



**MONITORAMENTO DE 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)**

Fernanda Cristina Reis (UNIVAP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: fcristinareis@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

Julho/2013

Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais João Carlos Reis e Aparecida Elisabete Ramos Reis por terem me dado esta oportunidade única de estar estudando e sem os quais não estaria aqui hoje.

A Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e ao Dr. Rodrigo de Matos Oliveira por toda confiança, atenção e suporte para que eu pudesse ter a exclusiva oportunidade de realizar o projeto.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Adriano, Jonathan, Sergio Mineiro e Silvelene por toda experiência e ajuda transmitida, além do companheirismo, que foi essencial para a preparação de todo projeto.

Ao CNPq e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de realizar Iniciação Científica, na qual eu aprendi muito e adquiri experiências.

Resumo

O monitoramento de parâmetros ambientais consiste em um processo de coleta de dados, estudo e acompanhamento das variáveis do meio, com o objetivo de avaliar e identificar as condições dos recursos naturais. Dessa forma, a precisão e a confiabilidade dos dispositivos envolvidos são fatores de extrema importância. Nesse sentido, os sensores cerâmicos de umidade, desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais – TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, mostraram se bastante promissores. Estes sensores cerâmicos são capacitivos, em formato de *sandwich*, confeccionados a partir de pastilhas de pós comerciais de ZrO_2 e de TiO_2 , metalizadas em ambos os lados, a fim de gerar o efeito elétrico. Os objetivos principais desse trabalho foram investigar as influências das características físicas e químicas do ambiente (ar) na capacidade de absorção/adsorção de moléculas de água pelo elemento sensor cerâmico, em laboratório, e avaliar seu comportamento em condições climáticas adversas. As caracterizações elétricas foram realizadas com valores crescentes/decrescentes de umidade do ar, em diferentes temperaturas, através de uma ponte RLC, acoplada a uma câmara climática. Os resultados obtidos mostraram que os elementos sensores cerâmicos apresentaram tendência a linearidade em uma ampla faixa de umidade e temperatura e estabilidade nos ciclos térmico e de tempo.

Palavras-chave: monitoramento ambiental; umidade do ar; sensores cerâmicos.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1 Perfil vertical da atmosfera com a variação de temperatura em relação à altitude.....	5
Figura 3.1 Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico.....	9
Figura 3.2 Fluxograma representativo do processamento dos elementos sensores cerâmicos porosos de ZrO_2-TiO_2	10
Figura 3.3 Câmera Climática WEISS TECHNIK.....	11
Figura 3.4 Ponte RLC PHILIPS FLUKE/PM6304.....	11
Figura 4.1 Comportamento do dispositivo sensor cerâmico em função de valores crescentes (C)/decrescentes (D) de umidade relativa do ar, em 2 séries de medições elétricas de capacitância, realizadas na frequência de 1 kHz, na temperatura ambiente de 50 °C.....	13

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Sensores capacitivos.....	3
2.2 Mecanismos de adsorção de água nos elementos sensores.....	3
2.3 Atmosfera.....	4
2.3.1 Estrutura atmosférica.....	4
2.3.2 Vapor de água na atmosfera.....	7
2.4 A importância do monitoramento de umidade.....	7
3 MATERIAIS E MÉTODOS	9
3.1 Elemento sensor cerâmico de ZrO_2-TiO_2	9
3.2 Medições realizadas com os elementos sensores cerâmicos.....	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
5 CONCLUSÃO	15
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17

1. INTRODUÇÃO

Os sensores capacitivos são formados, basicamente, por um conjunto de duas placas condutoras separadas por um material dielétrico, que para este trabalho foi utilizado materiais cerâmicos. Este tipo de sensor sofre uma variação das propriedades elétricas em função de grandezas físicas e químicas, permitindo medir com grande precisão pequenas variações do meio. Dessa forma, estes sensores são largamente utilizados em vários setores nas indústrias, como sensores capacitivos de pressão, de aceleração, de fluxo de gases ou líquidos, de umidade, de concentração de compostos químicos, entre outros, assim como no monitoramento de parâmetros ambientais [1].

Existem diferentes tipos de materiais que podem ser utilizados como sensores de umidade, como, por exemplo, filmes poliméricos orgânicos, eletrólitos e cerâmicos. Cada material que compõem os elementos sensores capacitivos de umidade apresentam características específicas, influenciando o comportamento do mesmo. Os sensores de materiais cerâmicos suportam faixas maiores de temperatura e de umidade sem que ocorra a desagregação de sua estrutura, quando comparados com os outros materiais, porém apresentam limitações relacionadas ao controle de sua microestrutura porosa [2].

