglaterra, 2005.
- FONTELLE, J.P. – *Méthodes de Quantification des Émissions dans l’Air* – Techniques de l’Ingénieur, G 1 630, França, 2005.
- FRITSCHÉ, E. Q. – “Influência do Gas de Trabalho na Resposta em Frequência do Dispositivo de Abertura Rápida para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão” – Tese de Mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, Brazil, 2002.
- HANSMAN – *Principles of Measurement* – Measurement Instrumentation Transducers Handbook – Capítulo 1, CRC Press, Estados Unidos, 1999.
- HENRIQUES, R.M. – Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica – Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- HOLZINGER, M.; MAIER, J. e SITTE, W. – “Fast CO₂-Selective potentiometric sensor with open reference electrode” – Solid State Ionics, 86-88, pp. 1055-1062, Inglaterra, 1996.
- INCROPERA, F.P. e WITT, D.P. – “Fundamentos de Transferência de Calor e Massa” – LCT, Rio de Janeiro, 1998.
- INMETRO-VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais da Metrologia – Rio de Janeiro, Brasil, 1995.
- IPCC (1995). Climate change 1995: The science of climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change. HOUGHTON, J. T.; MEIRA FILHO, L.G.; CALLANDER, B.A.; HARRIS, N.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. editors. Cambridge: Univ. Press.

- JACOBSON, M.Z. – Fundamentals of Atmospheric Modeling – Cambridge University Press, 2ª Ed., Estados Unidos, 1999.
- JONES, E.P.; WARD, T.V. e ZWICK, H.H. – A Fast Response Atmospheric CO₂ Sensor for Eddy Correlation Flux Measurements – Atmospheric Environment, Vol. 12, pp. 845-851, Grã-Bretanha, 1978.
- KRUPA, S.V. – Global climate change: Processes and products - An overview – Environ Monitor Assess, Vol 46, Nos. 1-2, pp. 73-88, 1997.
- KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; VON RANDOW, C.; ARAU´ JÔ, A. C.; OLIVEIRA, P. J.; CULF, A.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; KABAT, P. e MOORS, E. J. - The Robustness of Eddy Correlation Fluxes for Amazon Rain Forest Conditions - Ecological Applications, 14(4) Supplement, pp. S101–S113, 2004.
- LEÓDIDO, L.M. – Projeto e Construção de um Tubo de Choque Didático – Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.
- LICOR – LI-7500 Product Information – Licor Biosciences, Estados Unidos, 2001.
- LIMA, I.B.T. de – Emissão de Metano por reservatórios hidroelétricos amazônicos através de leis de potência – Tese de Doutorado, USP, São Paulo, Brasil, 2002.
- MAPA (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento) – Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília, Brasil, 2005.
- MARANHÃO NETO, A. A.; ATHAYDE, M.R.; BRASIL Jr., A.C.P. e PIRES, A.A.C. – Air Pollution and Environmental Cost Mapping – Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2002.
- MAY, P.; BOYD, E.; CHANG, M. e VEIGA, F.C. - Incorporando o desenvolvimento sustentável aos projetos de carbono florestal no Brasil e na Bolívia - Estudos Sociedade e Agricultura, vol. 13, no. 1, pp. 5-50, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- MCT e MRe – “Protocolo de Quioto” – Brasil, 1998.
- MERKLE, R. e MAIER J. – Electrochemical Sensor Principles for Redox-Active and Acid-Base Active Gases In Encyclopedia of Sensors, C. A. Grimes, E. C. Dickey, and M. V. Pishko, eds., Vol. 3, American Scientific Publishers, Stevenson Ranch/CA, pages 139–156, USA, 2006.
- MMA – Estudo do potencial da geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil – Convênio: Ministério do Meio Ambiente e FEALQ, Brasília, Brasil, 2004.
- MONCRIEFF, J.B; MASSHEDER, J.M.; BRUIN, H. DE ; ELBERS, J.; FRIBORG, T.; HEUSINKVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, V.; SOEGAARD, H. E VERHOEF, A. – A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide – Journal of Hydrology, 188-189, pp. 589-611, Inglaterra, 1997.

