



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**MONITORAMENTO DA UMIDADE AMBIENTE E
RELACIONAMENTO COM FATORES QUE ALTERAM A UMIDADE
RELATIVA DO AR, UTILIZANDO SENSORES DESENVOLVIDOS
NO INPE**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Paulo Paiva Oliveira Leite Dyer (UNESP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: paulo_dyer@yahoo.com

Maria do Carmo de Andrade Nono (CTE/LAS/INPE, Orientador)
E-mail: maria@las.inpe.br

Rodrigo de Matos Oliveira (CTE/LAS/INPE, Co-orientador)
E-mail: rodmatos@las.inpe.br

Agosto/2011 – Julho/2012

Agradecimentos

Agradeço à minha Família, ao CNPq e ao Grupo TECAMB/LAS/INPE!

RESUMO

Atualmente, as pesquisas climáticas requerem instrumentos confiáveis e de baixo custo. Dessa forma, os elementos sensores capacitivos, constituídos de cerâmicas porosas, revelaram-se como uma opção bastante promissora para medições, *in situ*, de umidade relativa do ar e do conteúdo de água em solos, conforme constataram os Pesquisadores do Grupo de Tecnologias Ambientais - TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LAS, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. No presente trabalho, portanto, uma pastilha cilíndrica de material cerâmico poroso, constituída de ZrO_2 e de TiO_2 , na proporção de 1:1 (em massa), cujas dimensões não ultrapassaram 10 e 5 mm de diâmetro e de espessura, respectivamente, foi inserida em uma câmara climática e submetida à medições de capacitância em função da umidade relativa, em temperaturas definidas, através de uma ponte RLC. As medições foram realizadas de forma crescente e decrescente, a fim de verificar a histerese, em diferentes frequências. Os resultados obtidos pelo elemento sensor cerâmico foram comparados com os resultados obtidos pelo sensor comercial da marca NOVUS. Os elementos sensores cerâmicos se mostraram bastante promissores para o monitoramento da umidade relativa em diferentes temperaturas.

Palavras chave: Elementos sensores cerâmicos; Umidade relativa do ar; Pesquisas meteorológicas.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Esquema do sensor capacitivo de umidade.....	6
Figura 2.2 – Esquema das principais camadas e camadas de transição, em relação à temperatura, da atmosfera.....	11
Figura 3.1 - Fotografias do a) elemento sensor cerâmico capacitivo e b) do sensor comercial da marca NOVUS.	21
Figura 3.2 - Ponte RCL da marca PHILIPS.	22
Figura 3.3 - Câmara climática da marca WEISS TECHNIK.....	22
Figura 4.1 – Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 15 °C.	24
Figura 4.2 – Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 20 °C.	26
Figura 4.3 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 25 °C.	28
Figura 4.4 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 30 °C.	30
Figura 4.5 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 35 °C.	31
Figura 4.6 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 40 °C.	32
Figura 4.7 - Curvas dos valores obtidos pelo sensor comercial (%UR) e dos valores inseridos na câmara climática em função da umidade relativa, na temperatura ambiente de 25 °C.....	34

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos gerais	3
1.2 Objetivos específicos.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Sensores capacitivos.....	5
2.2 Dielétricos cerâmicos	6
2.3 Mecanismos de adsorção de água nos elementos sensores.....	7
2.4 O ar atmosférico.....	7
2.5 A atmosfera terrestre	9
2.5.1 Camadas e áreas de descontinuidade.....	11
2.5.2 Outras camadas	15
2.6 Ciclo da águas e sua presença na atmosfera	17
2.7 A importância do monitoramento da umidade relativa do ar para a agricultura.....	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Materiais utilizados	21
3.2 Procedimentos experimentais	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
5 CONCLUSÃO	35
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1 INTRODUÇÃO

A automação e o controle de processos na indústria e no campo, bem como o interesse crescente pelo monitoramento ambiental, têm exigido cada vez mais esforços na pesquisa e no desenvolvimento de sensores e sistemas sensores mais confiáveis, versáteis e de custo menor. Neste sentido, a busca de novos materiais, o estudo de modelamento de sensores e o desenvolvimento de novas técnicas de medições e de processamento de sinais têm norteado os avanços nesta área [1,2].

Os sensores de umidade têm sido desenvolvidos para uma variedade enorme de aplicações nas indústrias: de sistemas de climatização de ambientes, equipamentos médicos, secadores, microondas, automobilística, têxtil, alimentos, eletrônica e outras, bem como na automação da produção agrícola e no monitoramento ambiental [1,2].

Atualmente, existe no mercado uma grande variedade de sensores de umidade, que incluem materiais cerâmicos, poliméricos, eletrólitos e compósitos. Entretanto, todos os tipos de sensores apresentam vantagens e limitações [1]. Os sensores de materiais poliméricos e eletrólitos podem ser aplicados apenas em uma faixa de temperatura entre 0 °C e 90 °C e em faixas de umidades relativas que não desagreguem fisicamente o material. Os sensores de materiais cerâmicos suportam temperaturas e umidades mais elevadas [1,2], porém apresentam limitações relacionadas à estabilidade mecânica e ao controle de porosidade, quando se deseja confeccionar filmes finos para diminuir o tempo de resposta e a “histerese”. Para os sensores de umidade cerâmicos são conhecidos dois mecanismos de adsorção de água: químico e físico [1,2]. A natureza do material cerâmico e do mecanismo de adsorção de água, ou do grupo hidroxila (OH^-), são os fatores que irão determinar os tipos de alterações nos parâmetros físicos do

elemento sensor; as interações na superfície e nos contornos de grão são de fundamental importância nesse processo.

A condutividade dos elementos sensores cerâmicos pode ser predominantemente eletrônica ou iônica [1,2]. Naqueles de natureza iônica, a água é adsorvida química e fisicamente nas superfícies dos poros, ao que se segue uma condensação da umidade nos microporos por capilaridade [1-3]. Os materiais cerâmicos utilizados como sensores de umidade, cuja condutividade é de natureza iônica são: $ZnCr_2O_4$, zeólitas porosas, vidros cerâmicos de La-Ti-VO, apatita $[Ca_{10}(PO_4)_6F_4]$, filmes finos de $Zn_2Al(OH)_6Cl.nH_2O$, $MgCr_2O_4-TiO_2$ dopados com V_2O_5 e $MgFe_2O_4$ dopado com íons alcalinos [1,4].

Os sensores de umidade do tipo semicondutor são aqueles onde a condutividade eletrônica se modifica em função da adsorção química da água. Os materiais cerâmicos utilizados que apresentam como característica a condutividade de natureza eletrônica são: óxidos do tipo perovskita ($CaTiO_3$, $CaSnO_3$), $ZrO_2 - MgO$, $ZrO_2 - TiO_2$, SnO_2 e Nb_2O_5 dopada com TiO_2 [1-3].

Há uma grande deficiência de elementos sensores de umidade produzidos no Brasil capazes de mensurar o conteúdo de água no ambiente baseados na “Regra dos 4S”. Essa regra é usada para qualificar os sensores através de sua velocidade de resposta (*Speed*), sua estabilidade física e química (*Stability*), sua seletividade ao estímulo proposto (*Selectivity*) e sua capacidade sensitiva (*Sensibility*). Por outro lado, a aquisição de equipamentos refinados implica na importação, principalmente dos Estados Unidos, de países da Europa e do Japão [4]. Estes sensores importados são muito caros e apresentam deficiências em vários aspectos, entre as quais os métodos de calibração que são realizados em condições diferentes às encontradas no Brasil, principalmente pela diferença das condições climáticas distintas, que influenciam demasiadamente o comportamento

da absorção/adsorção de moléculas de água gerando nas superfícies dos sensores, portanto, fornecendo resultados imprecisos.

Desta forma é necessário o desenvolvimento de uma instrumentação adequada que permita a obtenção de valores confiáveis. Vale ressaltar, também, que o custo inicial (preço imediato + impostos) e o custo em longo prazo (assistência técnica e manutenção) são fatores desfavoráveis à aquisição destes sensores de umidade importados, pois eles são comercializados aos valores muito superiores estimados aos produzidos com tecnologia brasileira.