Os sensores de umidade, desenvolvidos no LAS-INPE, são capacitivos (em formato *sandwich*), compostos pela pastilha cerâmica de ZrO_2-TiO_2 , que fica disposta entre duas placas condutoras. Estes equipamentos utilizam a capacitância como parâmetro, pois quanto maior a quantidade de água entre as duas placas condutoras, ou seja, quanto maior absorção/adsorção de moléculas de água na superfície cerâmica, maior a variação da capacitância [1].

1.1. Objetivo

Elaboração de uma relação das medidas elétricas com a faixa de umidade relativa do ar estabelecida, em determinadas temperaturas, a fim de definir um modelo gráfico das relações da capacitância e umidade relativa, considerando os diferentes sistemas de conexão dos sensores de umidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Material cerâmico

Os materiais cerâmicos são elementos metálicos e não-metálicos, formados por ligações interatômicas ou iônicas. Normalmente são formados através de aplicação de calor, ou algumas vezes de calor e pressão. Possuem como característica a estabilidade química ou térmica, quando comparado como os materiais metálicos apresentam a propriedade dielétrica muito superior [2].

O setor cerâmico é amplo e heterogêneo, tem composições variadas. O processamento cerâmico, como a estrutura da matéria-prima, a conformação e os ciclos de tratamento térmicos, afetam diretamente as propriedades físicas. As propriedades físicas e a estrutura do corpo cerâmico são fatores que definem a sua aplicação [2].

A aplicação do produto cerâmico depende de suas características, podem variar desde produtos rústicos, como tijolo, telhas e porcelanas, até produtos usados como isoladores elétricos ou supercondutores.

As cerâmicas de óxidos metálicos apresentam vantagens em relação à resistência mecânica, contaminantes químicos e estabilidade física e química em ambientes hostis. Sua estrutura propicia a passagem da água livremente através de sua microestrutura, onde ocorre a condensação na capilaridade dos poros entre as superfícies dos grãos, viabilizando o uso como elemento sensor [2].

2.2. Mecanismo de adsorção de moléculas de água nos elementos sensores

A superfície de um corpo, ou de uma fase são regiões de fronteira, que possuem ligações interrompidas, ou seja, excesso de energia na superfície. Esta atividade aumenta a possibilidade das espécies químicas situada na superfície de sólidos de se interagirem [3].

A superfície do material cerâmico de óxidos metálicos entra em contato com as moléculas de água, os oxigênios, presente na molécula de água, são atraídos pelos átomos metálicos da superfície. A carga parcial negativa do átomo de oxigênio da água é atraída pelo metal da superfície do sólido e as cargas parciais positivas dos átomos de hidrogênio da molécula de água são repelidas. As moléculas de água são adsorvidas

quimicamente na superfície do material cerâmico, através de ligações covalentes entre o oxigênio da água e o metal da superfície. No momento que ocorre a ligação covalente, por dissociação formam dois íons de hidroxila (OH^-) para cada molécula de água. As hidroxilas adsorvidas pelos cátions metálicos na superfície 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 [1,4].

Quando a primeira camada de água é adsorvida, as camadas subsequentes 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 camada adsorvida aumenta à medida que a quantidade de água absorvida pela microestrutura porosa do elemento sensor aumenta. A adsorção física ocorre em mais camadas quando ocorre um aumento na pressão de vapor da água. As moléculas de água ligadas isoladamente são capazes de formar forças dipolos e reorientando-se, livremente, sob um campo elétrico aplicado externamente, resultando em um aumento na constante dielétrica [5].

2.3. Atmosfera

Atmosfera é a denominação dada à camada de gases que envolvem a Terra, estes gases estão presos à Terra pela força da gravidade. A atmosfera tem como função regular a temperatura na Terra, protegendo a vida na terra, absorvendo a radiação ultravioleta solar, aquecendo a superfície por meio de retenção de calor, reduzindo a variação de temperatura entre o dia e noite [6].

2.3.1. Estrutura atmosférica

A principal classificação da estrutura atmosférica é feita de acordo com a variação de temperatura em relação à altitude, portanto é esboçado um perfil com base no gradiente térmico em função da altitude, conforme pode ser visto na Figura 2.1 [7].

