



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ
EDNARDO MOREIRA RODRIGUES

PRODUÇÃO DE UM MEDIDOR DA CONCENTRAÇÃO DE
VAPOR D'ÁGUA

FORTALEZA - CEARÁ

2010

EDNARDO MOREIRA RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE UM MEDIDOR DA CONCENTRAÇÃO DE
VAPOR D'ÁGUA**

Monografia apresentada ao Curso de Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau em Licenciatura.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida

FORTALEZA - CEARÁ

2010

R696p Rodrigues, Ednardo Moreira
Produção de um medidor da concentração do vapor
d'água/Ednardo Moreira Rodrigues. – Fortaleza, 2010.
37p; il.
Orientador: Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida.
Monografia (Graduação em Física) – Universidade
Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia.
1.Vapor d'água. 2.Absorção de infravermelho. 3.Pressão de
vapor. 4.Física. I. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ci-
ências e Tecnologia.

EDNARDO MOREIRA RODRIGUES

**PRODUÇÃO DE UM MEDIDOR DA CONCENTRAÇÃO DE VAPOR
D'ÁGUA**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Graduação em Física do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau em Licenciatura.

Aprovada em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida (Orientador)

Universidade Estadual do Ceará

Prof. Msc. Marcos Antônio Tavares Lira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva

Universidade Estadual do Ceará

A meus pais amados, Rogério e Iracema

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, que tanto me permitiu até este momento;

Ao Prof. Dr. Gerson Paiva Almeida, pela a oportunidade e por guiar-me neste trabalho;

Aos meus grandes amigos Francisco Jackson e Marcelo Barbosa, pelo convívio, apoio e incessante motivação para meu progresso;

Aos professores de Física da Universidade Estadual do Ceará, Antônio Carlos Santana dos Santos, Emerson Mariano da Silva, Humberto de Andrade Carmona e João Bosco Verçosa Leal Junior pela fundamental ajuda e contribuição para minha formação;

Ao Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas (MCFA), pelo uso do laboratório;

Aos amigos de pós-graduação e graduação, Junior, Vinícius, Camylla, Arthur, Rafael e Francisco, ao lado de quem tive experiências edificantes e motivadoras;

Aos funcionários do MCFA “Dona” Graça e César Camelo, pela grande apoio, amizade e convívio;

Ao CNPq, na pessoa do seu Presidente, Prof. Dr. Marco Antonio Zago, pelo apoio financeiro via bolsa de Iniciação Científica;

Ao Prof. Dr. Coutinho, ao aluno de graduação, Átila Girão do curso de Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Artes e Ciências, e aluno de graduação da Universidade Estadual do Ceará, Antônio Serafim pela ajuda no desenvolvimento de circuitos eletrônicos;

Em especial, aos meus amados pais, Monoel Rogério Rodrigues e Maria Iracema Moreira Rodrigues, minhas irmãs e seus noivos, Elizângela e André, Rosângela e Junior, familiares e amigos pelo apoio, força e amor, essa vitória também é de vocês.

“O homem como cientista é amoral. Só é moral como homem, não se preocupa se o que descobre vai ser usado para o bem ou para o mal. Como toda descoberta científica dá mais poderes sobre a natureza, ela pode aumentar o bem ou mal.”

César Lattes

RESUMO

Em geral os medidores de concentração de gases são baseados no princípio de que certos gases absorvem radiação infravermelha num comprimento de onda específico e muitas vezes único (HOWARD, 1959; GOODY e ROBINSON, 1951). Um medidor de gás consiste de uma fonte e um detector de radiação separado por uma célula gasosa. Os dispositivos convencionais tipicamente incluem vários componentes primários. Recentemente foram desenvolvidos um número de diodos emissores de luz (light emitting diodes, LED) infravermelha tendo bandas emissoras muito estreitas e que podem modular intensidade por meios eletrônico. O LED infravermelho pode assim substituir o conjunto da fonte de largo espectro, selecionador rotativo e filtro de banda fina do monitor de gás convencional de infravermelho, resultando num dispositivo de estado sólido, de baixa potência, compacto e quase livre de manutenção, com alta sensibilidade e estabilidade além de ser livre de vibrações mecânicas. Com esta configuração de estado sólido pode-se eliminar os efeitos de interferência e compensar as mudanças causadas na intensidade do LED por variações de energia e temperatura ou variações de sinal devido a desvios do detector. O objetivo deste trabalho é avaliar a concentração de vapor de água no ambiente a partir da técnica de infravermelho não dispersa. Testes realizados durante a execução deste trabalho mostraram que a utilização de diodos de 940 nm +/-50 nm podem ser utilizados na determinação de concentração de vapor d'água na atmosfera. No entanto, desenvolvimentos adicionais serão necessários para a conclusão do projeto.

Palavras – chaves: Vapor d'água, absorção de infravermelho, pressão de vapor, Física

ABSTRACT

In general, the equipments to measure gas concentration are based on the principle that gases absorb infrared radiation at a specific wavelength (HOWARD, 1959; GOODY and ROBINSON, 1951). A gas concentration measurement usually is performed using of a source and detector of radiation separated by the gas cell. Conventional devices typically include several primary components. Recently it has been developed a number of infrared LEDs (light emitting diodes, LED) that can have its intensity modulate by electronic means. The infrared LED can thus replace the entire source of broad spectrum rotary selector and narrow band thin monitor conventional gas infrared, resulting in a solid state device, low power, compact and almost maintenance-free, high sensitivity and stability as well as free from mechanical vibrations. With this configuration of solid state the interference effects can be eliminated using compensations for changes in intensity caused by variations of the LED power and temperature or variations in signal due to deviations from detector. The objective of this work is to evaluate a gas sensors of water vapor using the not disperse infrared technique. Tests conducted during the development of this work showed that the use of diodes 940 nm + / -50 nm can be used to evaluate concentration of water vapor in the atmosphere. However, further developments will be needed to complete the project.

Key-words: Water vapor, infrared absorption, vapor pressure, Physics

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Absorção de radiação pelo gás carbônico	21
Figura 2 - Absorção de radiação pelo vapor d'água	21
Figura 3 - Esquema do circuito da célula detectora	23
Figura 4 - Equipamento montado num tripé dentro de uma câmara refrigeradora	25
Figura 5 - Gráfico de tensão dada em volts, em função da temperatura em graus Celsius ...	26
Figura 6 - Ajuste exponencial da tensão em função da temperatura	27
Figura 7- Erro percentual do ajuste da média das medições de tensão à temperatura	27
Figura 8 - Gráfico da pressão de saturação do vapor d'água em função temperatura	28
Figura 9 - Gráfico do sinal de tensão em função da pressão de saturação de vapor	28
Figura 10 - Erro percentual do sinal de tensão em função da pressão de saturação de vapor.	29
Figura 11- Gráfico do tempo de resposta do equipamento	30
Figura 12 - Diagrama da absorção de um feixe de luz atravessando uma cubeta	35
Figura 13- Comportamento do diodo em sua polarização direta e inversa	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFUBRA – Associação dos Fumicultores do Brasil

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre mudanças Climáticas)

IR – Infra Red (Infravermelho)

LED – Light Emitting Diodes (Diodo Emissor de Luz)

NDIR – Non Dispersive Infra Red (Infravermelho Não Dispersivo)

ONU – Organização das Nações Unidas

USB – Universal Serial Bus (Conexão Serial Universal)

LISTA DE SÍMBOLOS

C – Concentração

e_s – Pressão de saturação

I – Intensidade de Radiação Emitida

K – Constante de absorção

L – Comprimento

P – Pressão

R – Constante Universal do Gases Perfeitos

S – Intensidade de Radiação Detectada

T – Temperatura

V – Tensão Elétrica

λ – Comprimento de onda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
3	PROBLEMATIZAÇÃO	18
4	METODOLOGIA	20
4.1	Monitores de Gás	20
4.2	Gás Carbônico e Vapor D'água	20
4.3	Sensores de Infravermelho Não Dispersivos	21
4.4	Sensor de Vapor D'água	23
5	PRINCIPAIS RESULTADOS	26
6	CONCLUSÕES	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Todas as nuvens são formadas pela mesma substância: a água, que flutua no ar em altitudes determinadas pelos ventos, pela temperatura e pelo sol. Apesar de seu volume relativamente pequeno, esse gás é um dos mais importantes componentes do ar. Sem ele não existiriam os fenômenos meteorológicos, nem a vida na Terra, tal como a conhecemos. A superfície terrestre permaneceria sufocada sob densas nuvens de poeira revolvidas pelo vento e sofreria as mais extremas variações de temperatura, pois o deslocamento do vapor de água, nos sentidos vertical e horizontal, constitui um dos mais importantes mecanismos de intercâmbio térmico do planeta.

