

## **PROJETO “UNIDADES REMOTAS DE MONITORAMENTO AMBIENTAL: QUANTIFICAÇÃO DO $CO_2$ ATMOSFERICO”**

### **LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE OS SENSORES AMBIENTAIS DE DIÓXIDO DE CARBONO**

#### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO TECNOLÓGICA (PIBITI/CNPq/INPE)**

Fábio Nascimento de Melo (Univap, Bolsista PIBITI/CNPq)  
E-mail: [fabio.melo@cptec.inpe.br](mailto:fabio.melo@cptec.inpe.br)

Maria Paulete Pereira Martins (CPTEC/INPE, Orientador)  
E-mail: [maria.paulete@cptec.inpe.br](mailto:maria.paulete@cptec.inpe.br)

#### **COLABORADORES**

Dr. Waldeir Amaral Vilela (LIT/INPE)  
Dr. Celso Thomáz Junior (LIM/CPTEC/INPE)

Julho de 2011

## Resumo

Este trabalho teve como escopo o levantamento de informações sobre os equipamentos de medição do dióxido de carbono atmosférico, servindo assim de base para o processo de escolha/compra do sensor mais adequado ser usado no projeto “Unidades Remotas de Monitoramento Ambiental”. Primeiramente foi realizado um levantamento sobre a importância de se estudar, monitorar e controlar os níveis dos gases efeito estufa na atmosfera, principalmente o dióxido de carbono. Inseriu-se nesse contexto informações sobre o processo do efeito estufa, sua importância e o processo de intensificação do mesmo. Abordou-se como o aumento da concentração do dióxido de carbono e outros gases têm contribuído para o cenário das mudanças climáticas, do ponto de vista histórico. Depois se procurou compilar informações sobre os tipos de sensores usados na medição do dióxido de carbono atmosférico e seus respectivos princípios de funcionamento. Terminou-se com um resumo de uma dissertação de mestrado do MS. Robson Dagmar, o qual desenvolveu um sensor de dióxido de carbono de baixo custo, uma vez que esses sensores possuem um custo relativamente elevado. Espera-se que este não só ajude o projeto das unidades remotas de monitoramento ambiental, como também forneça informações e subsidie outros projetos de monitoramento deste gás, pois seu monitoramento e entendimento são de primordial importância para a adoção de políticas públicas para nortear o país em busca do desenvolvimento sustentável.

Palavras chave:  $CO_2$ , GEE, monitoramento ambiental.

## **Abstract**

The scope of this work was to collect information about the equipments for atmospheric carbon dioxide measurement, as a basis for the choice / purchase of the best and suited sensor to be used in the project "Environmental Remote Monitoring Units". Firstly was done a survey on the importance of studying, monitoring and controlling the levels of greenhouse gases in the atmosphere, mainly carbon dioxide. It was part of the context information about the greenhouse effect, its importance and the process of increasing. It was broached as the increased concentration of carbon dioxide and other gases have contributed to the scenario of climate change, in the historical point of view. Then it was tried to compile information on the types of sensors used in the atmospheric carbon dioxide measurement and the principles of operation of them. And finally this study was finished with a summary Mr. Dagmar Robson's dissertation, who has developed a carbon dioxide sensor of low cost, since these sensors have a relatively high cost. It is hoped that this study could help the design of environmental remote monitoring units, as well as provide information and subsidize to other projects about carbon dioxide monitoring. Since the monitoring and understanding of greenhouse effect gases are of paramount importance for the adoption of public policies to guide the country pursuit of sustainable development.

Key words:  $CO_2$ , greenhouse gases, environmental monitoring.

## **Lista de Figuras**

FIGURA 2.1	Radiação solar que entra e calor irradiado de volta para o espaço	15
FIGURA 2.2	Absorção de vários gases atmosféricos em função do comprimento de onda	18
FIGURA 2.3	Efeito estufa	19
FIGURA 2.4	Esquema do sensor SBDW	31
FIGURA 2.5	Diagrama funcional do sensor	31
FIGURA 2.6	Diagrama em blocos do sensor	32

## Lista de tabelas

TABELA 2.1	Composição atmosférica	12
TABELA 2.2	Marcos no processo de mudança do clima	22
TABELA 2.3	Informações sobre os sensores de $CO_2$ pesquisados	40

## Lista de Símbolos

°C	Graus-Celsius
GEE	Gases efeito-estufa
R	Raio da Terra
B	Taxa á qual a radiação solar atinge a Terra
S	Constante Solar ( $1370 \text{ W/m}^2$ )
F	Radiação refletida de volta para o espaço
E	Energia irradiada de volta para o espaço
$\alpha$	Albedo médio da Terra (30% ou 0,30)
$T_s$	Temperatura média do planeta
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )
ROC	Radiação de onda curta
ROL	Radiação de onda longa
P	Pressão atmosférica (atm)
V	Volume (L)
T	Temperatura média atmosférica (K ou °C)
ppmv	Partes por milhão de volume
ppbv	Partes por bilhão de volume
a	absorção
e	coeficiente de absorção
$\lambda$	comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ )
b	comprimento do caminho ótico
c	concentração do gás
IV	Infravermelho
V	Voltz
dB	Decibel
Hz	Hertz

$\tau$  Transmitância

$L_0$  intensidade de radiação

## Sumário

Capítulo 01	INTRODUÇÃO	09
1.1	Objetivos gerais	11
1.2	Objetivos específicos	11
Capítulo 02	Revisão da literatura	12
2.1	Revisão bibliográfica a importância do monitoramento de $CO_2$	12
2.1.1	Composição atmosférica	12
2.1.2	Ciclo do carbono	13
2.1.3	Efeito Estufa	14
2.1.4	Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima (IPCC)	20
2.1.5	Conferências do Clima, as COPs e o Protocolo de Quioto	20
2.2	Levantamento bibliográfico sobre os sensores de $CO_2$	23
2.2.1	Tipos de sensores de $CO_2$	24
2.2.1.1	Sensor eletroquímico	24
2.2.1.2	Sensores de estado sólido	25
2.2.1.3	Sensores baseados em espectrografia molecular	26
2.2.2	Sensor de $CO_2$ NDIR	28
2.2.2.1	Fundamentos teóricos	31
2.2.2.2	Projeto e construção do sensor de $CO_2$	31
2.2.2.2.1	Desenvolvimento do bloco analógico	32
2.2.2.2.2	Desenvolvimento do bloco digital	36
2.2.2.2.3	Ensaio e testes	36
2.2.3	Principais fabricantes e fornecedores dos sensores de $CO_2$	39
Capítulo 03	Conclusões e sugestões para futuros trabalhos	41
	Referências bibliográficas	41



## Capítulo 1- Introdução:

A presença da atmosfera sob a superfície terrestre é primordial para a manutenção da vida, essencialmente pelo fato de reter calor, deixando a temperatura média do globo em torno de 15°C (BRAGA et al, 2002). Essa retenção de calor é devido aos gases que constituem a atmosfera.

Os gases responsáveis por esse processo são chamados de Gases Efeito Estufa (GEE), os quais podemos destacar os principais: dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxido nitroso ( $NO_2$ ) e o metano ( $CH_4$ ) (SOUZA, 2003). O vapor d'água também é muito importante para o efeito estufa.

A fração desses gases na atmosfera sempre variou ao longo de milhões de anos, fazendo com que a temperatura média da Terra também variasse, transformando o clima do planeta até chegar a um clima adequado para a manutenção dos seres vivos. Essas variações ocorrem em escalas muito lentas.

Nas últimas décadas, porém, houve um considerável aumento na concentração dos GEE na atmosfera, coincidindo com o aumento das atividades industriais. Essa elevação nos níveis desses gases poderá intensificar o efeito estufa, uma vez que a capacidade da atmosfera reter calor aumentará. Isso acarretará em uma mudança na temperatura média terrestre em até 5,8°C nos próximos cem anos ( INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2007).

O dióxido de carbono ( $CO_2$ ) está envolvido em processos de natureza química e biológica, sendo produzido naturalmente próximo a superfície terrestre. Porém, com o aumento das atividades antrópicas, em especial a queima de combustíveis fósseis e a queima de florestas de 1970 até 2005, houve um aumento de 80% nas emissões de  $CO_2$ , atingindo a concentração de 379 ppmv (partes por milhão de volume de ar). É considerado o principal GEE, pois está presente na atmosfera em quantidades bem maiores que os outros gases responsáveis pelo efeito (OLAYA,2010).