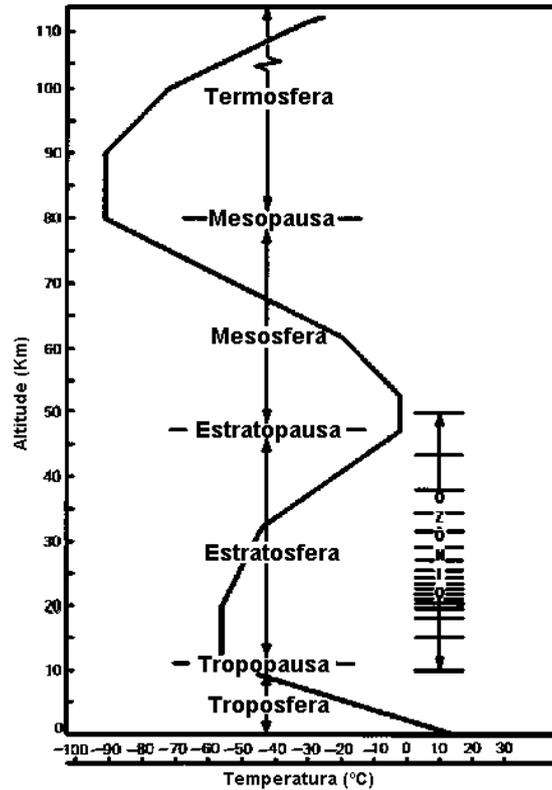


Figura 2.1 Perfil vertical da atmosfera com a variação de temperatura em relação à altitude. Fonte: [6]

a. Troposfera

A troposfera é a camada que estende da superfície da terra até uma altitude que varia entre 10 km e 12 km. Essa espessura varia conforme a latitude e o tempo, como no Equador, sua altitude alcança em torno de 16,5 km ou nos pólos, onde a espessura é em torno de 8,5 km. Esta camada representa 89% do peso atmosférica e é a única camada em que os seres vivos podem respirar, é na troposfera, onde todos os processos climáticos que regem a vida na terra ocorrem.

b. Tropopausa

Acima da troposfera encontra-se a tropopausa, que a mudança na tendência de variação da temperatura com a altitude, é uma região de transição da troposfera para estratosfera, situada em média a altura de 17 km, sobre a linha do equador, esta distância da tropopausa varia de acordo com as condições climáticas, da temperatura do ar, da latitude, entre outros.

c. Estratosfera

Na estratosfera a temperatura aumenta com a altitude, inverso a troposfera. Esta camada tem grande importância no ponto de vista ambiental, pois nela se encontra a maior quantidade de ozônio, uma camada espessa, responsável pela manutenção da temperatura terrestre, protegendo a terra das radiações ultravioleta emitidas pelo Sol.

d. Estratopausa

A estratopausa é a área de transição da estratosfera para a mesosfera, onde a temperatura para de aumentar conforme a elevação da altitude, com o início da mesosfera.

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 mesopausa 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.

f. Mesopausa

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.

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 $1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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.

2.3.2. Vapor de água na atmosfera.

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, sua concentração é variável, de 0% a 4% em volume da mistura total, o que depende da temperatura e da pressão atmosféricas, portanto depende da região, que caracteriza sua escala de temperatura e pressão, e também da estação do ano. Exerce papel de destaque no balanço de energia próximo à superfície do solo, sua presença é indispensável para toda espécie de vida na terra.

È de grande utilidade conhecer a quantidade de vapor d'água contida no ar atmosférico sobre um determinado local, tal informação fornece boa indicação da quantidade de precipitação que poderá ocorrer naquele local se as demais condições atmosférica forem favoráveis. A existência de vapor d'água pode ser representada quantitativamente de varias formas. Como pressão de vapor, umidade absoluta, razão de mistura e umidade relativa.

A umidade relativa é o índice mais conhecido para descrever o conteúdo de vapor d'água, indica a proximidade da saturação do ar . A variação da umidade relativa causadas por variação da temperatura ocorre na natureza tipicamente por variação diurna da temperatura, movimentos horizontal e vertical de massa de ar [7].

2.4. A importância do monitoramento de umidade.

O monitoramento ambiental é um processo de coleta de dados, estudo e acompanhamento contínuo e sistemático das variáveis ambientais, com o objetivo de identificar e avaliar, qualitativa e quantitativamente, as condições dos recursos naturais em um determinado momento, assim como as tendências ao longo do tempo. As variáveis sociais, econômicas e institucionais também são incluídas neste tipo de estudo, já que exercem influências sobre o meio ambiente [8].

O monitoramento da umidade relativa é uma ferramenta utilizada por diversos segmentos, com finalidades distintas. Como dentro do processo industrial para controle de qualidade e armazenamento de um produto ou ate mesmo pelo setor público a fim de planejar ou gerencia estratégia de controle de desastre naturais [9].