Duas vezes por ano, 10 bilhões de toneladas de ar, carregados de vapor de água, cruzam o equador, passando do hemisfério em que é verão para o hemisfério em que é inverno. Esse processo contribui para moderar e equilibrar as diferenças de temperatura entre as regiões quentes e frias da Terra. E a capacidade que tem o vapor de água de absorver o calor proveniente da superfície terrestre desempenha um papel essencial na conservação do equilíbrio térmico, que possibilita a existência da vida na Terra. (AFUBRA, 2009).

Medidas de gases requerem, portanto, a utilização de equipamentos desenvolvidos para este fim. No entanto, como se sabe, equipamentos de detecção e medida de gases são equipamentos de tecnologia avançada e, obviamente, muito caros. Uma alternativa é o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo a partir dos fundamentos científicos dos equipamentos utilizados nos equipamentos normais, mas com o desenvolvimento de técnicas de correção de resultados equivalentes em exatidão.

O objetivo geral deste trabalho é dominar a técnica de medida de concentração importantes gases do efeito estufa, o gás carbônico pela técnica de utilização de infravermelho não dispersivo e o vapor d'água.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças climáticas (IPCC) concluiu que os aumentos antropogênicos em concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa estão afetando o clima global (IPCC, 2001). Trabalhos recentes indicam que a qualidade futura de serviços ambientais pode ser comprometida devido às mudanças do clima (WILKINSON *et al.*, 2002; HAYHOE *et al.*, 2004).

O vapor d'água é o maior agente do efeito estufa no planeta. Apesar de liberado por algumas atividades produtivas, as atividades humanas têm pouca influência sobre a quantidade de vapor na atmosfera, que varia com a temperatura de cada região, sendo mais abundante em zonas mais quentes. O aumento da temperatura do planeta pode levar à elevação do vapor liberado pelas fontes hídricas e aumentar a contribuição desse gás para o efeito estufa. Essa contribuição é mínima e a permanência do vapor d'água na atmosfera não passa de alguns dias. (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

De todo o calor que deixa a superfície da Terra, apenas cerca de 15% se perde no espaço. O resto fica retido pela atmosfera, devido, principalmente, à presença do vapor (AFUBRA, 2009). Além do mais, pesquisas permitiram obter informações do balanço hídrico de uma vasta região a partir do estudo dos campos de distribuição dos parâmetros que caracterizam o vapor d'água na atmosfera, podendo-se inferir o balanço hídrico de uma região a partir do estudo do “ramo aéreo” do ciclo hidrológico. (PEIXOTO, 1968, 1970). O que mostra a quantificação do vapor d'água na atmosfera como uma importante pesquisa.

A troca líquida de CO₂ nos ecossistemas é difícil de quantificar assim como o vapor d'água em escalas regionais, porque: (a) os forçantes (por exemplo, clima, uso e manejo da terra) são difíceis de quantificar; (b) as estimativas de trocas respiratória e fotosintéticas brutas de CO₂ são incertas; e (c) as medidas destas trocas são difíceis e caras de fazer. Atualmente, o IPCC estima as emissões de CO₂ usando dados contábeis para as emissões de combustíveis fósseis e uma combinação de exemplos de inventários e modelos empíricos para as trocas de CO₂ dos ecossistemas (FRANCO, 2002). O inventário e os métodos simples do balanço de carbono em alguns aspectos estão em situações de apenas estimar os estoque de car-

bono dos ecossistemas (por exemplo, a biomassa da parte de cima das plantas e o carbono orgânico do solo).

É difícil quantificar fontes permanentes e estocadoras ou dissipadores de carbono porque é caro estudar áreas grandes em detalhe suficiente e porque as grandes incertezas resultam nos cálculos dos valores de trocas dos ecossistemas como resultados de diferenças, pois o estoque pode ser muito grande. Por exemplo, um trabalho recente encontrou grandes inconsistências entre o fluxo de carbono estimado usando os dados do Departamento de Floresta dos Estados Unidos em Franco (2002) e o que foi estimado usando os dados fornecidos pelo Departamento de Floresta da Califórnia (WINROCK, 2004).

Em termos internacionais, a comunidade científica do ciclo de carbono se depara com o mesmo problema de fornecer estimativas confiáveis da troca líquida do CO₂. Como resposta existe a possibilidade sugerida como forma de pesquisa para fornecer uma aproximação robusta às estimativas de troca do CO₂ e do outro ciclo de carbono ou gases do efeito estufa das escalas regional às continentais (WOFSY e HARRIS, 2002). Os esforços similares estão sendo feitos tanto na Europa quanto nos Estado Unidos. Os Estados Unidos visionaram em combinar métodos de inventário de estoque de carbono da biosfera e das emissões de combustíveis fósseis, medidas diretas do fluxo do CO₂ e a monitoração atmosférica de concentrações do CO₂, todos acoplados com a análise inversa que emprega modelos de ecossistema-atmosfera e do transporte atmosférico.

As medidas atmosféricas facilitam aproximações independentes e complementam os valores de fluxo de CO₂ estimados. Os métodos de Micrometeorologia (por exemplo, fluxo de covariâncias de turbilhões) são empregados agora nas redes de torres para medir diretamente os fluxo de gás carbônico a longo prazo em comprimentos de escalas variáveis de 1-10 quilômetros (BALDOCCHI *et al.*, 2001) e em plataformas baseadas em avião que são usados para medir diretamente o fluxo de CO₂ a curto prazo nas escalas regionais de 10-100 quilômetros (DESJARDINS *et al.*, 1997).

No presente, as técnicas para as estimativas sazonais de fluxo de CO₂ e interanuais em escalas regionais maiores (~ 100-1000 quilômetros) estão sendo desenvolvidos. Alguma destes inclui modelos de mistura usando um traçador com uma taxa conhecida da emissão da fonte (BIRAUD *et al.* 2000; BIRAUD *et al.* 2002) e balanços atmosféricos da ca-

mada de limite baseados em suposições da dinâmica média na camada de limite atmosférica (LLOYD *et al.*, 2001; BAKWIN *et al.*, 2004; HELLIKER *et al.*, 2004). Como em todas as partes, as tentativas ambiciosas estão agora em tentar refinar as técnicas inversas desenvolvidas originalmente para estimar fluxo de CO₂ em escalas continentais às globais (CIAIS *et al.*, 1995; DENNING *et al.*, 1996a, b; GURNEY *et al.*, 2002).

Para atingir estas metas, são necessárias medidas confiáveis da concentração de CO₂ que podem ser realizada através das técnicas de espectroscopia gasosa. Em geral os medidores de concentração de gases são baseados no princípio de que certos gases absorvem radiação infravermelha num comprimento de onda específico e muitas vezes único (HOWARD, 1959; GOODY e ROBINSON, 1951). Um medidor de gás consiste de uma fonte (emitindo radiação em vários comprimentos de onda, incluindo o comprimento de onda absorvido pelo gás alvo) e o detector (que em geral absorve em vários comprimentos de onda) separados pela célula gasosa. Os dispositivos convencionais tipicamente incluem vários componentes primários: uma fonte de largo espectro, um selecionador rotativo, um filtro de banda fina, um tubo de amostra e um detector. Recentemente foram desenvolvidos um número de diodos emissores de luz (light emitting diodes, LED) infravermelhos tendo bandas emissoras muito estreitas e que podem modular intensidade por meios eletrônico, por exemplo, LED de InAsSbP (4.2 micron).