O metano ( $CH_4$ ) é produzido naturalmente através de processos biológicos, como subproduto da decomposição de matéria orgânica morta em processos anaeróbicos. As atividades pecuárias também são responsáveis pelo aumento nas concentrações desse gás, através da eructação dos bovinos. O metano possui poder de aquecimento global vinte e uma vezes maior que o dióxido de carbono, porém é considerado de menor importância que este devido a sua concentração na atmosfera ser consideravelmente menor que a do dióxido de carbono (SALBY, 2005; LISBOA, 1996).

O óxido de nitrogênio ( $NO_2$ ) também é produzido naturalmente, estando envolvido ativamente na ciclagem do nitrogênio, através em um processo chamado desnitrificação, realizado por alguns microrganismos. As atividades humanas que contribuem para a elevação nos níveis desse gás na atmosfera são: atividades industriais e automóveis (SALBY, 1996).

As consequências desse aumento na temperatura seriam catastróficas, resultando em alterações drásticas do clima na Terra, provocando seca em regiões úmidas e produtivas e elevadas chuvas em regiões áridas. Além disso, uma das principais consequências seria o derretimento de calotas de gelo polares, ocasionando em um inevitável aumento no nível médio dos mares, o que resultaria em inundações e destruições das cidades costeiras.

Por essa grande preocupação acerca desse tema, o monitoramento das concentrações desses gases, principalmente o dióxido de carbono, se torna de grande importância o controle das emissões, e nortear políticas públicas de mitigação e minimização dos impactos advindos desse problema.

O projeto “Unidades remotas de monitoramento ambiental”, tem, em um de seus objetivos, o monitoramento e quantificação dos níveis de  $CO_2$  na atmosfera.

Esse levantamento bibliográfico tem como escopo revelar a importância na determinação e medição das concentrações de dióxido de carbono na atmosfera, bem como identificar os equipamentos utilizados para se determinar a concentração de  $CO_2$ . Estas informações servirão de base para elaboração do projeto e na especificação destes sensores para o processo de compra.

### **1.1-Objetivos gerais:**

Este trabalho tem como objetivo conceder informações relevantes sobre a importância do estudo e monitoramento do dióxido de carbono na atmosfera e auxiliar no processo de compra dos sensores de  $CO_2$  para o projeto “Unidades remotas de monitoramento ambiental: quantificação do dióxido de carbono atmosférico”.

### **1.2-Objetivos específicos:**

- Determinar qual a importância e as principais motivações do monitoramento da concentração de dióxido de carbono e de outros gases na atmosfera;
- O que é um sensor de dióxido de carbono, quais os principais tipos de sensores e seus respectivos princípios de funcionamento;
- Quais as principais instituições que realizam monitoramento da concentração de gases na atmosfera;
- Fazer um levantamento das principais técnicas utilizadas para o monitoramento de dióxido de carbono;
- Determinar os principais fabricantes de sensores de dióxido de carbono e possíveis fornecedores no Brasil e exterior;
- Verificar como se realiza a calibração deste tipo de sensor;
- Verificar como são apresentados os dados adquiridos pelo sensor (tabela, gráfico, entre outras ferramentas), formato dos dados, taxa de aquisição, resolução dos sistemas de aquisição;
- Determinar quais critérios a serem adotados para a escolha do sensor de dióxido de carbono a ser utilizado nas unidades remotas de monitoramento ambiental, considerando a natureza do projeto e os recursos disponíveis, para que com base nestes critérios quais os melhores sensores para se adquirir;

## Capítulo 2- Revisão da literatura

### 2.1 – Revisão bibliográfica sobre a importância do monitoramento de CO<sub>2</sub>

Esta parte da revisão da literatura contém o histórico sobre o processo de mudanças climáticas, efeito estufa e importância no monitoramento do dióxido de carbono

#### 2.1.1-Composição atmosférica:

A atmosfera terrestre é constituída por uma mistura de gases, principalmente por nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), representando juntos 99% do volume total da atmosfera.

O vapor d'água, dióxido de carbono ozônio, metano, entre outros constituintes, representam apenas 1% do volume total da atmosfera. Na tabela 1 pode-se observar os constituintes atmosféricos (SALBY,1996).

A tabela 2.1 - Constituintes atmosféricos

Fonte: tabela adaptada do livro: Fundamentals of Atmospheric Physics, 1995:

Constituinte	Proporção de mistura na atmosfera
N <sub>2</sub>	0,7808
O <sub>2</sub>	0,2095
H <sub>2</sub> O	<=0,030
A	0,0093
CO <sub>2</sub>	350ppmv
O <sub>3</sub>	10ppmv
CH <sub>4</sub>	1,6ppmv
NO <sub>2</sub>	350ppbv
CO	70ppbv
NO	0,1ppbv
CFC-11*	0,2ppbv
CFC-12*	0,3ppbv

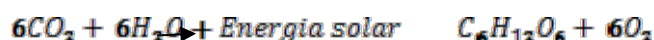
\* atividade radioativa

### 2.1.2-Ciclo do carbono:

O maior reservatório de carbono no planeta é a atmosfera, disponível na forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). O carbono é fonte vital para a manutenção de todas as formas, pois é o principal constituinte da matéria orgânica, esqueleto de todas as biomoléculas dos seres vivos, de todos os níveis tróficos (produtores, consumidores e decompositores).

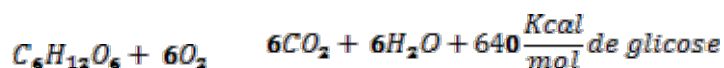
O ciclo do carbono é um ciclo perfeito, ou seja, o carbono retorna ao meio à mesma taxa que é sintetizado pelos produtores.

Os produtores (organismos clorofilados), utilizam o dióxido de carbono e o vapor de água para, na presença da radiação solar, sintetizar compostos orgânicos de carbono (como a glicose), hidrogênio e oxigênio. Esta reação é conhecida como fotossíntese, e pode ser expressa de maneira simplificada como:



Expressão simplificada pois o processo de fotossíntese corresponde a um conjunto de 80 a 100 reações químicas.

A energia proveniente da radiação solar é armazenada como energia química nas moléculas orgânicas sintetizadas, e é liberada no processo inverso ao da fotossíntese: a respiração. Na respiração há a quebra das moléculas orgânicas, e a liberação de energia para as atividades vitais dos organismos. O processo de respiração é dado pela expressão simplificada abaixo:



Uma vez que os produtores morrem, servem de alimento para os consumidores e decompositores. Assim, as moléculas orgânicas irão servir de base para que outros seres sintetizem suas próprias moléculas orgânicas, e dessa forma o carbono é passado para cada nível trófico da cadeia alimentar.

A fotossíntese e a respiração são processos de reciclagem de carbono e oxigênio, em várias formas químicas em todos os ecossistemas.

Assim, o carbono passa da sua forma inorgânica para a forma orgânica e volta à forma inorgânica.

Há ainda uma enorme quantidade de carbono estocada no fundo dos oceanos e formações geológicas, porém o processo de decomposição geológica é muito lento e, portanto, para essa forma de carbono estar disponível para os seres vivos é necessária uma enorme escala de tempo (BRAGA et al., 2002).

### **2.1.3-Efeito estufa:**

A radiação solar nada mais é do que a emissão de raios pela estrela maior: o Sol.

O planeta Terra, como qualquer outro corpo ou objeto que recebe radiação, reflete uma parte da energia proveniente do sol e absorve a outra parcela, irradiando a mesma para o espaço sob a forma de calor. Sendo assim, nosso planeta atua como conversor de ondas, convertendo a radiação de alta energia e alta frequência, radiação de ondas curtas (ROC), em calor de baixa energia e baixa frequência, radiação de ondas longas (ROL).

Podemos observar na figura 1 A que a maior porção da energia que efetivamente chega à superfície terrestre possui o comprimento de onda menor que  $3\mu\text{m}$  (radiação de onda curta), com seu pico próximo a  $0,5\mu\text{m}$ . Já na figura 1B observa-se que a maior parte da energia emitida de volta para o espaço possui comprimento de onda maior que  $3\mu\text{m}$ .