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1. Elemento sensor cerâmico de ZrO_2-TiO_2

Neste projeto foram utilizados os dispositivos sensores de umidade de cerâmicas porosas, desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais – TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Esses sensores de umidade são capacitivos, confeccionados a partir de pastilhas cerâmicas de ZrO_2-TiO_2 que fica disposta entre duas placas condutoras, em formato de *sandwich*. Para se obter esse dispositivo, depositou-se cola de prata em ambas as superfícies da pastilha cerâmica, para se obter o efeito capacitivo, onde foram acoplados eletrodos de cobre, conforme mostrado na Figura 3.1.

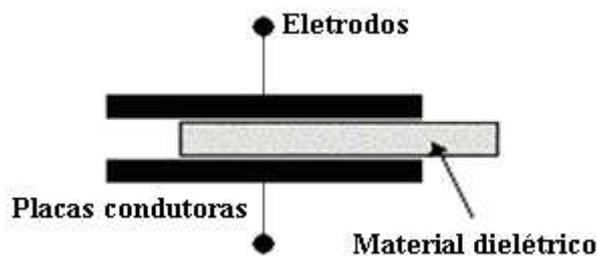


Figura 3.1 Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico. Fonte: adaptada [1].

Os elementos sensores cerâmicos utilizam medições elétricas de capacitância para detectar os estímulos do meio (umidade relativa), pois quanto maior a quantidade de água entre as duas placas condutoras, ou seja, quanto maior absorção/adsorção de moléculas de água na superfície cerâmica, maior os valores de capacitância obtidos.

A pastilha cerâmica, constituinte principal do elemento sensor, foi confeccionada a partir da mistura de pós com uma proporção de 1:1 de TiO_2 (óxido de titânio) e de ZrO_2 (óxido de zircônio). O pó dessa mistura foi colocado em moinho de bolas, sob suspensão alcoólica. Posteriormente, a mistura foi seca em estufa, e o material foi submetido a uma prensagem, em prensa uniaxial, a pressões de 100 MPa em matriz de aço na forma de pastilhas. A etapa de sinterização foi realizada na temperatura de 1100 °C, por 2 horas. Em seguida foi depositada uma fina camada de cola prata, em ambos os

lados da pastilha. A Figura 3.2 mostra, resumidamente, o processamento utilizado para a confecção dos elementos sensores cerâmicos.

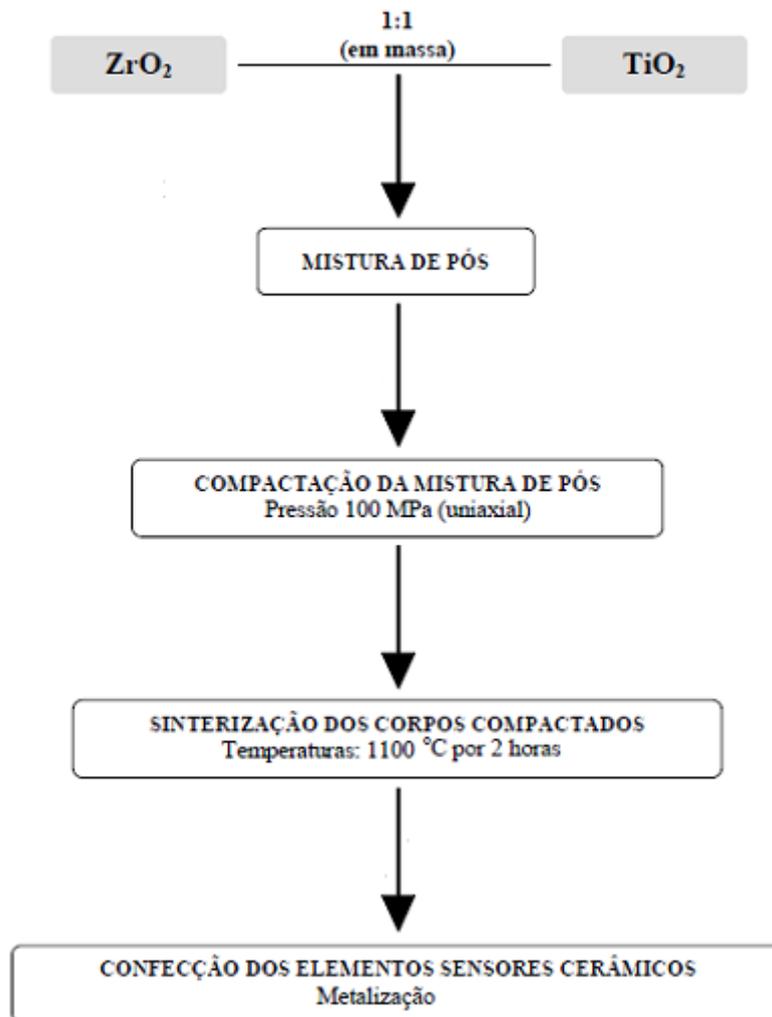


Figura 3.2 Fluxograma representativo do processamento dos elementos sensores cerâmicos porosos de ZrO_2 - TiO_2 .