Ao longo dos últimos 24 anos, pesquisadores da Linha de Pesquisas em Engenharia de Superfícies e Cerâmicas Micro e Nanoestruturadas (SUCERA) do Grupo de Pesquisas em Tecnologias Ambientais (TECAMB), que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), têm se dedicado à elaboração de técnicas de diagnóstico, desenvolvimento e caracterização de materiais e no aprimoramento de elementos sensores e de sistemas sensores de parâmetros ambientais. Além da originalidade desta área de pesquisa, optou-se pela utilização de matérias primas brasileiras para a produção dos elementos sensores cerâmicos, resultando em uma pesquisa e desenvolvimento totalmente nacionais [4,5].

Atualmente, o projeto apresenta condições de desenvolvimento de elementos sensores para aplicações em solos e para a medição da umidade relativa do ar atmosférico com diferentes características químicas e físicas.

1.1 Objetivos gerais

O objetivo deste projeto é obter um estudo de comparação das medidas de capacitância e de impedância versus umidades relativas em uma determinada

freqüência em relação às demais freqüências para que seja possível, em uma análise de correlação, estabelecer qual freqüência exhibe resultados mais coerentes em uma determinada faixa de temperatura.

1.2 Objetivos específicos

Investigar as influências das características física e químicas do ambiente (ar) na capacidade de absorção/adsorção de água em medições em laboratório e no campo e verificar o comportamento em relação à absorção de umidade do ar em temperaturas de 15 a 40 °C, utilizando sensores de cerâmicas porosas. Serão utilizadas as medições de conteúdo de água no ar os elementos sensores cerâmicos desenvolvidos no Laboratório de Tecnologias Ambientais do LAS/INPE.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sensores capacitivos

Um sensor ou transdutor capacitivo é um condensador que exhibe uma variação do valor nominal da capacidade em função de uma grandeza não elétrica. Uma vez que um condensador consiste basicamente num conjunto de duas placas condutoras separadas por um dielétrico, as variações no valor nominal da capacidade podem ser provocadas por redução da área frente a frente e da separação entre as placas, ou por variação da constante dielétrica do material.

Os sensores capacitivos permitem medir com grande precisão um grande número de grandezas físicas, tais como a posição, o deslocamento, a velocidade e a aceleração linear ou angular de um objeto; a umidade, a concentração de gases e o nível de líquidos ou sólidos; a força, o torque, a pressão e a temperatura; mas também detectar a proximidade de objetos, a presença de água e de pessoas, etc.

Hoje em dia existe uma grande variedade de aplicações que utilizam sensores capacitivos, de forma discreta ou integrada. Por exemplo, são bastante comuns os sensores capacitivos de pressão, (caso dos microfones), de aceleração, de fluxo de gases ou líquidos, de umidade, de compostos químicos como o monóxido de carbono, dióxido de carbono, azoto, de temperatura, de vácuo, de nível de líquidos, de força, de deslocamento, etc., uns detectando as variações na espessura do dielétrico, outros na constante dielétrica. A detecção da variação da capacidade é geralmente efetuada através da medição da carga acumulada, por exemplo, através da aplicação de uma tensão constante, ou então indiretamente através da variação da frequência de oscilação ou da forma de onda à saída de um circuito, do qual o sensor é parte integrante. Na Figura 2.1, ilustra-se o esquema de princípio de um sensor capacitivo de umidade (designado sensor

higrométrico), o qual basicamente explora a dependência da constante dielétrica de alguns materiais com o teor de água no ar ambiente. O dielétrico é neste caso constituído por uma película fina de um material simultaneamente isolador e higroscópico o qual, dada a natureza porosa de um dos dielétricos, se encontra em contacto com o ambiente cuja unidade relativa se pretende medir [6].

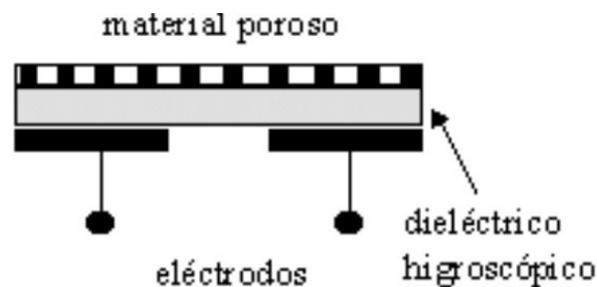


Figura 2.1 - Esquema do sensor capacitivo de umidade.

2.2 Dielétricos cerâmicos

Um considerável número de cerâmicos e polímeros é usado como materiais isolantes. Muitas das cerâmicas, inclusive vidro, porcelana, esteatita, e mica, têm constantes dielétricas na faixa de 6 a 10, estes materiais também exibem um grau alto de estabilidade dimensional e resistência mecânica. Aplicações típicas incluem isolamento elétrico de Linhas de Transmissão, bases de chaves seccionadoras (e/ou interruptores), e receptáculos de lâmpadas. O óxido de titânio (TiO_2) e as cerâmicas de titanato, tais como titanato de bário ($BaTiO_3$), podem ser fabricadas para ter constantes dielétricas extremamente altas que as fazem especialmente úteis para algumas aplicações capacitivas. A magnitude da constante dielétrica para a maioria dos polímeros é menor que para as cerâmicas, uma vez que estas últimas podem apresentar os maiores momentos de dipolo; os valores da constante dielétrica para polímeros geralmente situam-se entre 2 e 5.

Estes materiais geralmente são utilizados para isolamento de fios, cabos, motores, geradores, e assim por diante, e, além disso, para alguns tipos de capacitor [6].

2.3 Mecanismos de adsorção de água nos elementos sensores

A adsorção de água na superfície dos elementos sensores cerâmica altera as propriedades elétricas desta superfície, principalmente a dos óxidos metálicos. Os óxidos metálicos, quando estão em contato com a água no estado gasoso (umidade relativa do ar) e/ou líquido (conteúdo de água no solo), adsorvem as moléculas de água em sua superfície, principalmente nos grãos dos cristais, que por dissociação formam dois íons de hidroxila (OH^-) para cada molécula de água. As hidroxilas adsorvidas pelos cátions metálicos na superfície dos grãos reagem com o oxigênio de uma superfície adjacente para formar um segundo grupo de hidroxila. A camada adsorvida quimicamente, uma vez formada, não pode mais ser afetada pela exposição à umidade [7].

Quando a primeira camada de água é adsorvida, outras camadas de moléculas de água são fisicamente adsorvidas pela camada de hidroxila. A adsorção física da água é facilmente dissociada em H_3O^+ devido à camada eletrostática formada na camada adsorvida quimicamente. A adsorção física ocorre em mais camadas quando ocorre um aumento na pressão de vapor da água. A adsorção física das moléculas de água só ocorrem em temperaturas menores que $100\text{ }^\circ\text{C}$. A partir desta temperatura só ocorre adsorção química (até $400\text{ }^\circ\text{C}$) [7].

2.4 O ar atmosférico

Ar é o nome da mistura de gases que compõem a atmosfera da Terra. O ar é composto principalmente de nitrogênio, oxigênio e argônio, que juntos constituem a maior parte dos gases da atmosfera. Os demais gases incluem gases de efeito

estufa como vapor de água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e ozônio. Ar filtrado contém traços de vários outros compostos químicos. Muitas substâncias naturais devem estar presentes em pequenas quantidades em uma amostra de ar não filtrada, incluindo poeira, pólen e esporos, cinzas vulcânicas, compostos de flúor, mercúrio metálico e compostos de enxofre como dióxido de enxofre (Tabela 2.1) [8].

Tabela 2.1 - Composição volumétrica em partes por bilhão do ar atmosférico [9].