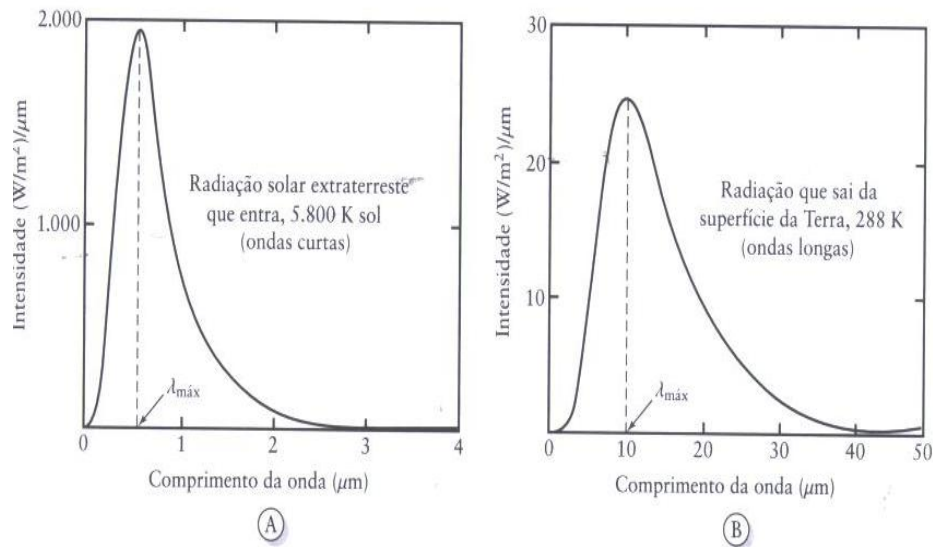


Figura 2.1 Radiação solar que entra e calor irradiado de volta para o espaço

Fonte: Livro Introdução a Engenharia Ambiental

A quantidade de radiação que chega do sol é calculada com base na sua intensidade, chamada constante solar,  $S$ , que equivale a  $1370 \text{ W/m}^2$ . A área que recebe essa radiação é calculada como  $\pi R^2$ , no qual  $R$  é o raio da Terra.

A taxa com que a radiação solar atinge a superfície da Terra pode ser calculada pela equação:

$$B = S\pi R^2$$

Onde:

$B$ : taxa a qual a radiação solar atinge a Terra ( $\text{W}$ );

$S$ : constante solar, estimada em  $1370 \text{ (W/m}^2\text{)}$ ;

$R$ : raio da Terra ( $\text{m}$ ).

O percentual de radiação solar que chega a superfície e é refletida de volta ao espaço e chamado de albedo, sendo hoje estimado em 30% (MOLION, 2008).

Considerando o albedo médio da Terra  $\alpha$ , a quantidade da radiação solar que é refletida de volta para o espaço é:

$$F = S\pi R^2\alpha$$

Onde:

F= radiação refletida de volta para o espaço (W);

$\alpha$ = albedo médio da Terra (30% ou 0,30).

Pelo balanço de energia, a quantidade de energia que chega na superfície da Terra é igual a soma da energia refletida pela superfície (F) e a energia absorvida pela superfície (B):

$$B = A + F$$

Adaptando a equação, podemos calcular a radiação absorvida pela superfície do planeta do seguinte modo:

$$A = B - F$$

$$A = S\pi R^2(1 - \alpha)$$

Onde,

A= energia absorvida pela Terra (W).

O planeta pode ser descrito como um conversor de ondas, pois toda a energia absorvida é convertida em calor. Assumindo que a Terra é um corpo negro, que emite radiação na faixa do infravermelho, e que esta radiação é emitida por toda a sua superfície, aplicando a lei de Stefan-Boltzmann, a energia irradiada por unidade de área, é dada por:

$$E = \sigma 4\pi R^2 T_e^4$$

Onde,

T= temperatura média do planeta

$\sigma$ = constante de Stefan-Boltzmann =  $(5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4)$



Assumindo que toda a energia proveniente do sol, absorvida pelo planeta, é emitida de volta para o espaço, então segue que:

$$A=E$$

$$S\pi R^2(1 - \alpha) = \sigma 4\pi R^2 T_e^4$$

Fazendo uma suposição de que a temperatura da Terra se mantém constante por toda a sua superfície, pode-se calcular essa adaptando-se a equação:

$$T = [S(1-\alpha)/4\sigma]^{1/4}$$

$$T = \left[ \frac{S(1-\alpha)}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Substituindo os valores, pode-se calcular a temperatura média da Terra:

$$\frac{\left(\frac{1370W}{m^2}\right)(1 - 0,30)}{\left(4\left(5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}\right)\right)^{\frac{1}{4}}}$$

$$T_e = 255K = -19^\circ C$$

Sabe-se que o valor médio da temperatura da Terra é de 15°C, e não -19°C. Essa diferença é explicada pelo fato de que a atmosfera é composta por uma grande variedade de gases e que cada um deles absorve calor em comprimentos de ondas específicos. Alguns desses gases não absorvem bem as radiações de ondas curtas, mais tem um grande potencial de absorção de ondas longas. Pode-se dizer que a atmosfera é transparente as ROC e opaca para ROL, principalmente na região do infravermelho.

Por isso a radiação chega a superfície terrestre, é absorvida e posteriormente é emitida de volta para o espaço. Alguns dos gases componentes da atmosfera, absorvem pouca radiação de ondas curtas mais absorvem bem radiações de onda longa.

A figura 1.2 mostra a capacidade de absorção de vários gases atmosféricos em função do comprimento de onda. Pegando como exemplo o  $CO_2$ , nota-se que ele absorve quase nada da radiação de onda curta, a qual possui seu pico em 0,5µm, porém absorve de forma mais eficaz em comprimentos de onda maiores que 1,5µm, tendo uma boa

absorbância em comprimentos de onda próximo a  $10\mu\text{m}$ , que é o pico de radiação de ondas longas que é emitida para o espaço. O mesmo acontece com o vapor d'água, metano e óxido nítrico.

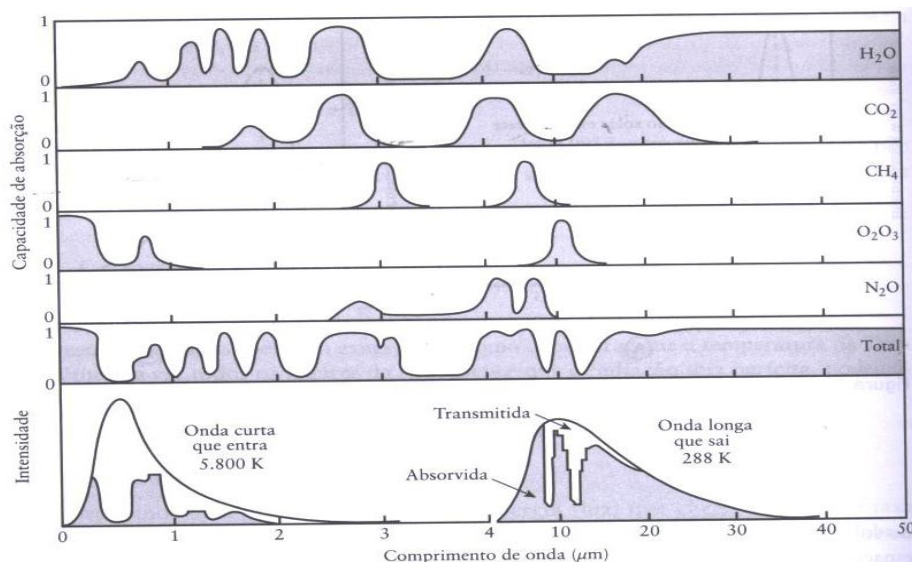


FIGURA 2.2 Absorção de vários gases atmosféricos em função do comprimento de onda

Fonte: Introdução a Engenharia Ambiental

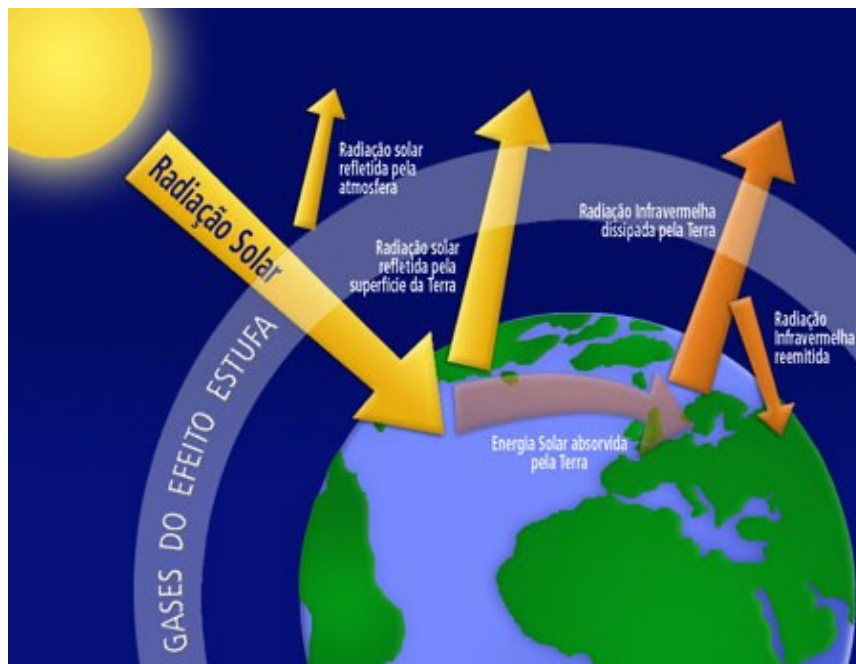


Figura 2.3 – Efeito estufa

Fonte: Office National des Forêts (ONF Brasil) site [http://www.reflorestamentocarbono.com.br/novo/porta/view\\_contexto.php](http://www.reflorestamentocarbono.com.br/novo/porta/view_contexto.php)

Como esses gases absorvem bem o calor, acabam aquecendo a superfície terrestre, de forma que a temperatura média do planeta passa a ser de aproximadamente 15°C. Esse processo é chamado de Efeito Estufa, o qual é um processo natural benéfico, permitindo a manutenção da vida e dos processos naturais, pois, como calculado anteriormente, a temperatura média seria de -19°C.