O LED infravermelho pode assim substituir o conjunto da fonte de largo espectro, selecionador rotativo e filtro de banda fina do monitor de gás convencional de infravermelho, resultando num dispositivo de estado sólido, de baixa potência, compacto e quase livre de manutenção, com alta sensibilidade e estabilidade além de livre de vibrações mecânicas. Com esta configuração de estado sólido pode-se eliminar os efeitos de interferência tal como compensar as mudanças causadas na intensidade do LED por variações de energia e temperatura ou variações de sinal devido a desvios do detector.

É dentro desta perspectiva que se insere este trabalho, que tem como objetivo produzir um instrumentos simples destinado a medir a concentração de um gas importante do efeito estufa e que tem papel fundamental dentro do ciclo hidrológico: vapor d'água.

Considerando-se este trabalho, abre-se a possibilidade de se entender o funcionamento da técnica de infravermelho não disperso, criando-se a possibilidade de criar equipamentos capazes de fazer sua detecção e medida.

3 PROBLEMATIZAÇÃO

Atualmente há três formas tecnologicamente importante na medida da concentração de CO₂ e vapor d'água entre outros gases. Primeiro, sistemas recentes tem utilizado uma tecnologia de pintura de filmes finos na qual receptores químicos complexos são embebido na mistura gasosa que se quer avaliar. A mudança da cor e das propriedades óticas do filme são modificadas e a concentração de CO₂ pode ser determinada (MILLS e CHANG, 1993; HE e RICHNITZ, 1995). No entanto, este tipo de detector utiliza materiais exóticos e caros que não são prontamente encontrados, são difíceis de construir e seu desempenho na presença de vários outros gases é incerta.

Segundo, instrumentos químicos de uso geral podem ser utilizados, mas tais equipamentos são muito caros. Cromatografia líquida e gasosa nas quais espécies químicas são isoladas através de reações químicas complexas são medidas independentemente (HESTER, 1995). Sistemas de cromatografia são tipicamente muito grandes, tipicamente de até um metro cúbico, e raramente adequado às medidas fora do ambiente de laboratório, o que dificulta enormemente o seu uso em ambientes remotos.

Por fim, o sistema mais comum e tradicional explora a absorção de energia ótica do gás carbônico e do vapor d'água na área do infravermelho do espectro eletromagnético. Luz num comprimento de onda específico, cerca de 4,3 μm para o gás carbônico e 1,2 μm ou 0,94 μm para o vapor d'água, atravessa um tubo, chamado de célula, contendo o gás amostra e a energia do feixe é absorvida na proporção da concentração do gás no volume da célula. Esta concentração é então definida através da Lei de Beer-Lambert (WATTS, 1983). Onde o acréscimo da concentração é indicado pela diminuição da intensidade do feixe atingindo um fotodetector.

Estes sistemas em geral requerem longos percursos óticos para poderem realizar as medidas das baixas concentrações de gás carbônico (< 5% numa mistura de gases), o que de certo modo acabava dando um volume relativamente grande ao instrumento. Um comprimento mínimo de 10 cm é necessário para determinações de concentrações menores do que 1%.

Gases de concentrações maiores, como o vapor d'água, porem, não requerem comprimentos tão grandes.

Foi desenvolvido um número de diodos emissores de luz (light emitting diodes, LED) infravermelhos tendo bandas emisoras muito estreitas e que podem modular intensidade por meios eletrônico. O LED infravermelho pode assim substituir o conjunto da fonte de largo espectro, seccionador rotativo e filtro de banda fina do monitor de gás convencional de infravermelho, resultando num dispositivo de estado sólido, de baixa potência, compacto e quase livre de manutenção, com alta sensibilidade e estabilidade além de livre de vibrações mecânicas. Com esta configuração de estado sólido pode-se eliminar os efeitos de interferência tal como compensar as mudanças causadas na intensidade do LED por variações de energia e temperatura ou variações de sinal devido a desvios do detector.

4 METODOLOGIA

4.1 Medidores de Gás

Em geral os medidores de concentração de gases são baseados no princípio de que certos gases absorvem radiação infravermelha num comprimento de onda específico e muitas vezes único (HOWARD, 1959; GOODY e ROBINSON, 1951). Um medidor de gás consiste de uma fonte (emitindo radiação em vários comprimentos de onda, incluindo o comprimento de onda absorvido pelo gás alvo) e o detector separados pela célula gasosa. Os dispositivos convencionais tipicamente incluem vários componentes primários: uma fonte de largo espectro, um seletor rotativo, um filtro de banda fina, um tubo de amostra e um detector.

Recentemente foi desenvolvido um número de LEDs infravermelhos tendo bandas emissoras muito estreitas e que podem modular intensidade por meios eletrônico, por exemplo, LED de InAsSbP (4.2 micron).

4.2 Gás Carbônico e Vapor D'água

Dióxido de carbono (CO_2) ou gás carbônico é um componente gasoso da atmosfera terrestre. A concentração natural de CO_2 no ar é de cerca de 0,04% ou 4000 ppm sendo este gás um forte absorvedor de radiação infravermelha. Como se pode ver na Fig. 1, embora o CO_2 tenha um espectro de absorção complexo, possui picos isolados em cerca de 2,7 μm e 4,3 μm de forma que a maioria das medidas no ar são baseadas no princípio da absorção infravermelha.

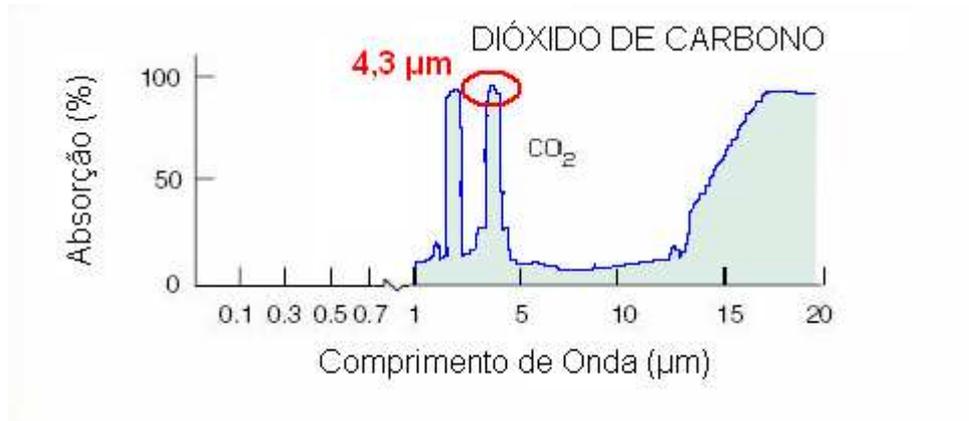


FIGURA 1 - Absorção de radiação pelo gás carbônico. Adaptado (AHRENS, 2000).

O vapor d'água é um gás de concentração variável na atmosfera dependendo fortemente da temperatura, sendo que os trópicos contêm muito mais água no ar do que uma região próxima aos polos. Este gás é o mais abundante dentre os gases do efeito estufa e o mais importante na determinação do clima da Terra, sem ele a temperatura média da Terra seria pelo menos 10 graus mais baixa. O espectro de absorção de vapor d'água é mais complexo do que o de gás carbônico, com picos na região de infravermelho entre 0,8 e 10 micrometro como se pode ver na Fig. 2.