GÁS	VOLUME
Nitrogênio (N ₂)	780.840 ppmv (78.084 %)
Oxigênio (O ₂)	209.460 ppmv (20.946 %)
Argônio (Ar)	9.340 ppmv (0.9340 %)
Dióxido de carbono (CO ₂)	380 ppmv (0.0380 %)
Neônio (Ne)	18,18 ppmv (0.001818 %)
Hélio (He)	5,24 ppmv (0.000524 %)
Metano (CH ₄)	1,79 ppmv (0.000179 %)
Criptônio (Kr)	1,14 ppmv (0.000114 %)
Hidrogênio (H ₂)	0,55 ppmv (0.000055 %)
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,3 ppmv (0.00003 %)
Xenônio (Xe)	0,09 ppmv (9×10 ⁻⁶ %)
Ozônio (O ₃)	0,0 to 0,07 ppmv (0% to 7×10 ⁻⁶ %)
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	0,02 ppmv (2×10 ⁻⁶ %)
Iodo (I)	0,01 ppmv (1×10 ⁻⁶ %)
Monóxido de carbono (CO)	0,1 ppmv (0.00001 %)
Amônia (NH ₃)	Traços
Observação: Não incluído na atmosfera seca acima.	
Vapor de água (H ₂ O)	~0,40% em toda atmosfera e tipicamente 1% a 4 % na superfície

2.5 A atmosfera terrestre

A atmosfera terrestre é uma fina camada de gases presa à Terra pela força da gravidade. A atmosfera terrestre protege a vida na Terra absorvendo a radiação ultravioleta solar, aquecendo a superfície por meio da retenção de calor (efeito estufa), e reduzindo os extremos de temperatura entre o dia e a noite. Visto do espaço, o planeta Terra aparece como uma esfera de coloração azul brilhante. Esse efeito cromático é produzido pela dispersão da luz solar sobre a atmosfera, e

que existe também em outros planetas do sistema solar dotados de atmosfera [10].

A atmosfera tem uma massa de aproximadamente 5×10^{18} kg, sendo que três quartos dessa massa estão situados nos primeiros 11 km desde a superfície. A atmosfera terrestre se torna cada vez mais tênue conforme se aumenta a altitude, e não há um limite definido entre a atmosfera terrestre e o espaço exterior. Apenas em altitudes inferiores a 120 km a atmosfera terrestre passa a ser bem percebida durante a reentrada atmosférica de um ônibus espacial, por exemplo. A linha Kármán, a 100 km de altitude, é considerada freqüentemente como o limite entre atmosfera e o espaço exterior.

O vapor d'água na atmosfera encontra-se principalmente nas camadas mais baixas da atmosfera (75 % de todo o vapor d'água está abaixo dos quatro mil metros de altitude) e exerce o importante papel de regulador da ação do Sol sobre a superfície terrestre. A quantidade de vapor varia muito em função das condições climáticas das diferentes regiões do planeta; os níveis de evaporação e precipitação são compensados até chegar a um equilíbrio na baixa atmosfera: o vapor de água contido nas camadas inferiores está muito próximo ao seu ponto de saturação. A água torna-se líquida quando a sua concentração chega a 4% na baixa atmosfera.

O ar, em algumas áreas, como desertos, pode estar praticamente isento de vapor de água, enquanto em outras pode chegar a ao nível de saturação, algo muito comum nas regiões equatoriais, onde a precipitação pluvial é constante todo o ano [10].

2.5.1 Camadas e áreas de descontinuidade

A temperatura da atmosfera terrestre varia entre camadas em altitudes diferentes. Portanto, a relação matemática entre temperatura e altitude também varia, sendo uma das bases da classificação das diferentes camadas da atmosfera [11].

A atmosfera está convencionalmente estruturada em cinco camadas, três das quais são relativamente quentes, separadas por duas camadas relativamente frias. Os contatos entre essas camadas são áreas de descontinuidade, e recebem o sufixo "pausa" após o nome da camada subjacente (Figura 2.2) [12].

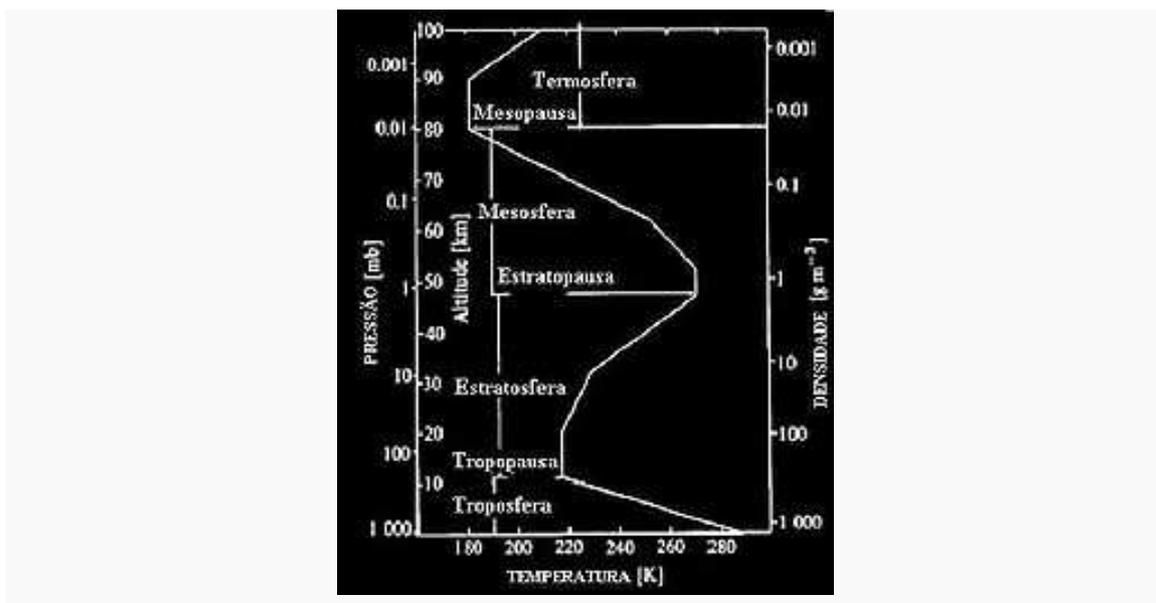


Figura 2.2 – Esquema das principais camadas e camadas de transição, em relação à temperatura, da atmosfera.

a. Troposfera

A Troposfera é a camada atmosférica que se estende da superfície da Terra até a base da estratosfera. Esta camada responde por cerca de oitenta por cento do peso atmosférico e é a única camada em que os seres vivos podem respirar

normalmente. A sua espessura média é de aproximadamente 12 km, atingindo até 17 km nos trópicos e reduzindo-se para em torno de sete quilômetros nos pólos. Praticamente todos os fenômenos meteorológicos estão confinados a esta camada [13].

Na base da troposfera encontra-se a camada limite planetária (CLP) (também chamada de camada limite atmosférica - CLA), a camada mais baixa da troposfera, com uma altura média de 1 km, na qual os efeitos da superfície são importantes, como o ciclo diurno de aquecimento e resfriamento. O que distingue a CLP de outras regiões da troposfera é a turbulência atmosférica e seu efeito de mistura, resultando na chamada camada de mistura (CM). Acima da CLP, o escoamento atmosférico é laminar (não turbulento), e o ar desliza em camadas, à exceção do movimento turbulento que é encontrado dentro das nuvens convectivas do tipo cumulo - nimbus, de grande desenvolvimento vertical. Em geral, a base das nuvens e a uma inversão térmica de altitude podem ser encontradas junto ao topo da CLP, limitando-a. Os poluentes atmosféricos são difundidos pela turbulência dentro da CLP e transportados a longas distâncias, até encontrar uma região de ocorrência de nuvens de grande desenvolvimento vertical que possam lhes transportar até a troposfera superior. Uma camada de transição existe entre a CLP e a atmosfera livre, na qual ocorre a intrusão de ar frio e seco da atmosfera livre dentro da CLP. O ar da CLP sobre os continentes nas latitudes tropicais em geral é quente e úmido. Os fluxos de calor, umidade e de poluentes ocorrem na base da CLP a partir da superfície e, por isso, o fluxo turbulento de calor diminui verticalmente. Em geral, durante o dia, a CLP é uma camada convectiva, durante a noite, é estável junto à superfície que se resfria por perda radiativa do calor acumulado durante o dia [14].

b. Tropo pausa

A tropopausa é o nome dado à camada intermediária entre a troposfera e a estratosfera, situada a uma altura média em torno de 17 km sobre a linha do Equador. A distância da tropopausa em relação ao solo varia conforme as condições climáticas da troposfera, da temperatura do ar, da latitude, entre outros fatores. Se existe na troposfera uma agitação climática com muitas correntes de convecção, a tropopausa tende a subir. Isto se deve por causa do aumento do volume do ar na troposfera, este aumentando, aquela aumentará, por consequência, empurrará a tropopausa para cima [15].

c. Estratosfera

Na estratosfera a temperatura aumenta com a altitude e se caracteriza pelos movimentos horizontais do ar. Situa-se aproximadamente entre 7 e 17 até 50 km de altitude aproximadamente, compreendida entre a troposfera e a mesosfera. Apresenta pequena concentração de vapor de água, e a temperatura cresce conforme maior a altitude até a região limítrofe, denominada estrato pausa. Muitos aviões a jato circulam na estratosfera devido à sua estabilidade. É nesta camada que está situada a camada de ozônio, e onde começa a dispersão da luz solar (que origina o azul do céu) [16].