Os GEEs são:  $CO_2$ , metano, óxido nitroso, clorofluorcarbono (CFCs), ozônio, etc.

A emissão desses gases aumenta a energia que é mantida na atmosfera devido a absorção do emitido pela superfície do planeta, o que causa um aumento na temperatura do planeta.

As previsões para as consequências desse aumento de temperatura são de efeitos catastróficos na ecosfera, como modificações climáticas, elevação no nível dos oceanos,

fazendo com que algumas cidades litorâneas sejam submersas, impactos na agricultura, intensificação de furacões, entre outras alterações significativas

O aumento das concentrações de dióxido de carbono se deve a queima de combustíveis fósseis e a mudanças no uso do solo. Já as emissões de metano e óxido nitroso são provenientes principalmente de atividades agrícolas.

A concentração do dióxido de carbono aumentou desde a época pré-industrial de 280 ppm para 379ppm em 2005, segundo dados do relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima, IPCC/ONU de 2007. (SALBY, 1996; VESILIND e MORGAN, 2011; STULL, 2000).

#### **2.1.4-Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC)**

O IPCC foi estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O IPCC é formado por um grupo de dois mil e quinhentos pesquisadores, que têm como objetivo avaliar e disponibilizar informações técnicas sobre as mudanças climáticas, visando assim nortear as políticas internacionais a adotarem medidas mitigadoras e minimizadoras sobre os impactos que serão causados (LISBOA, 2005; BRASÍLIA. MCT, 200?).

#### **2.1.5-Conferência do Clima, as COP, e o Protocolo de Quioto**

Com a evidência das mudanças climáticas e o efeito que esta poderia causar sobre o meio ambiente, economia e sociedade, a foi adotada, durante a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, ocorrida na cidade do Rio de Janeiro no ano de 1992, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima. Este documento é um texto de caráter jurídico, que entrou em vigor em 21 de março de 1994, que tem como principal objetivo a estabilização das emissões dos GEE em níveis aceitáveis, os quais não sejam prejudiciais aos ecossistemas e que permitam um desenvolvimento econômico. Aproximadamente 180 países são Partes da Convenção.

Os países membros da Convenção se reúnem constantemente para discutir o assunto e propor e formular soluções sobre o tema. Essas reuniões são chamadas de Conferência das Partes (COP).

As Partes são divididas em dois grupos, as do Anexo I e as do Anexo II. As partes do Anexo I são basicamente os países industrializados e as Partes do Anexo II são os países em desenvolvimento. Divide-se em dois grupos pois cada grupo contribuiu de forma diferenciada para as mudanças climáticas, de acordo com suas características, então cada grupo deve tomar medidas mitigadoras diferenciadas.

Já houve 15 conferências, e a última, a COP-15, ocorreu no ano passado (2010), em Copenhague, na Dinamarca.

O Protocolo de Quioto foi elaborado e adotado durante a COP-3. Esse documento prevê que, os as Partes do Anexo I, reduzam suas emissões em 5% em relação aos níveis ocorridos em 1990 no período compreendido entre os anos de 2008 e 2012 (primeiro período do compromisso).

Segundo este protocolo, devem ser reduzidas as emissões dos gases: dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $NO_2$ ), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ).

Tabela 2.2 – Marcos nos processos da mudança do clima

Fonte: site do Ministério da Ciência e Tecnologia

(<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/49286.html>)

Data	Marco
1988	A OMM e o PNUMA estabelecem o IPCC. A Assembléia Geral das Nações Unidas trata da mudança do clima pela primeira vez.
1990	O Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC é publicado. O Relatório recomenda o início de negociações para um acordo global sobre a mudança do clima. A Segunda Conferência Mundial do Clima também incita ao início de negociações. A Assembléia Geral das Nações Unidas abre negociações sobre uma convenção-quadro sobre mudança do clima e estabelece um Comitê Intergovernamental de Negociação para conduzi-las.
Fevereiro de 1991	O CIN reúne-se pela primeira vez.
9 de maio de 1992	A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima é adotada em Nova York na quinta sessão do CIN.
4 de junho de 1992	A Convenção é aberta a assinaturas na "Cúpula da Terra", no Rio de Janeiro.
21 de março de 1994	A Convenção entra em vigor.
7 de abril de 1995	A COP1 inicia uma nova rodada de negociações sobre um "protocolo ou outro instrumento legal".
11 a 15 de dezembro de 1995	O IPCC aprova seu Segundo Relatório de Avaliação. Suas conclusões salientam a necessidade de ações políticas fortes.
19 de julho de 1996	A COP2 toma nota da Declaração Ministerial de Genebra, que funciona como um impulso adicional às negociações em andamento.
11 de dezembro de 1997	A COP3 adota o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima em Quioto, Japão.
16 de março de 1998	O Protocolo de Quioto é aberto a assinaturas na sede das Nações Unidas em Nova York. Recebe 84 assinaturas em um período de um ano.
14 de novembro de 1998	A COP4 adota o "Plano de Ação de Buenos Aires" para fortalecer a implementação da Convenção e preparar para a entrada em vigor do Protocolo. A COP6 é definida como o prazo para a adoção de muitas decisões importantes.
13 a 24 de novembro de 2000	A COP6 será realizada na Haia, Holanda, para adotar decisões cruciais sobre a implementação da Convenção e detalhes do Protocolo.
2002	"Rio+10" "Cúpula da Terra 2002", dez anos após a "Cúpula da Terra" de 1992.
200?	Entrada em vigor do Protocolo de Quioto?
2005	As Partes do Anexo I devem ter realizado um "avanço demonstrável" no cumprimento de seus compromissos no âmbito do Protocolo. Início das discussões para a próxima rodada de compromissos pós-2012.
2008 a 2012	Primeiro período de compromisso no âmbito do Protocolo de Quioto.

O Protocolo de Quioto estabelece alguns mecanismos alternativos para que os países cumpram o acordo de redução das emissões. Dentre os mecanismos, pode-se citar o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, o qual visa auxiliar os países em desenvolvimento a se desenvolverem de maneira sustentável, por meio de incentivos dos países desenvolvidos. Isso consiste na idéia de que cada tonelada deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera poderá ser comercializada com outros países. Portanto, os países do Anexo I que não conseguirem reduzir suas emissões de acordo com as metas estabelecidas, poderão comprar Certificados de Emissões Reduzidas (CER), dos países em desenvolvimento, incentivando a pratica sustentável desses. Isso é a chamada comercialização dos créditos de carbono (BRASÍLIA. MCT, 200?).

## **2.2-Levantamento bibliográfico dos sensores de $CO_2$**

O objetivo dessa revisão de literatura é listar e entender os tipos de sensores de  $CO_2$  e seus princípios de funcionamento. Essas informações servirão de base para a escolha/processo de compra do melhor e mais adequado sensor de  $CO_2$  que será usado no projeto nas Unidades Remotas de Monitoramento Ambiental e até projetos similares futuros que visem a quantificação do dióxido de carbono atmosférico. Foi aqui resumida e usada como base a dissertação de mestrado do pesquisador Robson Dagmar Shaeffer, para o titulo de Mestre em Engenharia Elétrica. Como projeto de sua dissertação, foi desenvolvido um sensor de  $CO_2$  de baixo custo, como alternativa a ser usada, pois esses equipamentos normalmente possuem um alto custo. Embora o sensor seja para medições em locais fechados, onde as concentrações de  $CO_2$  são muito mais elevadas, seu funcionamento é similar aos usados para medições atmosféricas, servindo de referência sobre o funcionamento desses equipamentos de uma maneira geral. Uma das diferenças dos sensores usados em ambientes fechados e dos para medições atmosféricas, para este ultimo, variações na temperatura e pressão interferem na medição.