- MONZONI, M. – Mudança Climática-Tomando Posições – Friends of the Earth-Programa Amazônia, São Paulo, Brasil, 2000.
- NOBRE, C.A. – “Amazonian Tropical Forests: Carbon Source or Skin?”, Understanding and Capturing the Multiple values of Tropical Forests, Tropenbos International, pp. 43-48, 2000.
- OLIVEIRA, A.B.S. de – Contribution à l'étalonnage dynamique des capteur de pression Modélisation de l'estimation de l'incertitude associée – Thèse de Doctorale - Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métier, Paris, France, 2004.
- OLIVEIRA, L.B. – Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais no Brasil – Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004
- OLIVEIRA, P. J. – Estudo do vento e da turbulência na camada limite atmosférica em áreas de floresta e pastagem na Amazônia – São José dos Campos: INPE, 1999.
- PHILLIPS, O., MALHI, Y., HIGUCHI, N., GRACE, J., LAURANCE, W.F., NUÑEZ, P., VASQUEZ, R., LAURANCE, S.G., FERREIRA, L.V., STERN, M., BROWN, S. – Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plot data – Science, 282, pp. 439-442, 1998.
- ROCHA, H.R. da; FREITAS, H.C.; ROSOLEM, R.; JUÁREZ, R.I.N.; TANNUS, R.N.; LIGO, M.A.; CABRAL, O.M.R. E DIAS, M.A.F.S. – Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brazil – Biota Neotropica, vol. 2 (n1), pp. 1-11, Brasil, 2002.
- ROCHA, M.T. – Aquecimento Global e o Mercado de Carbono: Uma aplicação do Modelo CERT – Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, Brasil, 2003.
- RUBIO, M.G. – Curso de Introdução à Instrumentação em Engenharia-Módulo Básico – Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT, São Paulo, 2000.
- SANTOS, E.O. dos – Contribuição ao Estudo do Fluxo de Dióxido de Carbono dentro da Floresta Amazônica – Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.
- SANTOS, M.A – Inventário de Emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidroelétricas – Tese de Doutorado, COPPE, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- SCHIMEL, D.; MELILLO, J.; TIAN, H.Q.; MCGUIRE, A.D.; KICKLIGHTER, D.; KITTEL, T.; ROSENBLUM, N.; RUNNING, S.; THORNTON, P.; OJIMA, D.; PARTON, W.; KELLY, R.; SYKES, M.; NEILSON, R. e RIZZO, B. – Contribution of increasing CO₂ and climate to carbon storage by ecosystems in the United States – 2000, Science, 287: 2004-2006.
- SCHÖNING, M.J.; GLÜCK, O. e THUST, M. – Electrochemical Composition Measurement – Measurement Instrumentation Transducers Handbook, Capítulo 70.1, CRC Press, Estados Unidos, 1999.
- SIGRIST, M.W. – *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques* - New York: Wiley -Interscience, 1994.

- SILVA, J.R.P.da – Balanço de Carbono sobre uma Plantação de Eucalipto-o problema de Quioto – Trabalho Final de Curso, Instituto Superior Técnico, Brasil, 2001.
- SODRÉ, U. – Transformadas de Laplace – Notas de Aula, 2003.
- SPIEGEL, M. R. - Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas – Coleção Schaum, Ed. Artmed-Bookman, Brasil, 2004.
- STEUDEL, E.; BIRKE, P. e WEPPNER, W. – “Miniaturized solid state electrochemical CO₂ sensors” – *Electrochimica Acta*, Vol. 42, Nos 20-22, pp. 3147-3153, Inglaterra, 1997.
- STREET, R. L. – Analysis and solution of partial differential equations – Montreal, 1973.
- STULL, R.B. – *An Introduction to boundary-layer meteorology* - Dordrecht: Kluwer Acad, 1993
- SYDENHAM, P.H. –Static and Dynamic Characteristics of Instrumentation – Measurement Instrumentation Transducers Handbook, Capítulo 3, CRC Press, Estados Unidos, 1999.
- TOLENTINO, M. e ROCHA, R.C. Filho – A Química no efeito estufa – *Química e Sociedade*, N° 8, pp. 10-14, Brasil, 1998.
- TURNER, M.J. e CULBERT, S. – Apparatus to measure the step and frequency responses of faz analysis instruments – *Physiology Measurement*, 14, pp. 317-326, Inglaterra, 1993.
- VIANNA, J.N.S. – Etude de la Mesure de Temperature en Regime Dynamique – These Docteur-Ingenieur, ENSAM, Paris-France, 1984.
- VIANNA, J.N.S.; OLIVEIRA, A.B.S e DAMION, J.P. – Influence of the Diaphragm on the Metrological CHaracteristics of a Shock Tube – *Metrologia*, Vol. 36, pp. 599-603, 1999.
- VILLA, C.V.S. – RFreq – Software para Calibração Dinâmica de Transdutores de Pressão – Tese de Mestrado, UnB, Brasília, Brasil, 2000.
- VIOLA, E. – O Regime Internacional de Mudança Climática e o Brasil – *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, Vol. 17, No 50, pp. 26-46, Brasil, 2002.
- YAMAMOTO, F. S. – Observar e Pensar antes de Modelar: Notas em Matemática Aplicada – São Carlos, São Paulo, SBMAC, 2005.