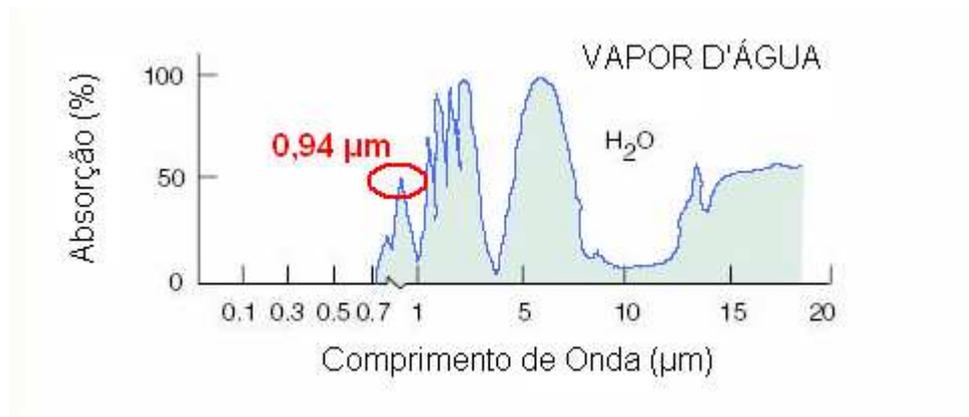


FIGURA 2 - Absorção de radiação pelo vapor d'água. Adaptado (AHRENS, 2000).

4.3 Sensores de Infravermelho Não Dispersivos

Nos sensores de infravermelho não dispersivos (Non Dispersive Infra Red, NDIR), uma fonte de infravermelho e o detector de infravermelho são separados por uma célula de amostra de gás. Um filtro óptico de “passa banda” é posto ou defrente a fonte ou do detector

para tampar toda radiação exceto aquela do comprimento de onda que é absorvida pelo gás alvo.

O sensor tem duas fontes infravermelhas (Lâmpada 1 e Lâmpada 2), um detector infravermelho e um filtro de banda ótica estreita que passa radiação infravermelha somente no comprimento de onda absorvido pelo gás de interesse (4,2 micrometros para o dióxido de carbono, por exemplo). As lâmpadas 1 e 2 são postas na célula de gás a distâncias L_1 e L_2 , respectivamente, do detector. Quando uma concentração C de gás estiver presente na célula gasosa, ela irá absorver a radiação infravermelha emitidas por ambas as fontes de acordo com a lei de Beer:

Sensor da lâmpada (L_1) sinal S_1

$$S_1 = I_1 e^{(-KCL_1)} \quad (1)$$

Lâmpada de referência (L_2) sinal S_2

$$S_2 = I_2 e^{(-KCL_2)} \quad (2)$$

Onde, K é a constante de absorção, C é concentração do gás e I é a Intensidade IR emitida pela fonte. Uma vez que a radiação da lâmpada 2 atravessa um caminho mais curto do que através do gás, ela será absorvida menos do que a radiação da lâmpada 1. A razão entre estes dois sinais mostra a mesma característica de uma célula equivalente de comprimento ($L_1 - L_2$).

$$R = \frac{S_1}{S_2} = \frac{I_1}{I_2} e^{-K(L_1 - L_2)} \quad (3)$$

A absorção calculada desta razão para o sistema de caminho diferencial pode ser utilizada par medir concentração de gás. A Lâmpada 2 atua como uma Referência Virtual ao sistema no comprimento de onda absorvido.

$$C = \frac{\ln(I_1/RI_2)}{K(L_1 - L_2)} \quad (4)$$

Essa técnica de medida de concentração de gás carbônico no ar por NDIR tem algumas vantagens sobre o outro método que utiliza sensores fotoacústicos, que apresentam: menor sensibilidade às variações de pressão, menor sensibilidade a vibrações e interferências acústicas e desenho compacto. Porém a técnica não foi testada neste trabalho pois o principal componente, o fotodiodo de $4,3\mu\text{m}$ é um componente caro e difícil de encontra-lo no mercado .

4.4 Sensor de Vapor D'água

Para detectar o vapor d'água pode-se utilizar um método mais simples sem “filtro de banda” e só com uma fonte de IR. A Figura 3 mostra o esquema utilizado para detectar o vapor d'água a partir da alimentação com uma fonte estabilizada de tensão contínua de 5,0 V.

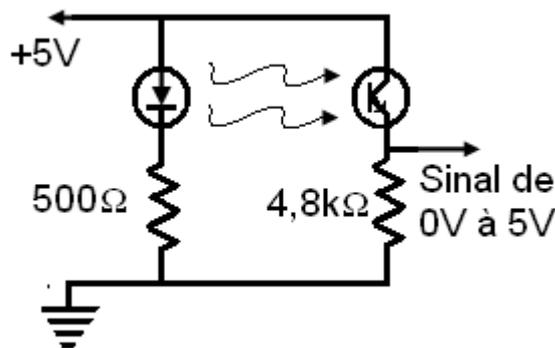


FIGURA 3 - Esquema do circuito da célula detectora. A melhor configuração testada. Somente com a umidade de um sopro atinge-se uma variação de 1,8V.

O fotodiodo emite IR com comprimento de onda de 940nm onde o vapor d'água possui pico de absorção isolado. Ao atravessar a célula de gás alvo, a radiação é absorvida de acordo com a lei de Beer-Lambert. Se nenhuma concentração de gás estiver na célula, a incidência de IR na base do fototransistor é máxima e a impedância é mínima. Deste modo a queda de tensão é mínima e o sinal é máximo de 5,0 V.

Se for injetado gás na célula, a incidência de IR na base diminui, a impedância aumenta e o valor do sinal de tensão diminui a até 0,0 V, quando nenhuma luz chegar até a base do fototransistor. O problema passa a ser, agora, o de determinar a concentração de vapor d'água na célula e estabelecer uma relação entre a concentração de vapor d'água e a tensão de saída do circuito proposto, ou seja, a calibração do equipamento eletrônico.

O procedimento para a calibração de um medidor da concentração de vapor d'água é relativamente simples e acessível. Ele é baseado no fato de que o vapor d'água apresenta uma curva típica para os valores de pressão de saturação em função da temperatura (PRUPPACHER e KLETT, 1997).

Um ambiente com grande quantidade de água em seu interior pode produzir um ambiente saturado de vapor d'água desde que haja um equilíbrio da quantidade de vapor que evapora da superfície da lâmina d'água e aquela que condensa. Este equilíbrio, desde que a superfície da água seja relativamente grande, depende somente da temperatura. Este ambiente pode ser claramente definido como uma câmara úmida. Controlando-se a temperatura pode-se, então, determinar os valores de intensidade luminosa em função da concentração de vapor.

Para proceder a metodologia utilizou-se uma câmara refrigerada onde água quente foi colocada a fim de produzir um ambiente no qual houvesse a saturação da razão de vapor do ambiente. Como a pressão de vapor é uma função da temperatura, o ambiente fechado aquecido garante a saturação. O fotodiodo e o fototransistor foram acoplados ao cano de 10 cm de tal modo que ficassem em extremidades opostas do diâmetro.

Os resistores e o multímetro foram colocados em malhas paralelas alimentadas pela fonte com uma tensão de 5,0 V como na Figura 3. O equipamento, por sua vez, ficou suspenso por um tripé construído com o cano de 2 cm de diâmetro. O sensor de temperatura foi posicionando na parte externa do cano de 10 cm. O equipamento foi colocado dentro da câmara resfriada com apenas os visores de temperatura e tensão do lado de fora para a leitura dos dados.



FIGURA 4 – Equipamento montado num tripé dentro de uma câmara refrigeradora.

A medição foi efetuada a partir de quando a água quente foi colocada na câmara. As leituras de tensão e temperatura variaram rapidamente até atingirem um mínimo e um máximo respectivamente. A partir desse momento a câmara passou a sofrer resfriamento lento, garantido assim a permanente saturação com o vapor d'água, ao mesmo tempo em que as tensões e temperatura foram registradas, sendo que a cada grau de temperatura foi registrada a sua correspondente tensão em planilha eletrônica. O processo de medição foi repetido mais três vezes em dias diferentes para verificar a repetição do fenômeno.