Essa variação ocorre devido ao fato de o dióxido de carbono se comportar seguindo a Lei dos Gases ideais:

$$PV = nRT$$

Onde:

P= pressão

V= volume

N= numero de mols do gás

R= constante

T= temperatura

Portanto mudanças na temperatura ou na pressão alteram o volume do gás, e conseqüentemente a densidade molecular do mesmo. Essa alteração da densidade molecular do gás interfere na medição de  $CO_2$ , pois os sensores baseados em infravermelho não-dispersivo medem basicamente a densidade molecular (SALBY,2005).

## **2.2.1-Tipos de Sensores de CO2**

Segundo o INMETRO – VIM (1995) transdutores são instrumentos que: “fornecem uma grandeza de saída que tem correlação determinada com a grandeza de entrada.”

Os principais métodos de medição de poluentes atmosféricos, principalmente CO2 são: a medição eletroquímica, a medição espectroscópica, de estado sólido e os baseados em nanotubos de carbono (SCHAEFFER, 2004; LEÓDIDO, 2006).

### **2.2.1.1-Sensor eletroquímico**

A medição eletroquímica está relacionada a grandezas elétricas, como potencial, corrente, carga, etc.



Os sensores eletroquímicos são constituídos de dois eletrodos separados por uma fina camada de eletrólito. O gás em contato com o sensor reage com um dos eletrodos num mecanismo de oxidação e redução.

Geralmente os instrumentos que medem  $CO_2$  usam o método potenciométrico, ou seja, medição de potencial, medindo-se o potencial necessário para manter o equilíbrio eletroquímico.

Os sensores potenciométricos são compostos por:

- Um eletrodo de trabalho: o potencial depende do gás analisado (concentração deste);
- Um eletrodo de referência: fornece um potencial predefinido padrão;
- Um eletrólito sólido: formado por uma célula galvânica.

As vantagens da medição eletroquímica são:

- requerem pouca energia;
- são pequenos;
- relativamente baratos;

Sua desvantagem é que o material do eletrodo é desgastado durante a reação e que muitas vezes o reagente é influenciado pelo ambiente, já que o mesmo precisa estar em contato direto com o meio. Temperatura e umidade também causam alterações nas medições. Para medições a longo prazo, como é o caso de monitoramento atmosférico, é preciso recarga freqüente, e a vantagem de ser uma técnica relativamente barata, acaba se tornando uma desvantagem, pois o custo irá aumentar (SCHAEFFER, 2004; LEÓDIDO, 2006).

### **2.2.1.2-Sensores de estado sólido**

São constituídos de um ou mais óxidos metálicos de metais de transição, que são depositados em finas camadas sobre substratos em chips. Um elemento de aquecimento é adicionado ao sensor, para elevar a temperatura ao nível certo para a detecção do gás.

Na presença do elemento a ser medido, o óxido metálico causa uma dissociação do gás, gerando transferência de elétrons. Um par de eletrodos mede a mudança de condutividade, e gera um sinal proporcional à concentração do gás.

Os fatores negativos para a fabricação desses sensores são:

- infraestrutura especializada para a fabricação de semicondutores específicos para a detecção de gases.
- só há dissociação dos gases em temperaturas elevadas, acima de 260°C (SCHAEFFER, 2004; LEÓDIDO, 2006).

### **2.2.1.3-Sensores baseados em Espectroscopia Molecular**

Segundo Banwell (1972) espectroscopia molecular “é o estudo da interação entre ondas eletromagnéticas e matéria.”

A vantagem de se usar esse método para mensurar poluentes atmosféricos é que a interação entre a luz e as moléculas é específica, ou seja, a luz pode ser absorvida ou emitida em comprimentos de onda específicos.

Cada molécula reage diferentemente às interações com o espectro eletromagnético, sendo que sua identificação por essa técnica não tem interferência de outras moléculas.

As técnicas de espectroscopia podem ser feitas por absorção ou emissão.

#### **I)Técnicas de absorção**

A técnica de absorção consiste na interação entre radiação e concentração da molécula, as quais podemos citar:

- Espectroscopia de absorção ótica diferencial (DOAS em inglês): Utiliza uma fonte com banda larga de frequência e um espectroscópio de auto-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 (TIR 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.

- Raio infravermelho não dispersivo (NDIR em inglês): Filtros óticos limitam o espectro em uma faixa de comprimento de onda, onde a interferência de outros gases é a menor possível. A absorção total do gás é proporcional à intensidade de luz medida com um fotodetector. Essa é a técnica padrão pra medição de  $\text{CO}_2$ .

- Absorção espectroscópica por laser de diodo ajustado (TLDS 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 (LEÓDIDO, 2006, p. 35).

## II) Técnicas de emissão

Essa técnica basicamente analisa a luz emitida pelas moléculas e como essa retorna a base. As técnicas padrões são:

- Chama fotométrica: as moléculas são separadas e ionizadas através da queima do gás, analisando cada elemento da molécula. Essa técnica não é muito específica, mas é muito rápida.

- Luminescência química: é feita a medição da luz emitida na reação química entre o gás de amostra e o gás a ser mensurado.

- Fluorescência ultravioleta: quando o gás de amostra é excitado por um raio ultravioleta, mede-se a fluorescência deste (SCHAEFFER, 2004; LEÓDIDO, 2006).

### 2.2.2-Sensor de CO2 NDIR

Basicamente os sensores baseados na absorção por infravermelho são compostos por um ou mais sensores de radiação infravermelha, um meio de transmissão, podendo ser composto por um ou mais caminhos para a radiação em um ou mais detectores.

Cada molécula absorve maior ou menor energia em um comprimento de onda específico.

Conforme a lei de Beer-Lambert, a quantidade de energia absorvida depende da concentração do gás presente na trajetória do feixe e do coeficiente de absorção da molécula.

$$a(\lambda) = e(\lambda)bc$$

Onde:

$a(\lambda)$ : absorção

$e(\lambda)$ : coeficiente de absorção no comprimento de onda  $\lambda$

b: comprimento ótico

c: concentração do gás

O CO<sub>2</sub> absorve bem a radiação no comprimento de onda em torno de 4,27 $\mu$ m.

Os sensores de absorção na faixa do infravermelho não dispersivos são muito usados em indústrias. Neste método, a luz transmitida pela amostra em um comprimento de onda em que a mesma absorve energia é comparada com a intensidade de luz transmitida em outro comprimento de onda, onde não haja absorção. Pela razão entre as intensidades de radiação infravermelha transmitidas nestes dois comprimentos de onda se obtém a densidade de moléculas em estudo.

As configurações mais usadas pelos sensores NDIR são:

- Feixe IV único, com comprimento de onda único (SBSW = Single Beam Single Wavelength);
- Feixe duplo, com dois comprimentos de onda (DBDW = Dual-Beam Dual Wavelength);
- Feixe único, com dois comprimentos de onda (SBDW = Single Beam Dual Wavelength);

A lei de Beer-Lambert diz que a absorção em um dado comprimento de onda é diretamente proporcional ao comprimento ótico e a concentração do gás. Através de um feixe monocromático se obtém a concentração de um gás, sem que o mesmo tenha interferência de outros gases que podem estar misturados ao gás em análise, como é o caso do CO<sub>2</sub> na atmosfera.

De acordo com os tipos de fontes emissoras de IV, pelo caminho ótico entre fonte e detector e pelos diferentes sensores que podem ser usados, os sensores NDIR podem ter varias opções quanto a construção.

Lâmpadas de filamento, radiadores tipo Nernst ou Globar, LEDs especiais ou outros emissores de estado sólido podem ser usados como fontes de IV.

A distância entre emissor e detector podem ser dotados de espelhos e/ou prismas para aumentar a distância ótica, e podem ser usados para se realizar o comprimento ótico desejado.

Para detectar a intensidade de radiação podem ser usados: detectores térmicos, opto-acústicos ou fotoelétricos. Nos detectores térmicos, a radiação incidente eleva temperatura, e conseqüentemente altera parâmetros físico-químicos do sensor. Pode-se destacar os bolômetros, as termopilhas e os sensores piroelétricos. O bolômetro é um resistor termicamente isolado, que tem sua resistência alterada de forma proporcional ao aumento de temperatura, ao ser exposto a radiação.

A termopilha é uma associação em série de uma quantidade variável de termopares, de forma a aumentar o potencial elétrico na saída pela soma dos potenciais individuais.

Os detectores piroelétricos fornecem uma corrente elétrica através da variação da polarização elétrica de materiais ferroelétricos usados como dielétricos em um capacitor. A variação desta polarização com a temperatura faz variar cargas elétricas induzidas nas placas do capacitor, circulando uma corrente no circuito externo.