d. Estrato pausa

A estrato pausa é a região limítrofe entre a estratosfera e a mesosfera e onde a temperatura para de aumentar conforme a elevação da altitude, marcando o início da mesosfera [17].

e. Mesosfera

Na mesosfera a temperatura diminui com a altitude. Esta é a camada atmosférica onde há uma substancial queda de temperatura, chegando até a $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ em seu topo. A mesosfera está situada entre a estrato pausa em sua parte inferior e meso

pausa em sua parte superior, entre 50 a 80/85 km de altitude. É na mesosfera que ocorre o fenômeno da aero - luminescência das emissões da hidroxila e é nela que se dá a combustão dos meteoróides [18].

f. Meso pausa

A meso pausa é a região da atmosfera que determina o limite entre uma atmosfera com massa molecular constante de outra onde predomina a difusão molecular [19].

g. Termosfera

Na termosfera a temperatura aumenta com a altitude, e está localizada acima da meso pausa. Sua temperatura aumenta rapidamente com a altitude até onde a densidade das moléculas é tão pequena que se movem em trajetórias aleatórias, chocando-se raramente. A temperatura média da termosfera é de 1.500 °C, mas a densidade é tão pequena que a temperatura não é sentida normalmente. Sua espessura varia entre 350 a 800 km dependendo da atividade solar, embora sua espessura seja tão pequena quanto 80 km em épocas de pouca atividade solar. É a camada onde ocorrem as auroras e onde orbita o ônibus espacial [20].

h. Termo pausa

O termo pausa ou exo - base é a região limítrofe entre a termosfera e a exosfera. Fisicamente, toda a radiação solar incidente atua abaixo do termo pausa, mas pode ser negligenciado quando é considerado a exosfera, onde a atmosfera é tão tênue que fenômenos decorridos nela, praticamente não são percebidos.

i. Exosfera

A camada mais externa da atmosfera da Terra se estende desde a termo pausa para o espaço exterior. Aqui, as partículas estão tão distantes que podem viajar centenas de quilômetros sem colidir umas com as outras. Uma vez que as

partículas colidem raramente, a exosfera não se comporta como um fluido. Essas partículas que se movem livremente seguem trajetórias retilíneas e podem migrar para dentro ou para fora da magnetosfera ou da região de atuação do vento solar. A exosfera é composta principalmente de hidrogênio e hélio.

Não existe um limite definido entre o espaço exterior e a atmosfera. Presume-se que esta tenha cerca de mil quilômetros de espessura, 99% da densidade está concentrada nas camadas mais inferiores e cerca 80% da massa atmosférica está numa faixa de 11 km desde a superfície. À medida que se vai subindo, o ar vai se tornando cada vez mais rarefeito, perdendo sua homogeneidade e composição. Na exosfera, zona em que foi arbitrado limítrofe entre a atmosfera e o espaço interplanetário, algumas moléculas de gás acabam escapando à ação do campo gravitacional.

O limite onde os efeitos atmosféricos são notáveis durante a reentrada atmosférica, fica em torno de 120 km de altitude. A altitude de 100 quilômetros, conhecida como a linha Kármán, também é usada freqüentemente como o limite entre atmosfera e o espaço exterior [20].

2.5.2 Outras camadas

Além das cinco camadas principais determinadas pela temperatura, outras camadas são determinadas por várias outras propriedades.

- **Ozonosfera**

A ozonosfera ou camada de ozônio está contida dentro da estratosfera. Nesta, a concentração da camada de ozônio é de cerca de 2 a 8 partes por milhão, que é muito maior do que o ozônio na atmosfera próxima à superfície, mas ainda é muito pequeno quando comparado com os principais componentes da atmosfera. Está

localizada principalmente na parte inferior da estratosfera, entre 15 a 35 km de altitude, embora a espessura varie sazonalmente e geograficamente. Cerca de 90% do ozônio em nossa atmosfera está contida na estratosfera [21].

- **Ionosfera**

A ionosfera, a parte da atmosfera ionizada pela radiação solar, estende-se de 50 a 1.000 km de altitude e, normalmente, engloba tanto a termosfera quanto a exosfera. A ionosfera representa a fronteira interna da magnetosfera. Tem importância prática, e influencia, por exemplo, a propagação radio - elétrica sobre a Terra. É responsável pelas auroras. É dividida em subcamadas que se diferem pela quantidade de energia eletromagnética recebida pelo sol ou de ficarem mais ativas quando os raios solares incidem perpendicularmente no meio.

- **Homosfera e heterosfera**

A homosfera e a heterosfera são definidas pelo fato de que os gases atmosféricos estão ou não bem misturados. Na homosfera, a composição química da atmosfera não depende do peso molecular; os gases são misturados pela turbulência. A homosfera inclui a troposfera, a estratosfera e a mesosfera. Acima da turbopausa, a cerca de 100 km de altitude (essencialmente a altitude da mesopausa), a composição varia com a altitude. Isso ocorre porque a distância que as partículas podem se mover sem colidir uma com as outras é grande em comparação com o tamanho dos movimentos turbulentos que fazem a mistura. Isso permite que os gases se estratifiquem-se pelo peso molecular; os mais pesados, como o oxigênio e nitrogênio, estão presentes apenas próximos da parte inferior da heterosfera. A parte superior da heterosfera é composta quase que totalmente por hidrogênio, o elemento mais leve [22].

- **Camada limite planetária**

A camada limite planetária é a parte da troposfera que está mais próxima da superfície terrestre, e é diretamente afetada por ela, principalmente através da difusão turbulenta. Durante o dia, a camada limite planetária é geralmente bem misturada, enquanto à noite, torna-se estavelmente estratificada, com ocasiões de mistura fraca ou intermitente. A profundidade da camada limite planetária varia de 100 m, durante noites claras e calmas, para 3.000 m ou mais durante a tarde nas regiões secas [23].

2.6 Ciclo da águas e sua presença na atmosfera

- **Açúcar e carbono**

A maior parte da atmosfera terrestre é composta por nitrogênio. O oxigênio, por sua vez, é responsável por apenas 21 % do ar que respiramos. O restante da atmosfera, uma porção bem pequena, de cerca de 1 %, é composto de dióxido de carbono, argônio, ozônio, vapor d'água e outros gases. Esses gases provavelmente se originaram de vários processos que ocorreram conforme a Terra evoluiu e cresceu como um planeta.

Mas alguns cientistas acreditam que a atmosfera da Terra nunca teria o oxigênio de que precisamos sem as plantas. As plantas (e algumas bactérias) liberam oxigênio durante a fotossíntese, o processo que utilizam para transformar água e dióxido de carbono no açúcar que usam como alimento.

A fotossíntese é uma reação bastante complexa. De certa maneira, parece com a maneira que seu corpo quebra o alimento em combustível que pode armazenar. Basicamente, ao usar a energia do Sol, uma planta pode transformar dióxido de carbono e água em glicose e oxigênio. Em termos químicos, acontece o seguinte:

$6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} + \text{Luz} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$. Em outras palavras, enquanto inalamos oxigênio e liberamos dióxido de carbono, as plantas inalam o dióxido de carbono e liberam oxigênio. Há cientistas que acreditam que nossa atmosfera tinha pouquíssimo ou nenhum oxigênio antes das plantas evoluírem e começarem a produzi-lo. Sem o Sol para alimentar as plantas e as plantas para liberar oxigênio, talvez não tivéssemos ar respirável. E sem as plantas para nos alimentar e aos animais que a maioria das pessoas utiliza como alimento, também não teríamos nada para comer. Fica claro que as plantas são importantes, mas não só porque nos dão alimento e oxigênio, mas sim porque nos ajudam a controlar a quantidade de dióxido de carbono, um gás do efeito estufa, na atmosfera. Elas protegem o solo do vento e do escoamento de água, sendo muito importantes no controle da erosão. Além disso, liberam água no ar durante a fotossíntese, que, juntamente com o resto da água no planeta, participa de um gigantesco ciclo que controlado pelo Sol [24].