A partir do momento de admissão da água quente, a temperatura registrada no aparelho aumentou até um valor máximo e começou a diminuir, indicando a necessidade da eliminação desse transiente. Desta forma, no estudo, foram considerados apenas os valores a partir do máximo de temperatura. A média das tensões foi calculada para cada grau de temperatura, sendo então visualizados em gráficos. Com um ajuste de função foram encontradas as relações de pressão de saturação e temperaturas em função dos sinais de tensão.

5 PRINCIPAIS RESULTADOS

A Figura 5 mostra o gráfico das tensões em função das temperaturas observadas durante as medições. Como se pode ver, a tensão é claramente uma função decrescente da temperatura, apresentando valores menores à medida que a temperatura cresce. Para uma temperatura de 10 graus centígrados o valor da tensão observada é de cerca de 4,7 V, indicando uma aparente falta de transparência do meio à radiação neste comprimento de onda. Observa-se que a tensão continua diminuindo conforme a temperatura aumenta, de forma que a tensão é cerca de 2,9 V quando a temperatura é de 43 °C.

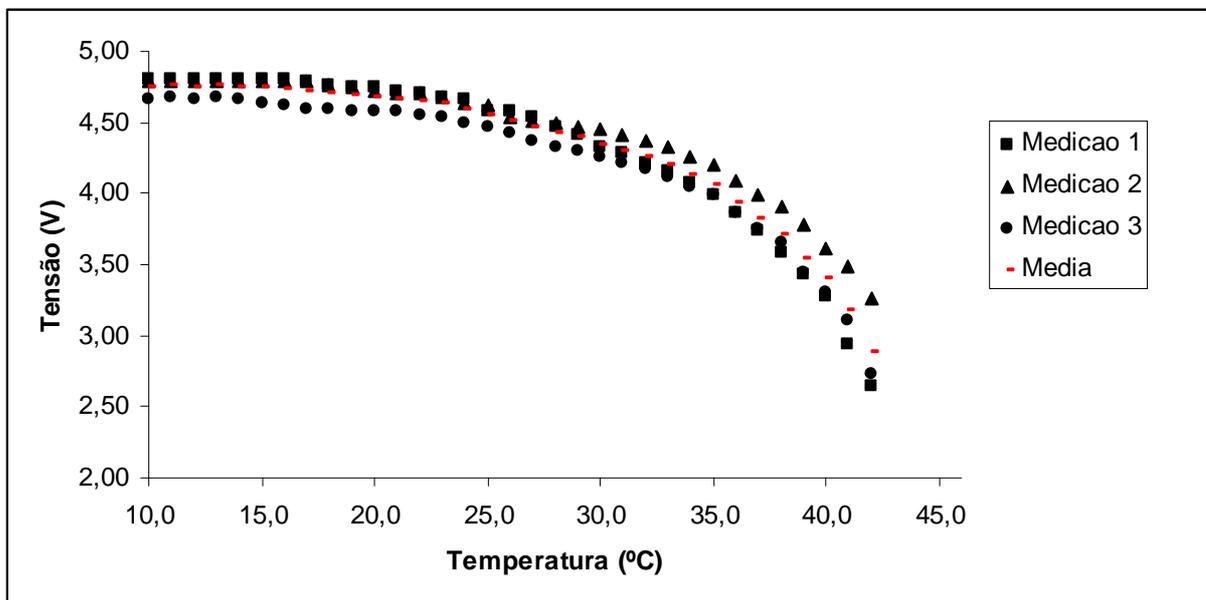


FIGURA 5 - Gráfico de tensão dada em volts, em função da temperatura em graus Celsius. Quando a temperatura é cerca de 10 graus centígrados, o valor da tensão observada é de cerca de 4,74V, e tensão de cerca de 2,9V quando a temperatura é de cerca de 43 °C.

Para se ajustar aos pontos da média dada na Figura 5, utilizou-se a equação mostrada abaixo, dada por:

$$V(T) = 4,79 - 0,009 \exp(T/7,9) \quad (5)$$

A representatividade foi elevada sendo que a correlação para esse ajuste foi de 0,997. O gráfico da Figura 6 compara a curva da média dos dados com a curva de ajuste determinada pela equação 7. Para esse ajuste o erro da comparação aos dados médios é muito

pequeno, não chegando ao máximo de 3% e mínimo de -1,07% como mostra o gráfico da Figura 10.

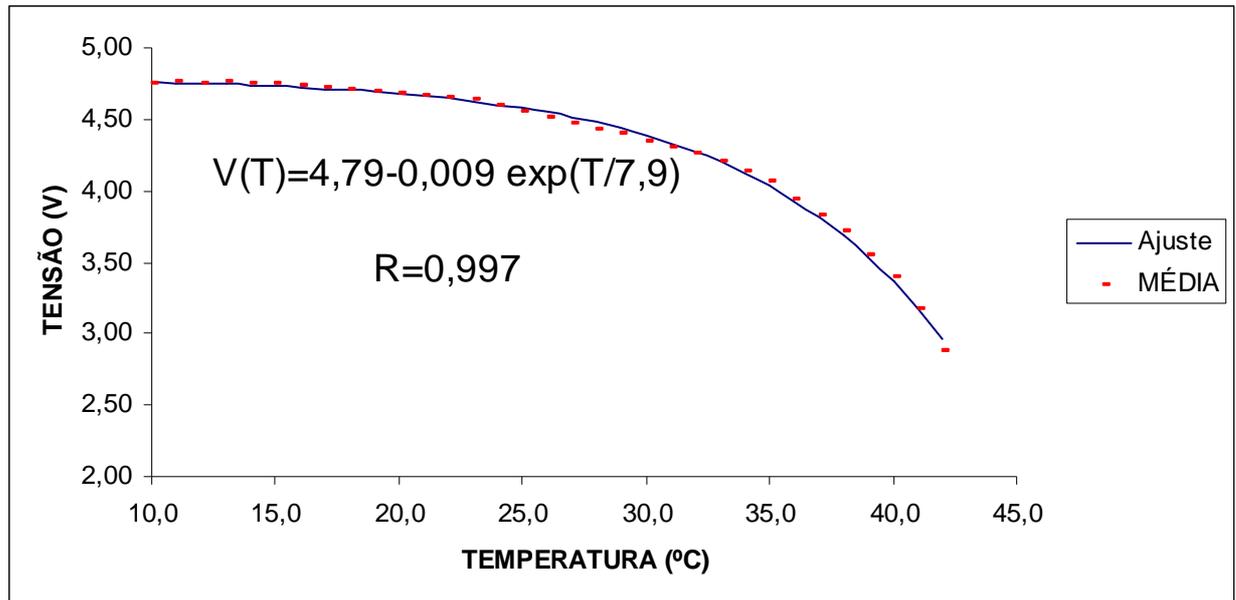


FIGURA 6 - Gráfico de mostrando o ajuste exponencial da tensão dada em volts, em função da temperatura em graus Celsius. A correlação do ajuste é de 0,997.