Detectores opto-acústicos são os que a radiação incidente causa uma variação nas suas propriedades acústicas. São usados microfones, capacitores ou sensores de pressão acoplados as câmaras seladas.

Nos detectores fotoelétricos a absorção de um fóton causa a excitação de elétrons com a liberação de um par elétron-lacuna. Os detectores fotoelétricos onde não há emissão são os chamados de efeito fotoelétrico interno (caso de todos os sensores baseados em semi-condutores). Dentre estes, os fotocondutores usam propriedade dos materiais semi-condutores para terem sua condutividade aumentada com a exposição de uma radiação, de forma proporcional à intensidade da potência da radiação. Os fotocondutores tendem a ter menor custo, porém com sensibilidade menor.

O sensor mais adequado para o projeto foi o do tipo NDIR. Com relação ao caminho ótico foi escolhido um caminho ótico simples, sem o uso de lentes e/ou espelhos, visando reduzir os custos.

Com relação à configuração foi escolhida a configuração SBDW, onde se é usado apenas um emissor para um detector com 2 filtros ou dois detectores, cada um operando em um comprimento de onda diferente. Em geral, um dos caminhos óticos contém um gás de referência, geralmente o nitrogênio, e no outro o gás a ser medido. No feixe que contém o gás de referência, este chega ao detector sem ser absorvido, enquanto no outro caminho ótico, o gás é absorvido proporcionalmente a sua concentração. Essa é a configuração que tem prevalecido, pois é possível fazer uma compensação na variação das fontes bem como variações na temperatura ambiente (que altera o coeficiente de absorção), sem ter que usar duas fontes emissoras, como é o caso da configuração DBDW. A configuração mais simples é a SBSW, porém a que tem mais deficiências e erros (SCHAEFFER, 2004).

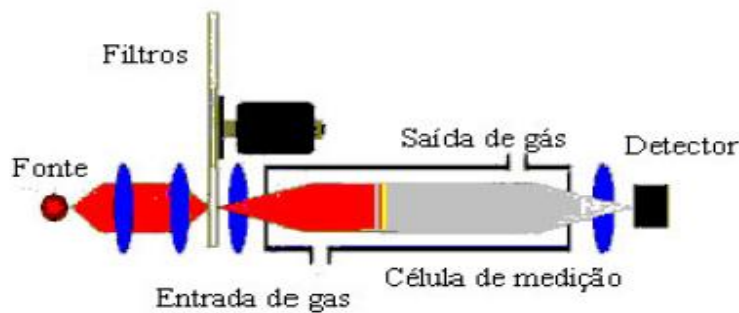


Figura 2.4– Esquema do sensor SBDW

Fonte: SCHAEFFER (2004)

### 2.2.2.1-Fundamentos teóricos de um sensor NDIR

Um sensor NDIR pode ser representado pelo diagrama funcional abaixo:

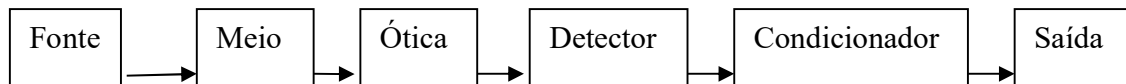


Figura 2.5 – Diagrama funcional do sensor

Fonte: SCHAEFFER (2004)

A fonte gera o sinal infravermelho, passando por um meio e por filtros óticos chegando ao detector, cujo sinal é amplificado e condicionado eletronicamente para gerar uma saída proporcional à concentração do gás (SCHAEFFER, 2004).

### 2.2.2.2-Projeto e construção do sensor de $CO_2$

O sensor em estudo foi dividido em dois blocos: um analógico e outro digital. O bloco analógico é a parte principal do sensor, pois nele estão a fonte de infravermelho, o

detector e o condicionador de sinais. O bloco digital é constituído basicamente por um microcontrolador, um mostrador de cristal líquido e uma interface serial RS-232. Este bloco faz a calibração do sensor por software e também permite a interface com outros dispositivos de controle.

Cada bloco do sensor foi implementado em uma placa de circuito impresso diferente, para se obter maior flexibilidade e maior separação entre sinais digitais e analógicos (SCHAEFFER, 2004).

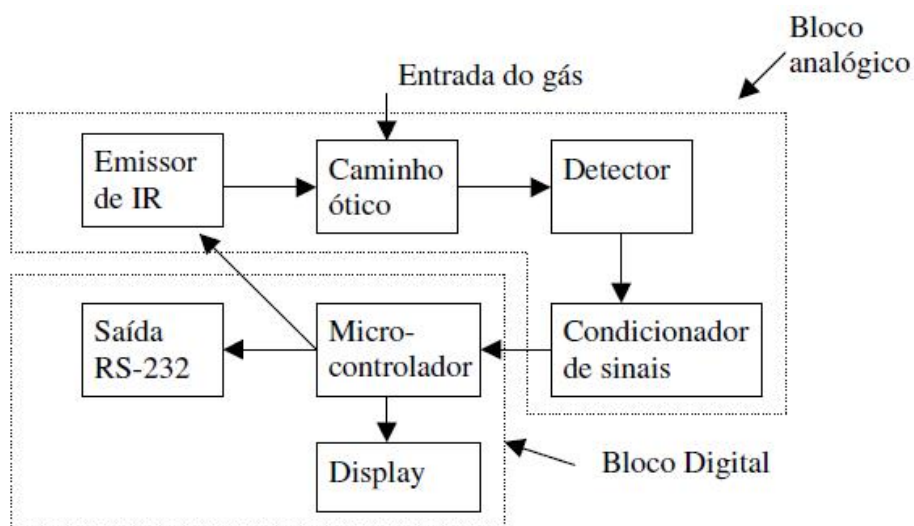


Figura 2.6 – Diagrama em blocos do sensor

Fonte: SCHAEFFER (2004)

#### 2.2.2.2.1-Desenvolvimento do bloco analógico

O bloco analógico é a parte principal do sensor e contém a fonte de infravermelho e o detector.

I) Seleção do emissor e do detector



Buscou-se emissores de estado sólido, pois são os emissores mais usados, os quais podem-se citar os LEDs ternários e quaternários. Foi selecionado um LED ternário, modelo LED42-60 em HgTeCd, de 4,2 $\mu$ m, da empresa RMT que possui uma ótima emissão nesse comprimento de onda.

O tipo de detector escolhido foi um de estado sólido, do tipo fotoresistor da mesma empresa, por ser vendido junto com o emissor, chamados de pares óticos. Foi testado o par ótico 4239, com filtro ótico nos comprimentos de onda de 3,9 $\mu$ m e 4,2 $\mu$ m. O comprimento de onda 3,9 $\mu$ m é utilizado em sensores de gás como CO, CO<sub>2</sub> e outros, para o sinal de referência em configurações SDDW e DBDW por não existirem na atmosfera moléculas que tenham absorção neste comprimento de onda. Porém os ensaios não foram satisfatórios e buscou-se por outras alternativas.

Foram testados os detectores térmicos. Dentre esses as opções mais viáveis em termos de custo/benefício são as termopilhas e os detectores piroelétricos, pois os bolômetros teriam um custo elevado, já que teria que ser construída uma câmara termicamente isolada.

Houve a hipótese de se usar os sensores piroelétricos de baixo custo. Esse tipo de sensor consiste em obter fonte emissora de banda estreita ou através de uma banda larga com filtro ótico adequado para se obter uma banda estreita. Testou-se o LED42-60 com este tipo de detector e não se obteve êxito. Com uma lâmpada incandescente como fonte, obteve-se melhor resposta. O problema ficou por conta que tanto o emissor quanto o detector são de banda larga, não permitindo a detecção do CO<sub>2</sub>.

Restou-se a busca por emissores e detectores de banda estreita, seja por construção ou pela incorporação de filtros óticos no seu encapsulamento. As opções incluíam emissores com lâmpadas de filamento especiais ou LEDs, o que já foi testado.

Efetivamente as lâmpadas em miniatura encontradas no comércio local mostraram que podem ser utilizadas para este fim, o problema é sua limitada vida útil. Porém optou-se por trabalhar com tensão de alimentação reduzida, aplicando 9V em lâmpadas de tensão nominal de 12V. Segundo RYER (1998, citado por SCHAEFFER, 2004), dados mostraram

que uma redução de 15% na tensão de alimentação de lâmpadas incandescentes permite um aumento na sua vida útil de 800%. Assim o emissor do sensor foi definido como lâmpadas em miniatura, tamanho T1, diâmetro de 3,18mm, comprimento de 6,35mm, tensão nominal de 12V, corrente nominal de 80mA, vida útil de 20000 horas, intensidade luminosa de 0,23 MSCP (Mean Spherical Candle Power), como as lâmpadas modelo BS4-120080C da empresa Big Sun.