➤ **Água e fogo**

O Sol exerce um grande efeito sobre a água. Sua presença aquece os oceanos na região dos trópicos e sua ausência resfria a água ao redor dos pólos. Por causa disso, as correntes oceânicas movem grandes quantidades de água quente e fria, afetando de maneira drástica o clima e as temperaturas ao redor do mundo. O Sol também controla o ciclo da água, que move cerca de 495 mil km³ de vapor d'água pela atmosfera todos os anos.

Se você já saiu de uma piscina em um dia quente e percebeu alguns minutos depois que já estava seco de novo, teve uma experiência em primeira pessoa da evaporação. Agora, se você já viu água se formando na lateral de uma bebida gelada, comprovou a existência da condensação. Estes são os componentes principais do ciclo da água, também chamado de ciclo hidrológico, que exerce a

troca de umidade entre massas de água e terra. Esse ciclo é o responsável pelas nuvens, pela chuva e pelo nosso abastecimento de água potável [24].

2.7 A importância do monitoramento da umidade relativa do ar para a agricultura

Por ser inibidora de gastos com água e energia elétrica, e por prevenir doenças, o monitoramento da umidade do solo e do ar tem sido cada vez mais importante na agricultura. Ao conhecer a quantidade de água disponível no meio ambiente, o produtor rural pode irrigar somente quando for necessário. Mais importante ainda do que isso, é que ele terá a possibilidade de ter um estudo diferenciando das áreas dentro de sua propriedade, mostrando quais têm maior facilidade ou dificuldade de reter água. Este acompanhamento evita a incidência de doenças na plantação, decorrente da quantidade de água aplicada na plantação [25].

O monitoramento da chuva e de outras variáveis climáticas também ajudam o agricultor no manejo de sua cultura. As melhores opções são os sensores de umidade do solo e do ar, pois podem ser utilizados com o objetivo de poder visualizar os dados em tempo real no próprio equipamento ou integrado a uma estação meteorológica. Eles auxiliam o agricultor a reduzir o consumo de água e energia elétrica, aumentando a eficiência da irrigação.

Não há dúvidas de que o melhor modo do agricultor manejar a plantação é conhecer bem a região de seu cultivo, seja com relação ao tipo de solo ou características climáticas ao longo dos meses na região. Saber as épocas do ano em que costuma ter maior ou menor incidência de chuva, sabendo quais são as condições médias nas quais o cultivo fica exposto e qual a probabilidade de aparecerem problemas ligados à temperatura, umidade relativa do ar, ventos ou chuvas e presença de água no solo, é fundamental. Baseado nessas informações,

que compõem o histórico de dados meteorológicos e de umidade do solo anteriores na região, o agricultor fica mais preparado e sabe melhor sobre o que esperar em cada época do ano, podendo efetuar um melhor planejamento das atividades de plantio, manutenção, pulverização de agroquímicos ou fertilizantes e colheita.

Todo esse histórico pode ser obtido com a instalação de estação meteorológica automática própria, colocada na propriedade, além dos sensores de umidade do solo, o que facilita as medições e o acompanhamento das condições de clima e solo na área monitorada [25].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

Neste projeto, utilizaram-se o elemento sensor cerâmico capacitivo de zircônia (ZrO_2) e de titânia (TiO_2), na proporção 1:1 (em massa), desenvolvidos em trabalhos anteriores do Grupo TECAMB (Figura 3.1a) e o sensor comercial da marca NOVUS (Figura 3.1b).

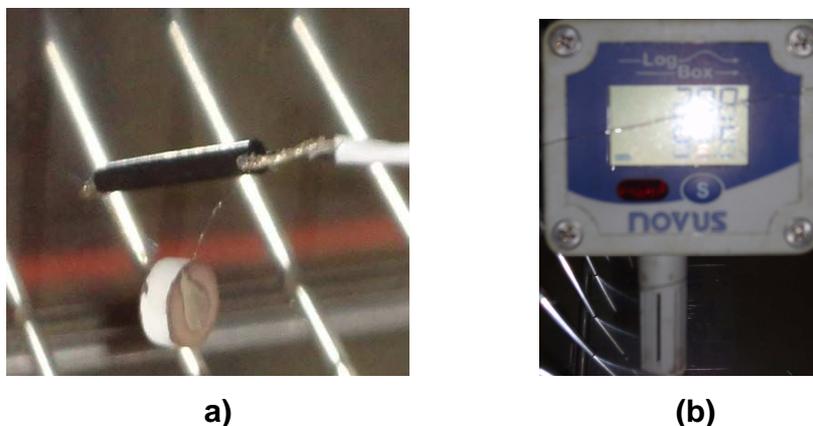


Figura 3.1 - Fotografias do a) elemento sensor cerâmico capacitivo e b) do sensor comercial da marca NOVUS.

Para a obtenção dos resultados de capacitância/impedância do sensor produzido pelo Grupo TECAMB/LAS/INPE, bem como da umidade relativa e da temperatura analisada pelo sensor comercial, os equipamentos utilizados foram uma Ponte RLC da marca PHILIPS que mede resultados de capacitância e de impedância (Figura 3.2) e uma câmara climática da marca WEISS TECHNIK que opera em uma faixa de - 40 a 180 °C de temperatura e de 10 a 98 % de umidade relativa para simular as condições climáticas (Figura 3.3).



Figura 3.2 - Ponte RCL da marca PHILIPS.



Figura 3.3 - Câmara climática da marca WEISS TECHNIK.

3.2 Procedimentos experimentais

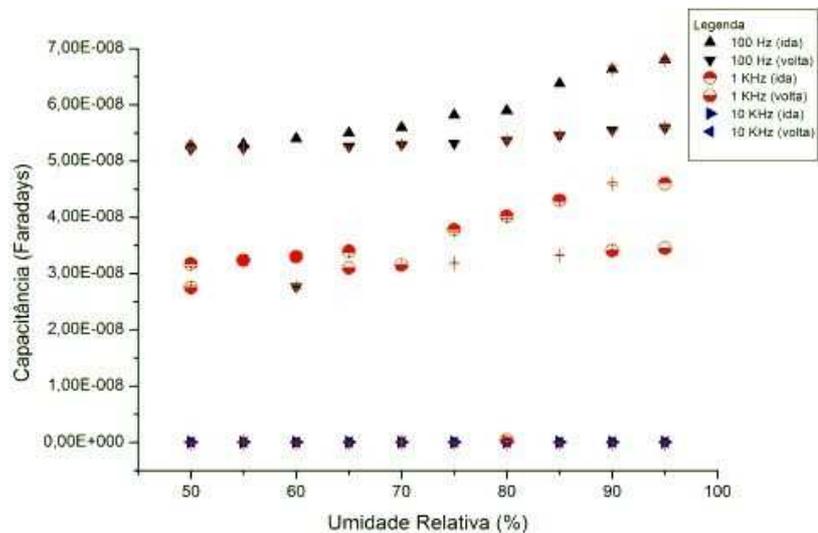
O elemento sensor cerâmico capacitivo, desenvolvido, anteriormente, pelos integrantes do Grupo TECAMB, conectado a ponte RLC, e o sensor comercial da NOVUS foram posicionados estrategicamente no interior da câmara climática, a fim de evitar gradientes de umidade relativa e de temperatura.

As medições elétricas (capacitância/impedância) foram realizadas nas faixas de 15 a 95 % de umidade relativa e de 15 a 40 °C de temperatura ambiente, nas frequências de 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz.

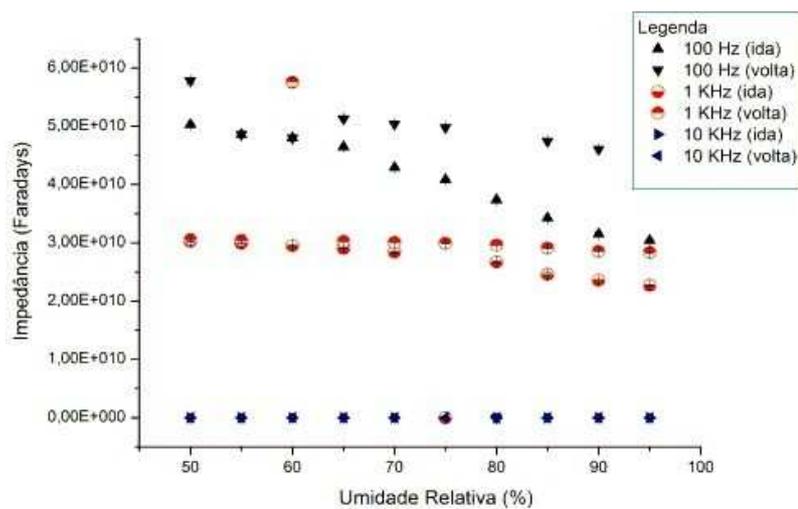
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das caracterizações elétricas, obtidas pelo elemento sensor cerâmico de ZrO_2-TiO_2 , nas faixa de umidades relativas e de temperaturas, nas freqüências de 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz foram discutidas. Os resultados obtidos pelo sensor comercial da marca NOVUS também foram analisados.