**MÉTODO DE RAIOS INFRAVERMELHO NÃO DISPERSIVO – NDIR
(DYNAMENT, AN0003, 2005)**

Uma luz incidente em um sistema pode ser refletida, transmitida, refratada ou absorvida. A fração de luz que é absorvida pode ser expressa pela relação AI.1

$$-\frac{dI}{I} = b \cdot dx \quad \text{Eq. AI.1}$$

onde,

I é a intensidade da luz à uma distância x da sua entrada e o meio;

b é chamado coeficiente de absorção.

Integrando a Eq. AI.1 e utilizando as condições de contorno $I = I_0$ em $x = 0$, com isso tem-se que,

$$I = I_0 \cdot e^{-b \cdot x} \quad \text{Eq. AI.2}$$

A lei de Beer (Eq. AI.3) desenvolvida em 1852 mostra que o coeficiente b é proporcional à concentração do gás.

$$\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\varepsilon \cdot c \cdot l \quad \text{Eq. AI.3}$$

onde,

c é a concentração molar;

l é o pathlength;

ε é o chamado coeficiente de absorção molar ou coeficiente de extinção.

Obs.: Esta lei só é válida para luz monocromática.

O método NDIR (Non Dispersive InfraRed), ao invés de usar um único comprimento de onda, utiliza a intensidade de uma gama de comprimentos dentro de uma banda de passagem definida por um filtro óptico, utilizado em conjunto com o detector. Então a intensidade resultante é uma função de uma gama de coeficientes de extinção, um para cada comprimento de onda individual dentro da banda de passagem ativa.

Um efeito dessa técnica é que a condição de limite inicial $I=I_0$ em $x = 0$ ainda pode ser aplicada, mas a outra condição de contorno $I = 0$ em $x = \infty$ não, pois algum comprimento de onda dentro da banda de passagem pode não ser do gás.

Há duas fontes principais de comprimentos de onda não absorvidos:

- Espectros onde os comprimentos de onda de outros tipos de gases, que se misturam com os do gás em análise.
- Onde a banda de passagem do filtro é mais larga que o cume de absorção da molécula designada, permitindo que os comprimentos de onda não absorvidos em um ou ambos os lados do cume de absorção contribuam para o sinal.

Com o efeito dessas duas considerações a lei de Beer é modificada para a forma da equação AI.4.

$$I = I_0 \cdot \left((1-S) \cdot e^{-b \cdot x} + S \right) \quad \text{Eq. A.4}$$

onde,

S é a contribuição da intensidade dos comprimentos de onda não absorvidos.

Com isso as condição de contorno $I=I_0$ em $x = 0$ continua valendo e define condição de contorno $I = S \cdot I_0$ em $x = \infty$, que é a contribuição ao dos comprimentos de onda não absorvidos. Além disso, o fator exponencial é modificado pelo fato que uma banda de passagem monitora uma forma integrada do produto bx . Então para cada comprimento de onda individual o produto bx é inseparável e o expoente da adição é convertido em uma forma usual pela relação:

$$\exp\left(-\sum (b \cdot x)\right) = \exp\left(-\alpha \cdot x^\beta\right) \quad \text{Eq. AI.5}$$

onde,

α é uma constante relacionada ao valor médio de $\epsilon \cdot I$ na lei de Beer;

β é um espectro constante relacionado.