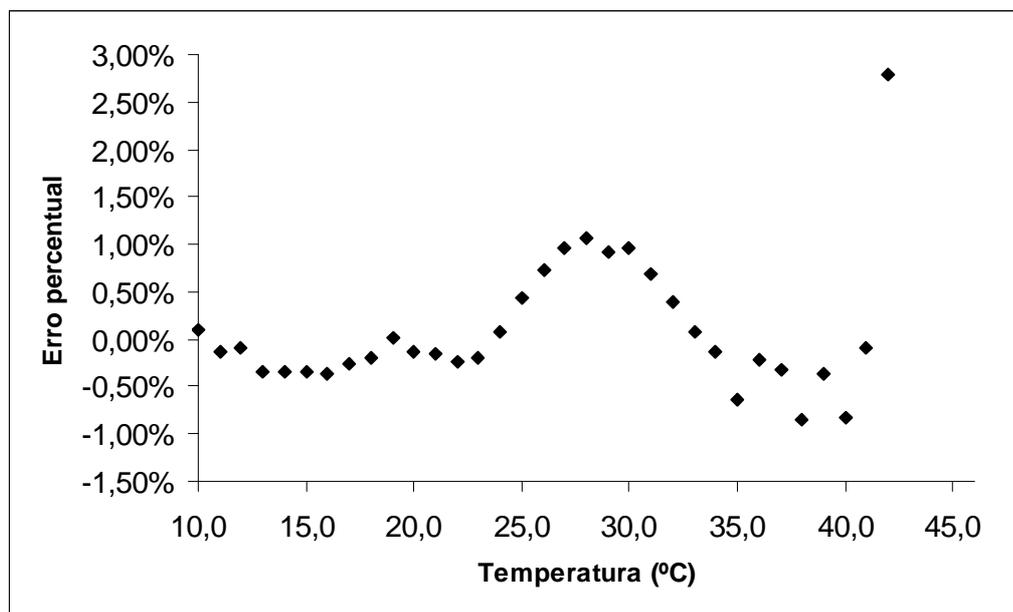


FIGURA 7 - Gráfico de mostrando o erro percentual do ajuste da média das medições de tensão à temperatura. O erro máximo de 2,8% ocorre a temperatura de 43°C. e o erro mínimo de -1,07% ocorre a uma temperatura de 38°C.

Resolvendo a equação 7 para a temperatura em função da tensão na temperatura absoluta, tem-se

$$T(V) = 7,98 \ln\left(\frac{4,79 - V}{0,09}\right) + 273,1 \quad (6)$$

A pressão de saturação de vapor d'água numa câmara adiabática é uma função exponencial da temperatura (PRUPPACHER e KLETT,1997) dada pela equação 8. A Figura 8 ilustra o comportamento para o intervalo de temperatura estudado.

$$e_s = a_0 + T(a_1 + T(a_2 + T(a_3 + T(a_4 + T(a_5 + a_6)))))) \quad (7)$$

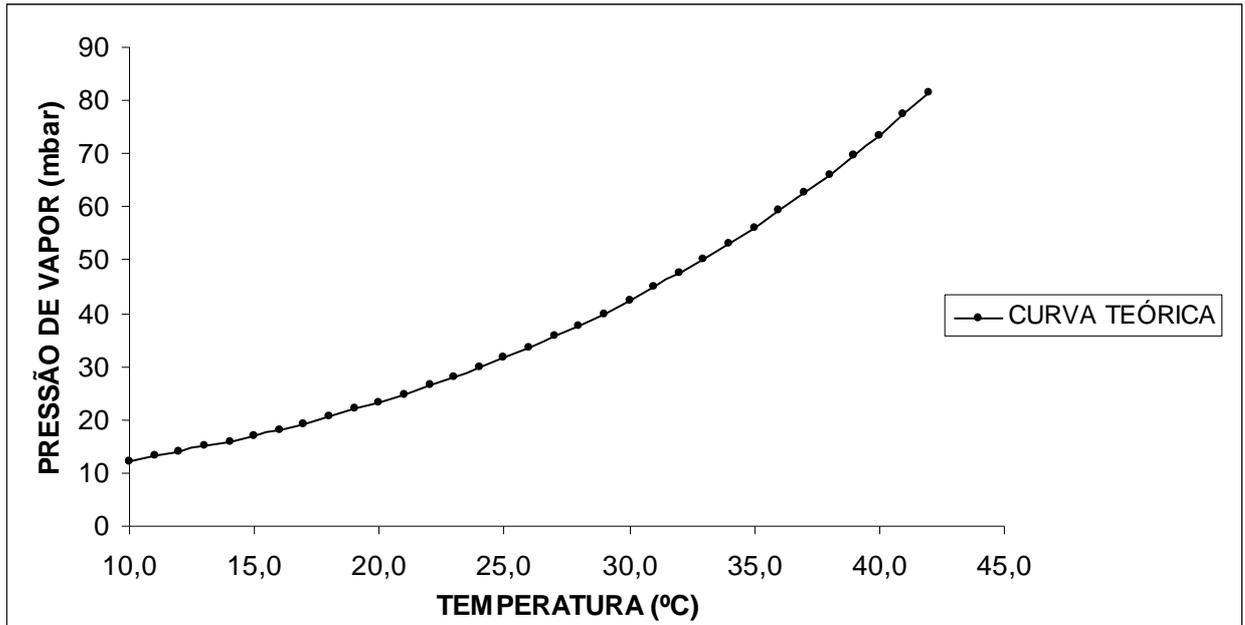


FIGURA 8 - Gráfico da pressão de saturação do vapor d'água em função temperatura. A pressão de saturação do vapor é uma função exponencial da temperatura (PRUPPACHER e KLETT,1997)

Com estes dados, sabe-se que valores de sinal de tensão estão associados à pressão de saturação de vapor. A Figura 9 mostra o gráfico do sinal de tensão em função da pressão de saturação.

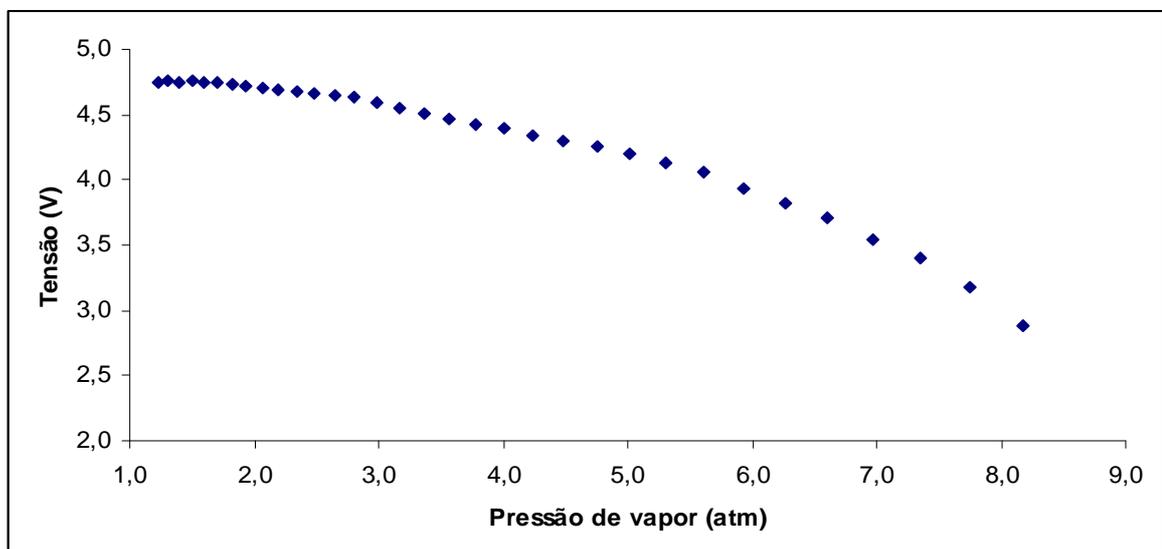


FIGURA 9 - Gráfico do sinal de tensão em função da pressão de saturação de vapor. Percebe-se que o sinal cai, o que indica aumento da concentração de vapor, a medida que a pressão de vapor aumenta.