Na Figura 4.1a, o elemento sensor cerâmico, em estudo, apresentou comportamento linear a partir de 60 % de umidade relativa, nas freqüências de 100 Hz e 1 kHz. Nessas medições se verificou histerese em umidades relativas altas. Na freqüência de 10 kHz, os elementos sensores cerâmicos não responderam adequadamente. Todas as medições foram realizadas na temperatura de 15 °C. Na Figura 4.1b, as variações de impedância foram coerentes com as medições de capacitância.



a)

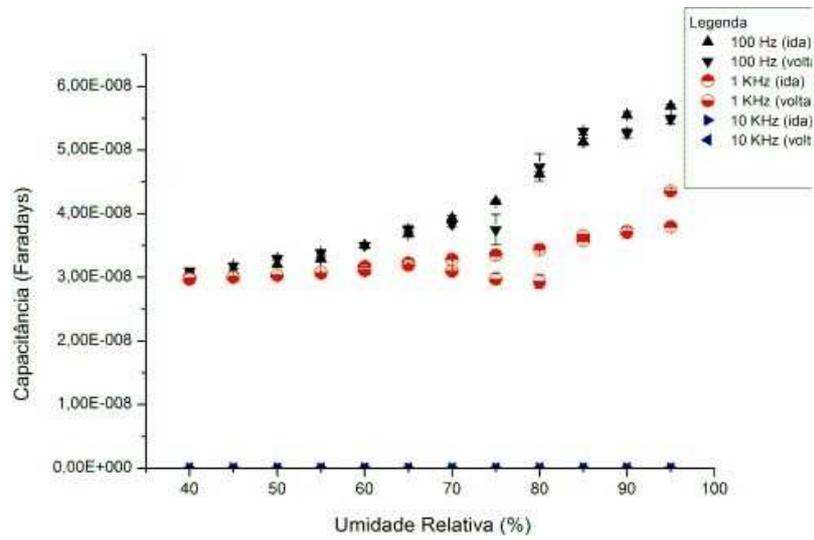


(b)

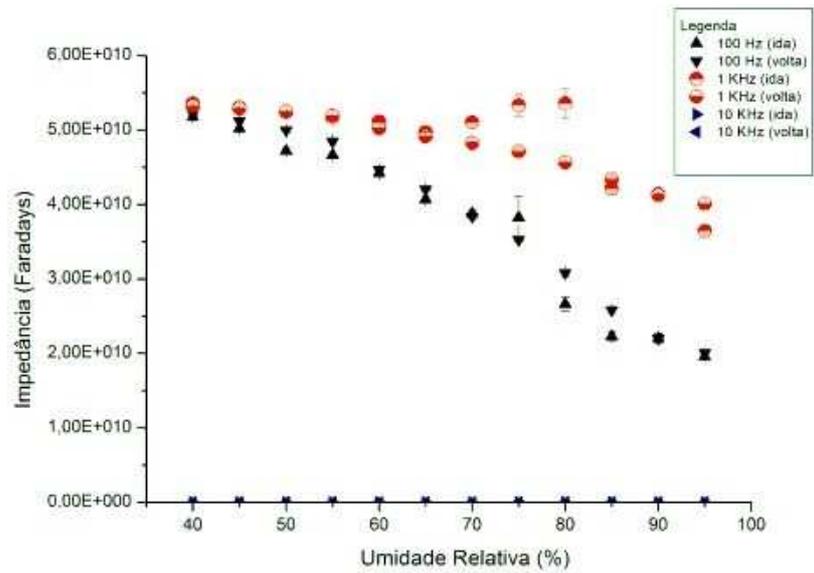
Figura 4.1 – Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 15 °C.

Na temperatura de 20 °C, conforme pode se observar na Figura 4.2a, o elemento sensor cerâmico apresentou comportamento linear, praticamente, em toda a faixa de umidade relativa, para a frequência de 100 Hz. Na frequência de 1 kHz, a

variação de capacitância foi menor, porém linearizável. Em ambos os casos citados, cujas frequências foram de 100 Hz e de 1 kHz, a histerese foi menor quando comparada com as caracterizações elétricas realizadas na temperatura de 15 °C. No entanto, para a frequência de 10 kHz não houve resposta adequada, com a literatura consultada. Na Figura 4.2b, as variações de impedância foram coerentes com as medições de capacitância.



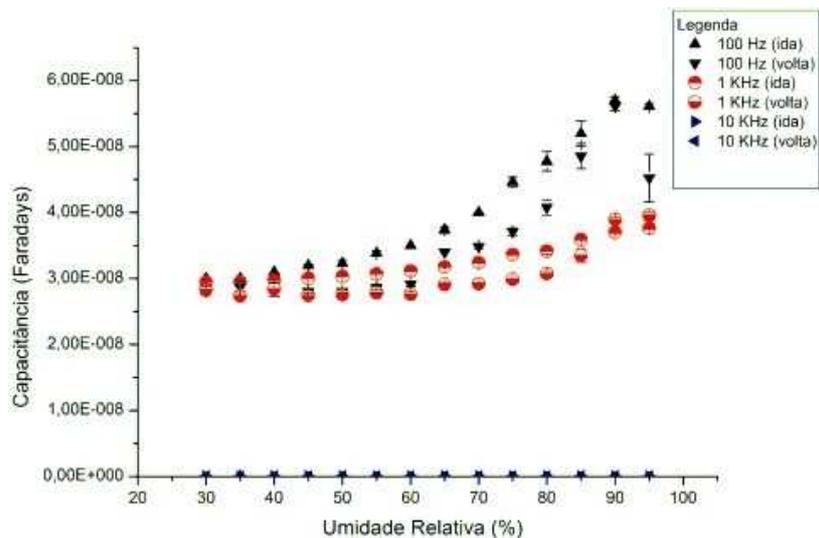
a)



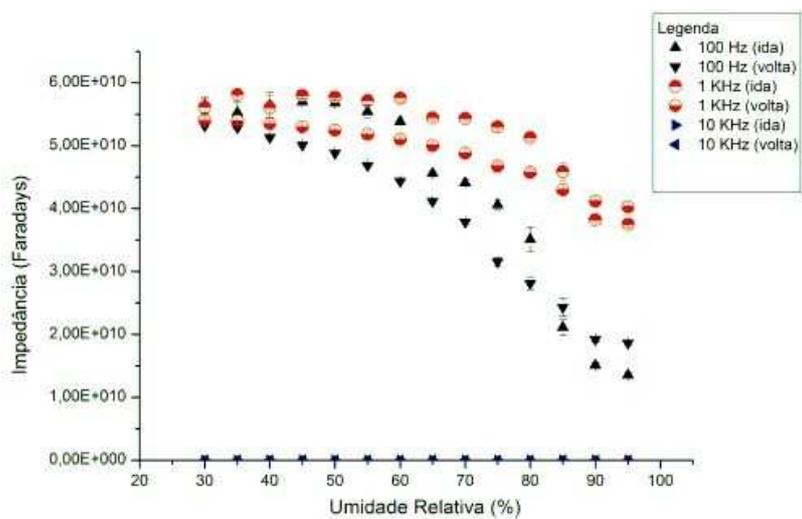
b)

Figura 4.2 – Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 20 °C.