Determinação da concentração de um gás

As discussões anteriores modificam a lei da intensidade para a forma da equação AI.6.

$$I = I_0 \cdot \left((1-S) \cdot e^{-\alpha \cdot x^\beta} + S \right) \quad \text{Eq. AI.6}$$

onde,

I é a intensidade do sinal do detector. Esse é o valor pico-a-pico da saída do detector que é modificado pela presença do;

I_0 = Sinal do detector medido na ausência do gás. Isso pode ser determinado pelo valor do sinal de saída pico-a-pico da referência I_r e o pico-a-pico avaliado dos sinais de saída da referência e do detector na ausência do gás. Isso pode ser continuamente relacionado através da relação $I_r/(I/I_r)_0$ onde $(I/I_r)_0$ é a relação entre o sinal de saída de detector e da referência na ausência de gás e que pode ser denotada pelo símbolo Z que constitui o nível zero;

S = contribuição do comprimento de onda não absorvido. A gama da contribuição é definida por $1 - S$ que constitui o nível da amplitude;

α = Constante exponencial que também define as unidades da concentração do gás;

β = Constante que depende do espectro do gás.

Então em termos dos sinais do detector (I) e a referência (I_r) com isso a Eq. AI.6 resulta em,

$$\frac{\left(\frac{I}{Z \cdot I_r} - S\right)}{1 - S} = \exp(\alpha \cdot x^\beta) \quad \text{AI.7}$$

Rearranjando a Eq. AI.7 a concentração do gás (x) é determinada pela Eq. AI.8.

$$x = \left\{ -\ln \left[\frac{\frac{I}{Z \cdot I_r} - S}{\alpha \cdot (1 - S)} \right] \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad \text{AI.8}$$

onde,

x é a concentração do gás;

Z é o fator zero;

S é o fator da amplitude que é igual a assíntota da mudança da relação com a concentração do gás crescente e α e β são constantes.

A lei da intensidade pode também ser rearranjada para produzir uma equação em termos da densidade ótica que é definida como $(I - I)/(Z \cdot I_r)$.

$$\frac{1 - I}{Z \cdot I_r} = (1 - S) \cdot \left(1 - \exp(\alpha \cdot x^\beta)\right) \quad \text{AI.9}$$

rearranjando,

$$\frac{\left(\frac{I}{Z \cdot I_r} - S\right)}{1 - S} = \exp(\alpha \cdot x^\beta) \quad \text{AI.10}$$

$$x = \left\{ -\ln \left[1 - \frac{\frac{1-I}{Z \cdot I_r}}{1-S} \right] / \alpha \right\}^{\frac{1}{\beta}}$$

AI.11

ESPECIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR UTILIZADO NO TRABALHO

LAUDO DE CALIBRAÇÃO DO GÁS UTILIZADO NO TRABALHO

EDYCAP (Oliveira, A.B.S., 2004)

O programa EDYCAP (Etalonnage Dynamique de Capteurs de Pression) foi desenvolvido pelo Laboratoire de Metrologie Dynamique da ENSAM – Paris (Damion, 1977) e é utilizado para determinar o comportamento dinâmico de transdutores de pressão. O programa é formado por uma cadeia de rotinas de cálculos destinados ao tratamento da resposta transiente de um transdutor, para calcular a função de transferência. As principais funções do EDYCAP são mostradas abaixo:

- Entrada dos dados necessários para o tratamento dos dados;
- Importação e normalização da resposta temporal;
- Cálculo da função de transferência;
- Cálculo da função de transferência da média de vários ensaios;
- Geração de arquivos usados para traçar as diferentes curvas;
- Visualização de todos os dados.

O EDYCAP utiliza a transformada Discreta de Fourier para calcular a função de transferência.

$$G(f) = \frac{\mathfrak{I}O(t)}{\mathfrak{I}I(t)} = \frac{O(f)}{I(f)} = \frac{\int_0^{\infty} O(t) \cdot e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} I(t) \cdot e^{-j\omega t} dt} \quad \text{AIV.1}$$

Considerando que a transformada de Fourier de um sinal analógico da saída de um transdutor é definida por $0 \leq t \leq T$.

$$O(f) = \int_0^T O(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt = \int_0^T O(t) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt - j \cdot \int_0^T O(t) \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) dt \quad \text{AIV.2}$$

Fazendo considerações na Eq. AIV.2 para um sinal discreto com n pontos, a função de transferência é calculada pela Eq. AIV.3.

$$G(f) = \frac{O(f_k)}{I(f_k)} = \frac{\Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} O_i(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot k \cdot n}{N}} \Delta t}{\Delta t \cdot \sum_{n=0}^{N-1} E_i(n) \cdot e^{-j \frac{2\pi \cdot k \cdot n}{N}} \Delta t}, \text{ com } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad \text{AIV.3}$$