Para detector foi escolhido a termopilha, modelo ST60R, da Dexter. Cada termopilha tem um filtro ótico incorporado no encapsamento e é composta por 80 termopares, tendo área de detecção de 0,67x0,67mm, com uma detectividade típica

$$d_e D^* = 1 \times \frac{10^8 \text{ cm}}{\sqrt{\text{Hz/W}}}$$

, responsividade típica de 48,9 V/W e resistência típica de 50KΩ. Os filtros óticos são de 4,27μm com FWHPBW de 0,19μm e de 3,9μm com FWHPBW de 0,2μm.

## II)Desenvolvimento do condicionador de sinais

Visando a obtenção de um sinal próximo a 5V na saída do condicionador para condição de ar fresco, com 300ppm de  $CO_2$ , partindo dos 13,96μV foi necessário dar um ganho de  $4,8V/13,96\mu V \approx 284000$ , implicando em pelo menos dois estágios de amplificação, um inicial que foi pensado em usar com amplificador de instrumentação com ganho 1000 e outro com ganho 284.

Para isso foi desenvolvido um protótipo com amplificadores de instrumentação Burr-Brown INA102, com ganho 1000. Esse protótipo serviu para verificação do sinal gerado pela termopilha e também definir a melhor distância entre emissor e detector. Porém o aquecimento gerado pela fonte IV acabou causando uma deriva térmica no sinal que não conseguiu como pensar de forma satisfatória. Também houve presença significativa de ruído.

Foi escolhido a técnica chopper e similares, pois esta permite minimizar os erros dos amplificadores, e encontrou-se um modelo interessante de amplificador, lançado em

2003 pela Analog Devices, modelo AD8628. Este modelo consegue ter um offset típico de  $1\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , associado a um ganho de 140 dB, CMRR de 130dB e além disto têm entre 0,1 e 10Hz, ou de  $10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  para  $f \approx 1\text{Hz}$  e  $I_r$  de  $5\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ . Seu custo é bem menor do que outros amplificadores.

Desenvolveu-se um protótipo de circuito usando este amplificador. O projeto inclui limitações de banda de amplificação em 1Hz para minimizar o ruído de saída, já que quanto menor a banda menor o ruído total.

Foi elaborado um layout para a placa impressa com todos os cuidados que a literatura recomenda.

Com esta nova placa iniciaram-se os testes no protótipo onde se verificou que o fluxo efetivo é de  $9,088 \times 10^{-8}\text{W}$ . É o que consegue chegar ao detector à concentração de 330ppmv de  $\text{CO}_2$ .

Considerando este fluxo efetivo de  $9,088 \times 10^{-8}\text{W}$  para 330ppm de  $\text{CO}_2$  e transmitância  $\tau = 0,375$ , a intensidade de radiação  $L_0$  pela lei de Beer pode ser calculada, onde se obtém:

$$L(5,5)330 = 0,5868L_0 = \Phi_{\text{eff}} / 7,9318 \times 10^{-5} \tau = 3,055 \times 10^{-3}\text{W}$$

$$L_0 = 5,207 \times 10^{-3}\text{W}$$

Admitindo então que a maior intensidade de radiação obtida seja está de 5,207mW, pode-se calcular a intensidade do feixe à concentração de 2000ppm:

$$L(5,5) = 0,03955L_0 = 2,059 \times 10^{-4}\text{W}$$

O que se traduz num fluxo efetivo de  $6,126 \times 10^{-9}\text{W}$  gerando um sinal de 299,5 nV na termopilha escolhida. Com 18000 de amplificação do primeiro estágio chega-se a um sinal de 5,39mV de saída neste estágio (SCHAEFFER, 2004).

#### 2.2.2.2-Desenvolvimento do bloco digital

O bloco digital é constituído por um microcontrolador PIC 16F876, de 8 bits, com memória flash, 8K de memória de programa, 368 bytes de SRAM e 256 Bytes de EEPROM, rodando a 16 MHz, além do conversor AD serial de 12 bits, com dois canais, modelo LTC1298 e um display de cristal liquido 12x16. Os motivos para a escolha deste microcontrolador foram: a existência de conversor AD interno de 10 bits, a disponibilidade de ferramentas de desenvolvimento de baixo custo e o baixo custo de aquisição deste componente.

Pelo fato da resolução do conversor de 10 bits não ser suficiente foi adicionado um conversor AD 12 bits externo, com dois canais, serial, também de baixo custo.

O microcontrolador tem a função principal de implementação do algoritmo de conversão dos sinais vindos da placa analógica em valores de concentração de  $CO_2$ .

O microcontrolador é responsável pelo chaveamento da fonte IV acionando um MOSFET que alimenta a lâmpada. A radiação emitida pela lâmpada é detectada pela termopilha dupla, nos dois comprimentos de onda, o da medição da concentração de  $CO_2$ , em  $4,2\mu m$  e o de referência em  $3,9\mu m$ . A placa analógica amplifica estes sinais e os envia para a placa digital, onde o microcontrolador comanda o conversor LTC 1298 para a seleção do canal de medição que fez a conversão, e para disponibilizar os valores digitalizados.

O software foi desenvolvido em linguagem C, utilizando o compilador PCM, da empresa CCS, específico para a família de microcontroladores PIC (SCHAEFFER, 2004).

#### 2.2.2.3-Ensaio e testes

A concentração de  $CO_2$  é variável em um ambiente onde existem pessoas, caso típico de um laboratório de ensaio, o projeto da bancada de testes deve isolar ou minimizar os efeitos da presença de humana. Por isso a bancada foi idealizada inicialmente com câmara fechada, tendo abertura apenas para a passagem dos cabos de interconexão e para a

mangueira de entrada de gás ou de misturas de ar com diferentes concentrações de  $CO_2$ . Dentro desta câmara foi colocado o sensor desenvolvido e um medidor comercial, modelo 2810 Analyzer, da empresa Bacharach Inc, como sensor de referência.

As leituras do sensor desenvolvido foram enviadas pela interface RS-232 para um computador, sendo armazenada em planilha de dados para estudo do coeficiente de conversão em valores de concentração de  $CO_2$ . Já os dados do sensor comercial foram lidos diretamente nos respectivos mostradores. A partir da combinação e análise destes dados buscou-se a equação que melhor representasse a função de transferência correspondente.

Os ensaios realizados para a caracterização foram:

- Levantamento da função de transferência;
- Verificação da faixa de medição do sensor;
- Repetibilidade;
- Exatidão;
- Resolução;
- Histerese;

Os primeiros ensaios foram para a verificação da repetibilidade, usando ar fresco como referência, com seus 330ppm de  $CO_2$ . O medidor comercial usado como comparação possui um sistema de calibração com ar fresco. Foram realizados ensaios de comparação entre o sensor desenvolvido e o medidor comercial.

Em 96 leituras, realizadas em horários intercalados e aleatórios durante três dias, obteve-se um valor médio de 350ppm, no medidor comercial e no sensor desenvolvido, com desvio padrão de 6,81ppm de leitura máxima de 364ppm e mínima de 327ppm, portanto um erro máximo em relação a um padrão de 23ppm ou 6,57%. Para a determinação do valor de 350ppm fez-se a média das leituras e atribuiu a esta média o equivalente a 350ppm, pois ainda não se tinha a função de transferência.

Os ensaios para a verificação da histerese constituíram em 20 repetições de ciclos entre ar fresco e concentração de 3000ppm, mais 20 repetições de ciclos entre ar fresco e concentrações de 2000ppm. Obteve-se então que o sensor desenvolvido acompanha razoavelmente o sensor comercial de referência.

OBS: Definição de exatidão: O Vocabulário Internacional de Termos Básicos e Gerais de Metrologia, VIM-INMETRO (1995), define o termo exatidão como sendo a aproximação entre o valor de uma medição e o valor real mensurado. A determinação do valor real do mensurando é feita através de padrões internacionalmente aceitos. No caso de gases, não há padrão para cada mistura de gás. A maior fonte de incerteza na medição da concentração de  $CO_2$  é no preparo das misturas das amostras de referência. No caso, não existe padrão internacionalmente de ar com 330ppm de  $CO_2$  para se comparar e obter a exatidão.