Na Figura 4.3a, o elemento sensor cerâmico apresentou comportamento linearizável semelhante até 40 % de umidade relativa, para as frequências de 100 Hz e de 1 kHz. A partir da umidade de 40 %, o elemento sensor cerâmico, na frequência de 100 Hz, apresentou maior variação de capacitância. No entanto, em ambos os casos, ocorreu um comportamento linear ao longo de toda a faixa de umidade relativa. Nessas medições se verificou histerese mais evidenciada nas umidades relativas de 55 a 85 %. Novamente, na frequência de 10 kHz, os elementos sensores cerâmicos não responderam adequadamente. Todas as medições foram realizadas na temperatura de 25 °C. Na Figura 4.3b, as variações de impedância foram coerentes com as medições de capacitância.



a)

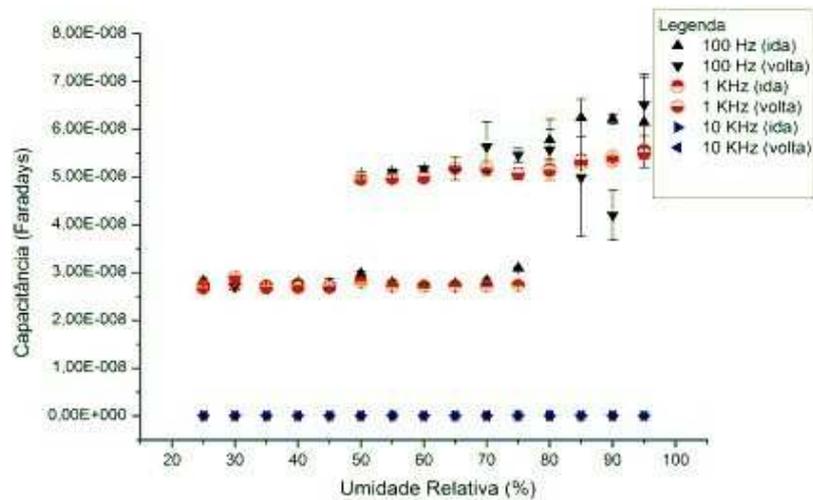


b)

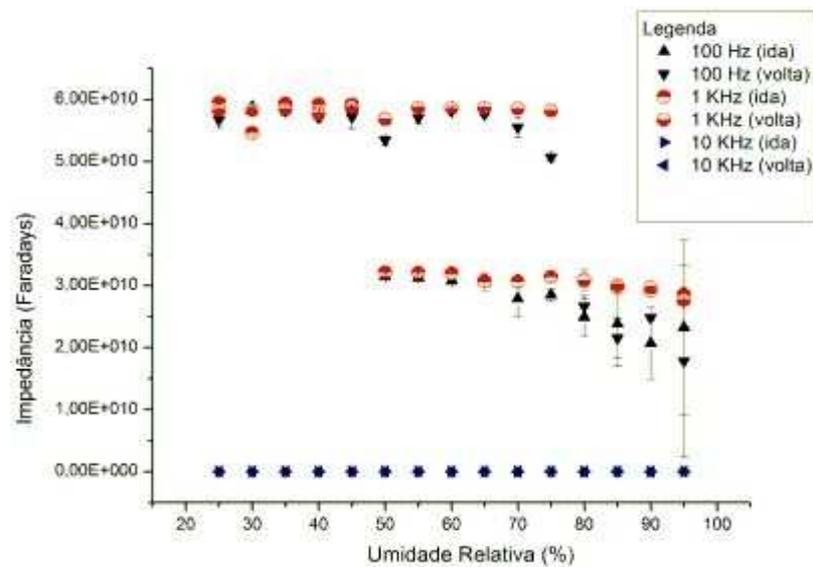
Figura 4.3 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 25 °C.

Nas próximas Figuras, 4.4a, 4.5a e 4.6a, o elemento sensor cerâmico apresentou comportamentos semelhantes às Figuras 4.1a, 4.2a e 4.3a, as quais foram comentadas. Os resultados mais coerentes, de acordo com a literatura consultada, deram-se para as frequências de 100 Hz e 1 kHz, nas temperaturas ambiente de 30 a 40 °C.

Nas Figuras de 4.4b até 4.6b, as variações de impedância foram coerentes com as medições de capacitância.

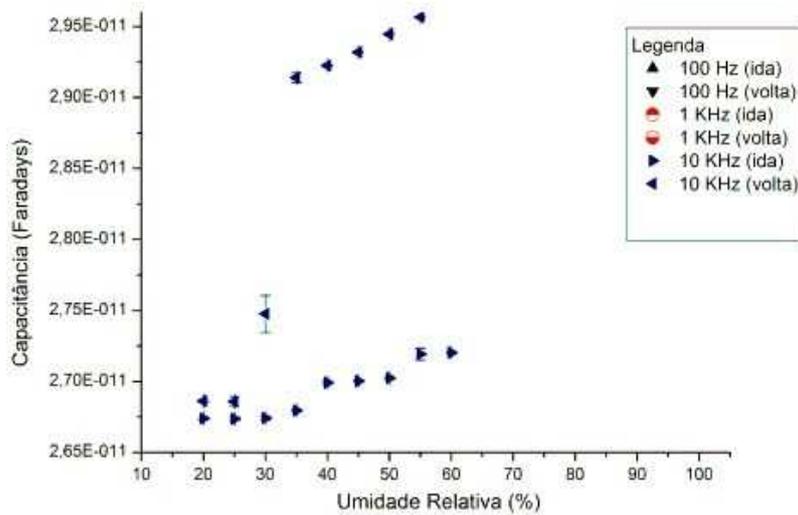


a)

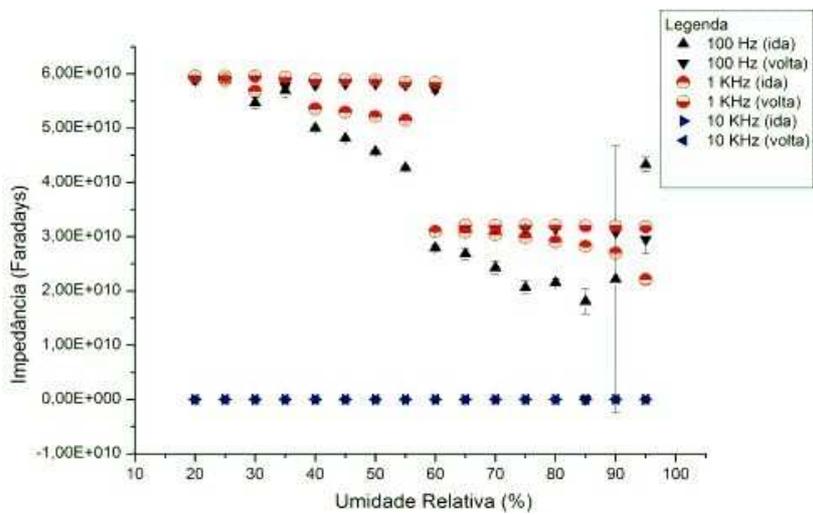


(b)

Figura 4.4 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 30 °C.

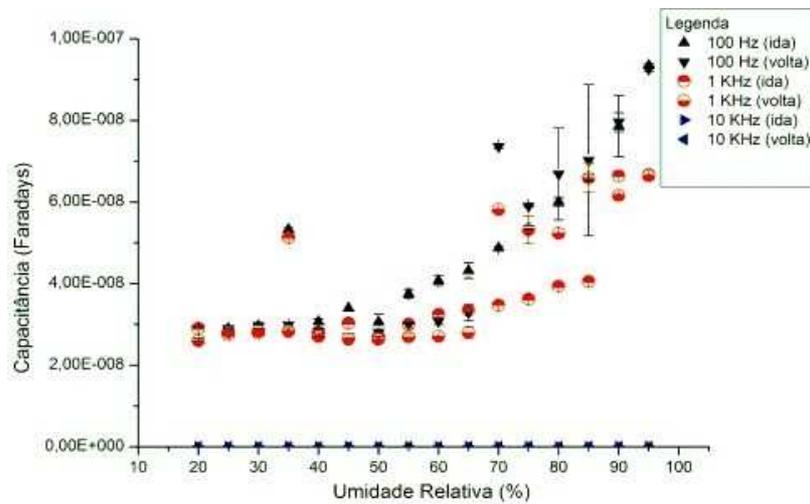


a)

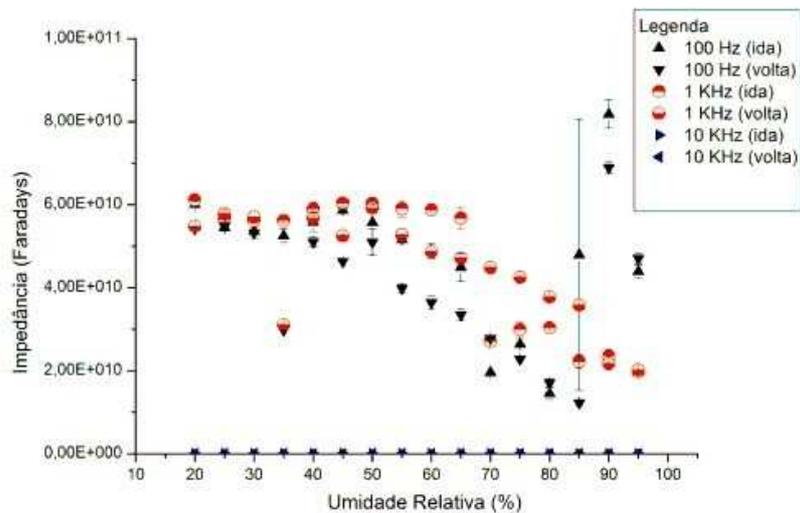


b)

Figura 4.5 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 35 °C.



a)



b)

Figura 4.6 - Curvas de a) Capacitância e b) Impedância em função da umidade relativa, na temperatura de 40 °C.