A equação 9 dá função de ajuste dos dados da Figura 9. A correlação do ajuste é 0,998.

$$V(e_s) = 5,08 - 0,20 \exp(e_s/3,4) \quad (8)$$

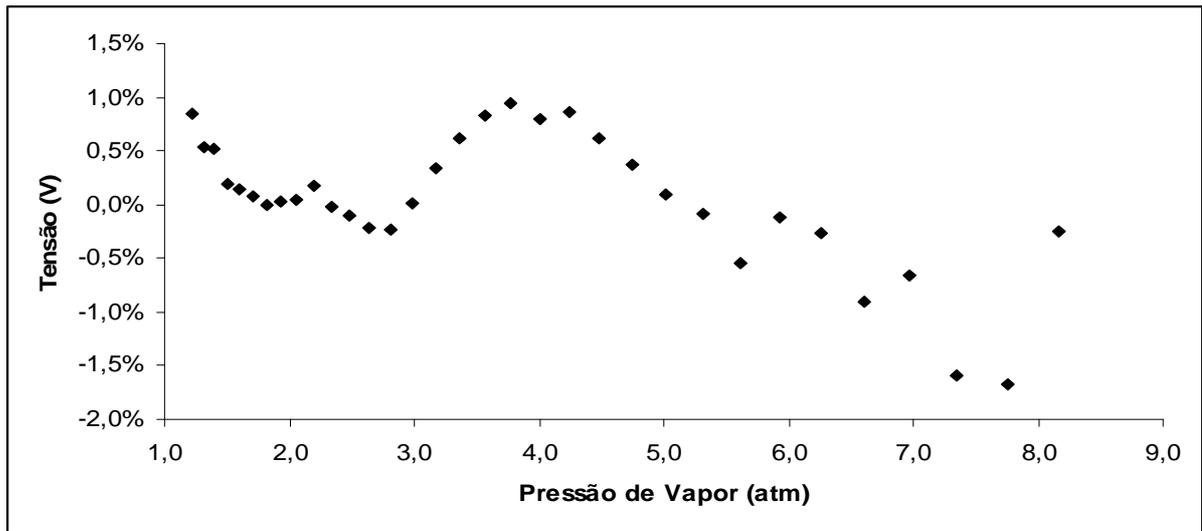


FIGURA 10 - Gráfico do erro percentual do sinal de tensão em função da pressão de saturação de vapor. O erro máximo não chega a 1,0% e mínimo não chega -2,0%.

Entretanto, o objetivo é obter a pressão de saturação. Deste modo a Eq. 10 para a pressão de vapor, fica:

$$e_s(V) = 3,4 \ln\left(\frac{V-5,08}{0,20}\right) \quad (9)$$

Também foi avaliado o tempo de resposta do equipamento. A Figura 11 mostra a medição do tempo de resposta com um osciloscópio.



FIGURA 11- Gráfico do tempo de resposta do equipamento. Cada graduação horizontal corresponde a $\frac{1}{2}$ ms(meio milissegundo). Cada graduação vertical corresponde a 1V (um volt). O gráfico mostra que o equipamento detecta a variação da tensão máxima de 5V até a tensão mínima de 0V em aproximadamente 1ms. E para a tensão passar do valor mínimo de 0V para o máximo de 5V, o tempo de resposta é de aproximadamente $\frac{1}{2}$ ms.

O gráfico mostra que o equipamento detecta a variação da tensão máxima de 5,0 V até a tensão mínima de 0V em aproximadamente 1 ms. E para a tensão passar do valor mínimo de 0,0 V para o máximo de 5V, o tempo de resposta é de aproximadamente $\frac{1}{2}$ ms.

Apesar de o equipamento ter sido construído com matérias comerciais foi possível constatar a eficiência a aplicabilidade dos mesmos.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliou-se a possibilidade de medir a concentração de um gás através da técnica de cromatografia infravermelha não dispersa. Esta técnica utiliza o princípio de que certos gases absorvem radiação infravermelha num comprimento de onda específico e muitas vezes único.

Para a realização deste trabalho utilizou-se o comprimento de onda da luz de 940 nm, que é um comprimento de onda onde o vapor d'água tem forte absorção. Os componentes utilizados para a montagem deste dispositivo foram encontrados no mercado a preço bastante acessível. Além destes componentes, foram utilizados uma fonte de alimentação regulada e um refrigerador comercial.

Os testes mostraram que o equipamento detecta as variações de tensão máxima de forma a acompanhar a curva de pressão de vapor d'água num intervalo de cerca de 40⁰ C até cerca de 0⁰ C. Uma curva de ajuste foi, então, proposta a fim de representar a concentração de vapor d'água como função da tensão de saída do circuito.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. D. *Essential of Metereology*. Figura 2.4. 2000

AFUBRA. *A Floresta e o Ar*. Associação dos Fumicultores do Brasil. V.4. pp. 16. 2009.

BAKWIN, P. S., et al. *Chemical & Physical Meteorology*. “Measurements of Carbon Dioxide on a Very Tall Tower.” *Tellus Series B*, **47**(5), pp. 535–549. 1995.

BAKWIN, P. S. et al. *Chemical & Physical Meteorology*. “Measurements of carbon dioxide on very tall towers: Results of the NOAA/CMDL program.” *Tellus Series B*. **50**(5), pp. 401–415. 1998.

BALDOCCHI, D., et al. *Bulletin of the American Meteorological Society*: “FLUXNET A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities.” **82**(11): 2415–2434. 2001.

BIRAUD, S., et al. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*: “European greenhouse gas emissions estimated from continuous atmospheric measurements and radon 222 at Mace Head, Ireland.” **105**(D1), pp. 1351–1366. 2000.

BIRAUD, S., et al. *Tellus Series B chemical and Physical Meteorology*: “Quantification of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and chloroform emissions over Ireland from atmospheric observations at Mace Head.” **54**(1): pp. 41–60. 2002.

CIAIS, P., P. P. TANS, M. TROLIER, J. W. C. WHITE, and R. J. FRANCEY. *A Large Northern Hemisphere Terrestrial CO₂ Sink Indicated by the C₁₃/C₁₂ Ratio of Atmospheric CO₂*. *Science* **269**(5227): pp. 1098–1102. 1995.

DENNING, A. S., D. A. RANDALL, G. J. COLLATZ, and P. J. SELLERS. “Simulations of Terrestrial Carbon Metabolism and Atmospheric CO₂ in a General Circulation Model. Part 2: Simulated CO₂ Concentrations.” *Tellus Series B. Chemical & Physical Meteorology* **48**(4), pp. 543–567. 1996.

DENNING, A. S., G. J. Collatz, C. G. Zhang, D. A. Randall, J. A. Berry, P. J. Sellers, G. D. Colello, and D. A. Dazlich. “Simulations of Terrestrial Carbon Metabolism and Atmospheric CO₂ in a General Circulation Model. Part 1: Surface Carbon Fluxes.” *Tellus Series B. Chemical & Physical Meteorology* **48**(4), pp. 521–542. 1996.

DESJARDINS, R. L., et al. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*: “Scaling up Flux Measurements for the Boreal Forest Using Aircraft Tower Combinations.” Energy Commission. **102**(D24), pp. 29125– 29133. 1997.

FRANCO, G. *Inventory of California Greenhouse Gas Emissions and Sinks*, pp. 1990–1999. California. 2002.

GOODY, R.M. e G.D. ROBINSON, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 77, pp. 153. 1951.

GURNEY, K. R., et al. “Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models.” *Nature* **415**(6872): pp. 626–630. 2002.

HAYHOE, K., et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*: Emissions pathways, climate change, and impacts on California. **101**(34), pp. 12422– 2427. 2004.

HE, X. e G. A. RICHNITZ, *Analytical Chemistry*: Linera Response Function Fluorescence-Based Fiber Optics CO₂ Sensor. 67(13), pp. 2264 – 2268. 1995.

HELLIKER, B. R., et al. *JGR Atmospheres*. “Estimates of net CO₂ flux by application of equilibrium boundary layer concepts to CO₂ and water vapor measurements from a tall tower.” **109**: D20106. 2004.

HOWARD, J.N.,: *Proc. I.R.E.* 47, pp. 1459. 1959

IPCC. 2001: *In Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change: Observed Climate Variability and Change*. New York: Cambridge University Press. 2001.