Tendo em vista esta limitação para a determinação da exatidão e de outras especificações técnicas, buscou-se padrões aceitáveis para o teste do sensor. Então obteve-se amostras de gás certificados dos laboratórios da empresa White Martins, nas concentrações de 1000, 2000 e 5000ppm, cujos valores certificados ficaram em 1013, 2002 e 5038ppm. Aliado a concentração de ar fresco, internacionalmente aceita como sendo 320 e 330 ppm, tem-se uma gama de padrões para caracterizar o sensor.

Precedeu a realização de diversos ciclos de medição entre ar fresco e próximo a 10000ppm, valor máximo que o medidor de referência consegue ler. Com base nos dados destes ensaios, levantou-se o coeficiente de calibração que foram utilizados no software para corrigir os valores lidos pelo microcontrolador, via conversor AD. Para a verificação final da exatidão utilizou-se amostras de gás certificado. Nos testes realizados houve discrepância semelhante nos dois medidores, o desenvolvido e o comercial. Não se conseguiu determinar o motivo de tal fato.

Em relação à faixa de medição, o objetivo é alcançar concentrações de 330 até 3000ppm de  $CO_2$ . O sensor desenvolvido conseguiu medir valores superiores a 10000ppm de  $CO_2$ .

Para testes de resolução, usou-se o sensor comercial, cuja resolução de 10 ppm é o dobro da prevista no projeto. Tendo em vista os objetivos do projeto, este quesito é um dos menos importantes, por isto os ensaios resumiram-se a testes comparativos entre o sensor comercial e o desenvolvido. Não se atestar com confiabilidade o valor da resolução, pois

associado ao seu cálculo existem erros ocasionados pela incerteza dos valores lidos em ambos os sensores.

Atingindo um desempenho satisfatório, fez-se um levantamento dos custos do sensor e chegou-se a um custo de material de aproximadamente US\$69,00, ficando dentro do previsto nos objetivos iniciais do projeto, que era de US\$150,00 (SCHAEFFER, 2004).

### **2.2.3-Principais fabricantes e fornecedores do sensor de CO<sub>2</sub>**

Realizou-se uma pesquisa em sites especializados em instrumentação meteorológica e ambiental com a finalidade de obterem-se informações sobre esses sensores, fabricantes e custo.

Todos os sensores pesquisados para medições de dióxido de carbono, que possuam uma faixa de medição dentro dos limites necessários e características voltadas para a análises atmosféricas, são de fabricação internacional. Seu custo é relativamente caro, e por necessitarem de importação, acabam elevando ainda mais o seu custo.

A calibração destes sensores depende das informações técnicas fornecidas por cada fabricante e equipamento.

Tabela 3- Informações sobre os sensores de  $CO_2$  pesquisados, com seus respectivos fabricantes e fornecedores.

Fabricante	Modelo	Intervalo de Medição	Precisão	Princípio de funcionamento	Representante comercial
Vaisala	GM70	0 à 2000 ppm	$\pm(1.5\%$ do intervalo + 2% de leitura)	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Hobeco
Vaisala	GMP343	0 à 1000 ppm	$\pm(3$ ppm + 1 % de leitura)	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Hobeco
Vaisala	GMT220	0 à 2000 ppm	$\leq \pm[20$ ppm $CO_2$ + 2% de leitura}	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Hobeco
Li-Cor	LI-820	0 à 1000 ppm	< 2,5% de leitura)	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Alem Mar Commercial e Industrial S.A.
Li-Cor	LI-840 $CO_2/H_2O$	0 à 3000 ppm	Menor que 1,5% de leitura	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Alem Mar Commercial e Industrial S.A.
Li-Cor	Li 7000 $CO_2/H_2O$	0 à 3000 ppm	1% nominal	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Campbell Scientific e Alem Mar Commercial e Industrial S.A.
Li-Cor	LI 7500A $CO_2/H_2O$			Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Alem Mar Commercial e Industrial S.A.
PP Systems	WMA-4	0 à 1000 ppm	< 1% da concentração	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Campbell Scientific
PP Systems	EGM-4	0 à 1000 ppm	< 1% da concentração	Infra-vermelho não dispersivo (NDIR)	Campbell Scientific



### 3-Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

A constante e crescente preocupação com as mudanças climáticas têm exigido um grande esforço de órgãos públicos e privados na adoção de técnicas que minimizem ou mitiguem os impactos advindos dessas mudanças.

A elaboração desse trabalho teve como objetivo mostrar e levantar a importância de se medir e monitorar os gases efeito estufa, em especial o dióxido de carbono, e também na obtenção de informações relevantes sobre os tipos de sensores de medição desse gás e seu princípio de funcionamento, visando auxiliar no processo escolha/ compra do sensor de dióxido de carbono que será usado não somente no projeto “Unidades Remotas de Monitoramento Ambiental”, bem como em outros projetos de monitoramento e quantificação de  $CO_2$ .

Como sugestão para trabalhos futuros, espera-se que as informações contidas neste trabalho possam subsidiar o desenvolvimento de novos sensores para a medição de dióxido de carbono na atmosfera com um custo relativamente mais barato do que os sensores disponíveis no mercado atualmente, os quais possuem um custo elevado e basicamente não há fabricação nacional deste tipo de sensor.

#### Referências bibliográficas

ABREU, G.C.; MELO, G.C.B. Metodologia para a de uma rede de monitoramento contínuo de efluentes atmosféricos em uma indústria siderúrgica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA, 19., 1997, Foz do Iguaçu. **Anais...**Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária. P. 2552-2567.

BANWELL, C.N.; MCCASH, E.M. **Fundamentals of molecular spectroscopy**. 4ªed. London: McGrawHill, 1994. 308p. ISBN (0-07-707976-0).

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. 2ª Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305p. ISBN (85-87918-05-2).

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2003. 75p. ISBN (85-87090-90-9).

LEÓDIDO, L.M. **Desenvolvimento de métodos e meios para a calibração dinâmica de transdutores de gases de efeito estufa**. 2006. 106p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2006.

LISBOA, H.M. **Controle da poluição atmosférica**. Universidade de Santa Catarina, 2005

MEDIÇÃO de  $CO_2$  em incubadoras – perguntas e respostas. 2009. 6p. Disponível em:  
<<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CO2-Measurement%20in-Incubators-B210826PT-A-LoRes.pdf>>

Acesso em 03 fev. 2011. Ref. (B210826PT-A).

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Mudanças climáticas**. Desenvolvido por Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em:  
<<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4007.html>>

Acesso em: 27 mai. 2011.

MOLION, L.C.B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista brasileira de climatologia**. p. 7-24, Ago. 2003. ISBN (1980-055X).

OFFICE NATIONAL DES FORÊSTS (ONF). [Sem título]. 1 imagem. Disponível em:  
<[http://www.reflorestamentoecarbono.com.br/novo/portal/view\\_contexto.php](http://www.reflorestamentoecarbono.com.br/novo/portal/view_contexto.php)>

Acesso em: 02 jun. 2011.

OLAYA, A.M.S. **Emissão de dióxido de carbono após diferentes sistemas de preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar.** 2010. 101p. (CDD 633.61S586e). Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Piracicaba, 2010.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA CLIMÁTICA. **Mudança climática 2007.** Paris, 2007. Versão em português iniciativa da Ecolatina.

PROTOCOLO de Quioto. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 1997. 29p.

ROCHA, M.T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT.** 2003. 196p. (CDD333.7). Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Piracicaba, 2003.

SALBY, M.L. **Fundamentals of atmospheric physics.** 1ª Ed. San Diego: Academic Press, 1996. 627p. ISBN (0-12-615160-1).

SÃO PAULO(Estado). Secretaria do Meio Ambiente. **Mudanças climáticas.** Desenvolvido por Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Disponível em:

<http://www.ambiente.sp.gov.br/wp/mudancasclimaticas/>

Acesso em: 27 mai. 2011.

SCHAEFFER, R.D. **Estudo e desenvolvimento de um sensor de CO2 de baixo custo.** 2004. 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Porto Alegre, 2004.

SCHNEIDER, S.H. The green house effect: science and policy. **Science.** v.243, p.771-781, February 1989.

SKOOG, D.A. ET AL. **Fundamentos da química analítica.** 8ª ed.

SOUZA, P.F.M. **Metodologias de monitoramento de projetos MDL: uma Análise estrutural e funcional.** 2005. 102p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2005.

STULL, R.B. **Meteorology for scientists and engineers.** 2ª Ed. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000. 502p. ISBN (0-534-37214-7).

STULL, R.B. **Meteorology for scientists and engineers.** 2ª Ed. Pacific Grove: Brooks/Cole, 2000. 502p. ISBN (0-534-37214-7).

VESILIND, P.A.; MORGAN, S.M. **Introdução à engenharia ambiental.** Tradução All tasks. 2ª Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010?. 438p. Tradução de: Introduction to environmental engineering.