Em todas as figuras analisadas, observa-se que com o aumento das freqüências aplicadas ocorre a diminuição das capacitâncias obtidas para o elemento sensor cerâmico.

Na Tabela 4.1, os valores das médias e dos desvios padrões do sensor comercial, em %UR, e dos valores inseridos na câmara climática foram mostrados. Na Figura 4.7, os resultados obtidos pelo sensor comercial mostram um comportamento linear em toda faixa estudada, porém com valores altos de desvios padrões. Outro ponto importante se deve a diferença das medições em baixas e altas umidades relativas entre o sensor comercial e os valores inseridos na câmara climática.

Tabela 4.1 - Médias e desvios padrões das umidades relativas coletadas pelo sensor comercial da NOVUS em comparação com os dados da câmara.

Câmara climática		Sensor comercial	
15,00	0,00	16,17	0,57
20,00	0,00	23,21	0,87
25,00	0,00	24,39	9,79
30,00	0,00	29,94	10,48
35,00	0,00	34,36	12,05
40,00	0,00	40,20	12,63
45,00	0,00	45,04	14,12
50,00	0,00	49,99	14,33
55,00	0,00	54,95	15,83
60,00	0,00	59,25	17,10
65,00	0,00	63,87	18,41
70,00	0,00	68,28	19,57
75,00	0,00	71,93	20,74
80,00	0,00	76,00	21,86
85,00	0,00	79,66	22,82
90,00	0,00	82,88	23,81
95,00	0,00	86,62	24,71

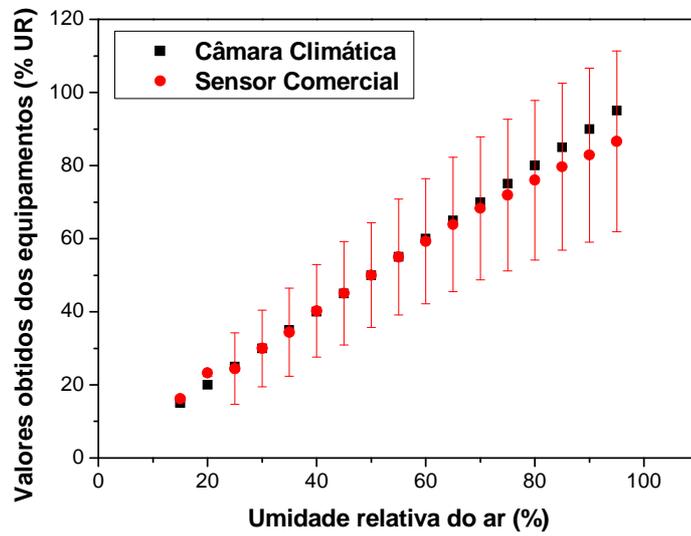


Figura 4.7 - Curvas dos valores obtidos pelo sensor comercial (%UR) e dos valores inseridos na câmara climática em função da umidade relativa, na temperatura ambiente de 25 °C.

5 CONCLUSÃO

O elemento sensor cerâmico apresenta potencial para ser utilizado para o monitoramento de umidade relativa do ar, em diferentes temperaturas; entretanto os resultados apresentados não foram conclusivos. As melhores frequências aplicadas foram 100 Hz e 1 kHz. A partir de 20 %, a histerese se torna menor.

O estudo elétrico de capacitância e de impedância, obtidos pelo elemento sensor cerâmico, desenvolvido pelos Pesquisadores do Grupo TECAMB/LAS, do INPE, revela padrões que em uma análise de correlação se tornam uma importante ferramenta para medições climáticas de umidade relativa. No entanto, outras análises deverão ser realizadas futuramente no decorrer deste projeto, com o objetivo de melhorar a coleta de dados para que assim seja possível determinar quais as melhores condições de temperatura e frequências possam trazer resultados mais confiáveis.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FAGAN, J. G.; AMARAKOON, V. R. W. Humidity sensors. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, v. 72, n. 3, p.119-132, 1993.
- [2] YANG, S.; WU, J. Ceramic humidity sensors. *J. Mater. Sci.*, v. 26, p. 631-635, 1991.
- [3] OLIVEIRA, R. M.; NONO, M. C. A.; KURANAGA, C.; WADA, M. Development of ZrO₂-TiO₂ porous ceramic as soil humidity sensor for application in environmental monitoring. *Mater. Sci. Forum*, v. 30-531, p. 14-419, 2006. 5th International Latin-American Conference on Powder Technology, Costa do Saúpe, BA, 2005.
- [4] OLIVEIRA, R. M.; NONO, M. C. A.; BRITTO FILHO, G. P. Influence of Nb₂O₅ on the electrical properties of porous ZrO₂-TiO₂ ceramic used as soil humidity sensor for environmental monitoring. *Mater. Sci. Forum*, v. 91-593, p. 02-407, 2008. 6th International Latin-American Conference on Powder Technology, Búzios, RJ, 2007.
- [5] OLIVEIRA, R. M. Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmicas porosas de ZrO₂-TiO₂ para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos. Tese de Doutorado, Curso de pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, INPE. INPE-16723-TDI/1661-TDI. Orientadora: Maria do Carmo de Andrade Nono.
- [6] SENSORES CAPACITIVOS em: http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap_07/sens_capa.htm. Acesso em 07/2012.

- [7] TRAVERSA,E. Ceramic sensors for humidity detection: The state-of-the-art and future developments. Sensors and actuators B, v.23,p.135-156,1995.
- [8] O AR ATMOSFÉRICO Disponível em: http://www.ace.mmu.ac.uk/eae/Atmosphere/Older/Trace_Gases.html. Acesso: 07/2012.
- [9] Dióxido de carbono, NASA Earth Fact Sheet, (atualizado em 2007.01). Metano, IPCC TAR table 6.1, (atualizado até 1998).
- [10] Trace gases (em inglês) Acessado em 06/2012.
- [11] NOAA Earth System Research Laboratory (em inglês) Acessado em 06/2012.
- [12] Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas TAR table 6.1 (em inglês) Acessado em 07/2012.
- [13] Meio Ambiente, a atmosfera disponível em: pt.wikipedia.org/. Acesso em 07/2012.
- [14] A Puzzling Collapse of Earth's Upper Atmosphere (em inglês) Acesso em 07/2012.
- [15] Wallace & Robbs: Atmospheric Science. Elsevier, Canada 2006 (em inglês).
- [16] The Mass of the Atmosphere: A Constraint on Global Analyses (em inglês) Acesso em 07/2012.
- [17] Lutgens, Frederick K. and Edward J. Tarbuck (1995) The Atmosphere, Prentice Hall, 6th ed., pp14-17, ISBN 0-13-350612-6 (em inglês).

[18] NASA - Earth Fact Sheet (em inglês) Acessado em 07/2012.

[19] Global Surface Temperature Anomalies (em Inglês).

[21] Earth's Radiation Balance and Oceanic Heat Fluxes (em Inglês).

[22] Coupled Model Intercomparison Project Control Run (em Inglês).

[23] B. Windley: The Evolving Continents. Wiley Press, New York 1984 (em inglês).

[24] Ciclo das águas e sua presença na atmosfera Tracy Wilson - traduzido por HowStuffWorks Brasil, disponível em: www.hsw.uol.com.br/. Acesso em 07/2012.

[25] Portal Dia de Campo, disponível em: www.diadecampo.com.br. Acesso: 07/2012.