LLOYD, J., et al. *Vertical profiles, boundary layer budgets, and regional flux estimates*. 2001.

MILLS, A. e CHANG, Q., Fluorescence plastic thin-film sensor for carbon dioxide. The Analyst, 118(7), 839 – 843. Siberia.” *Global Biogeochemical Cycles* **15**(2), pp. 267–284. 1983

OLIVEIRA, G. B *et. al.* **O Efeito Estufa**, Unesp p. 11. 2009.

PEIXOTO, J.P. **Fomento**, O Ramo Aéreo do Ciclo Hidrológico, Lisboa, 6(2), pp.111-119, 1968.

PEIXOTO, J.P. **Nordic Hydrologic**. Water Vapor Balance on the Atmosphere from Five Years of Hemispheric data, Copenhagen, 2, pp. 120-138, 1970.

PRUPPACHER, H. R. e KLETT, J. D. *Microphysics of Clouds and Precipitation: Second Revised and Enlarged Edition with an Introduction to Cloud Chemistry and Cloud Electricity*. Kluwer Academic Publishers. pp. 854. 1997.

WATTS, R. S.,: *Transduce Practice: Chemical analysis*, vol. 2, Jonh Wiley & Sons, Chapter 27, pp. 1173 –1208. 1983.

WILKINSON, R., K. CLARKE, M. GOODCHILD, and REICHMAN, J. *Preparing for Changing Climate: The Potential Consequences of Climate Variability and Change*. U.S. Global Change Research Program. 2002.

WOFSY, S. C., and HARRIS, R. C. *The North American Carbon Program (NACP): Report of the NACP Committee of the U.S. Interagency Carbon Cycle Science Program*. Washington, D.C. US Global Change Research Program. 2002.

ANEXO A - LEI DE BEER LAMBERT

A lei de Beer-Lambert, também conhecida como lei de Beer ou lei de Beer-Lambert-Bouguer é uma relação empírica que, na Óptica, relaciona a absorção de luz com as propriedades do material atravessado por esta.

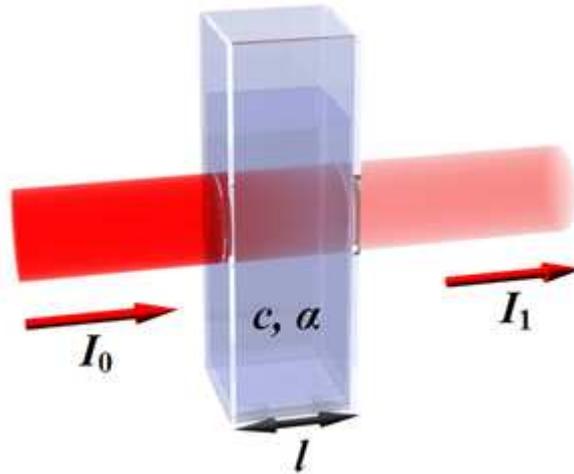


FIGURA 12 - Diagrama da absorção de um feixe de luz atravessando uma cubeta de tamanho l . Fonte: wikipedia.org/wiki/Lei_de_Beer-Lambert

A taxa de variação da intensidade de radiação em relação ao deslocamento num gás é inversamente proporcional a própria intensidade de radiação incidida.

$$-\frac{dI}{dl} \propto I \Rightarrow -\frac{dI}{dl} = \alpha c I$$

$$\int_{I_0}^{I_1} \frac{dI}{I} = -\alpha c \int_{l_0}^{l_1} dl$$

$$\ln \frac{I_1}{I_0} = -\alpha c (l_1 - l_0)$$

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha c l} \quad (10)$$

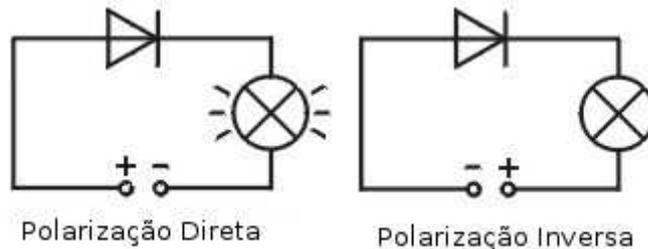
Onde, I_0 é a intensidade de radiação incidida, I_1 é intensidade de radiação que atravessa o gás, l é a espessura do meio, α é o coeficiente de absorção do meio e c é concentração do gás.

ANEXO B – TEORIA DOS DIODOS

O diodo é um componente elétrico que permite que a corrente atravessasse-o num sentido com muito mais facilidade do que no outro. O tipo mais comum de diodo é o diodo semicondutor, no entanto, existem outras tecnologias de diodo. Diodos semicondutores são simbolizados em diagramas esquemáticos como na figura abaixo. O termo "diodo" é habitualmente reservado a dispositivos para sinais baixos, com correntes iguais ou menores a 1 A.



Quando colocado em um simples circuito bateria-lâmpada, o diodo vai permitir ou impedir corrente através da lâmpada, dependendo da polaridade da tensão aplicada, como nas duas figuras abaixo.



Na imagem da esquerda o diodo está diretamente polarizado, há corrente e a lâmpada fica acesa. Na imagem da direita o diodo está inversamente polarizado, não há corrente, logo a lâmpada fica apagada.

O diodo funciona como uma chave de acionamento automático (fechada quando o diodo está diretamente polarizado, e aberta quando o diodo está inversamente polarizado), a diferença mais substancial é que quando diretamente polarizado há uma queda de tensão no diodo muito maior do que a que geralmente há em chaves mecânicas.

A polarização do diodo é dependente da polarização da fonte geradora. A polarização é direta quando o pólo positivo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal P(chamado de ânodo) e o pólo negativo da fonte geradora entra em contato com o lado do cristal N(chamado de cátodo). Assim, se a tensão da fonte geradora for maior que a tensão interna do diodo, os portadores livres se repelirão por causa da polaridade da fonte geradora e conseguirão ultrapassar a junção P-N, movimentando-os e permitindo a passagem de corrente elétrica. A polarização é indireta quando o inverso ocorre. Assim, ocorrerá uma atração das lacunas do ânodo (cristal P) pela polarização negativa da fonte geradora e uma atração dos elétrons livres do cátodo(cristal N) pela polarização positiva da fonte geradora, sem existir um fluxo de portadores livres na junção P-N, ocasionando no bloqueio da corrente elétrica. Pelo fato de que os diodos fabricados não são ideais (contém impurezas), a condução de corrente elétrica no diodo(polarização direta) sofre uma resistência menor que 1 ohm, que é quase desprezível.

O bloqueio de corrente elétrica no diodo(polarização inversa) não é total devido novamente pela presença de impurezas, tendo uma pequena corrente que é conduzida na ordem de microampéres, chamada de corrente de fuga, que também é quase desprezável.

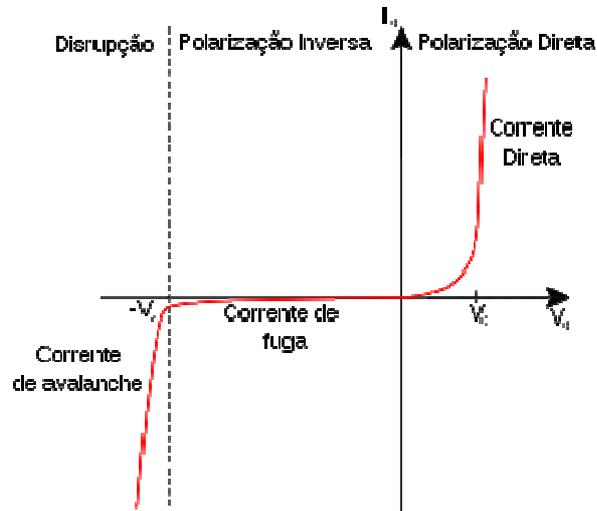


FIGURA 13- O gráfico mostra a curva característica do comportamento do diodo em sua polarização direta e inversa