3.2. Medições realizadas com os elementos sensores cerâmicos

Para simular as condições climáticas, utilizou-se a 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, conforme mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3 Câmera Climática WEISS TECHNIK.

Para obter os dados de capacitância foi utilizado um microcomputador conectado a uma ponte RLC (PHILIPS-FLUKE/PM6304) (Figura 3.4). Esse equipamento é responsável pela excitação e aquisição de sinais elétricos do corpo cerâmico utilizado como elemento sensor.



Figura 3.4 Ponte RLC PHILIPS FLUKE/PM6304.

Nesse projeto, 2 séries de medições elétricas de capacitância foram realizadas em função de valores crescentes/decrescentes de umidade relativa do ar, de 15 até 95 %, em intervalos de 5,3 %, na temperatura ambiente de 50 °C, a fim de avaliar o comportamento do sensor cerâmico em ambiente hostil. Para isso, utilizaram-se a frequência de 1 kHz.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 4.1, a seguir, o dispositivo sensor cerâmico, sinterizado na temperatura de 1100 °C, foi caracterizado eletricamente, através do comportamento da variação de capacitância em função de valores crescentes e decrescentes de umidade relativa do ar, em temperatura ambiente de 50 °C, na frequência de 1 kHz, em duas séries de medições elétricas.

Na “série 1” de medições (Figura 4.1), o elemento sensor cerâmico apresenta um comportamento com maior sensibilidade, ou seja, valores acentuados de capacitância, a partir da umidade relativa em torno de 40 % na ida (crescente) e até 40 % na volta (decrescente). No entanto, na volta (decrescente), a partir de 40 % o sensor cerâmico não responde de maneira acentuada aos estímulos do meio (umidade relativa). Na “série 2”, o comportamento apresentado pelo dispositivo sensor cerâmico se mostra semelhante ao apresentado na “série 1”, porém com valores menores de capacitância ao longo de toda a faixa de umidade relativa medidos. Em ambos os casos, o valor aproximado de 40 % de umidade relativa se torna um divisor de águas no comportamento dos sensores cerâmicos desenvolvidos no TECAMB-INPE, para esta temperatura ambiente (50 °C), na frequência de 1 kHz.

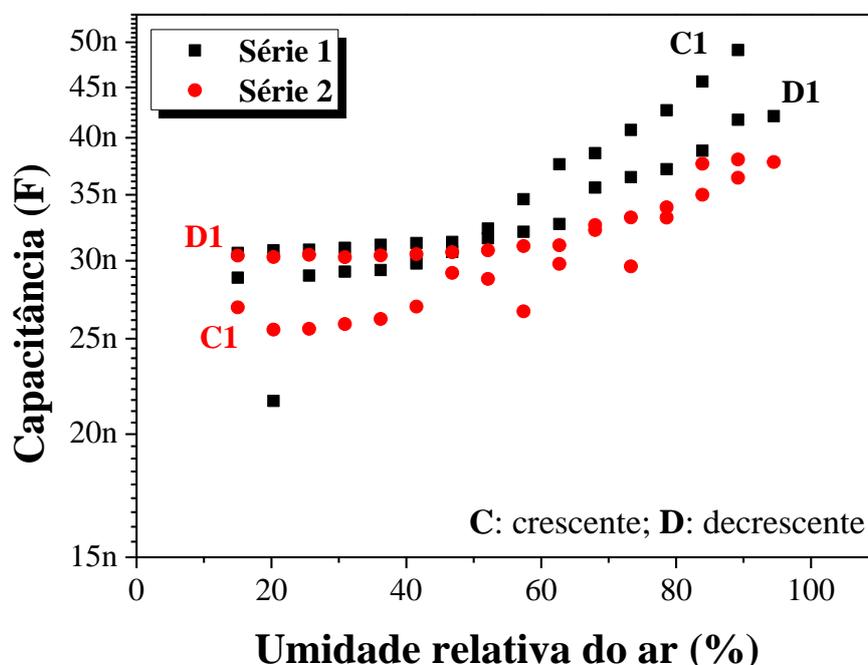


Figura 4.1 Comportamento do dispositivo sensor cerâmico em função de valores crescentes (C)/decrescentes (D) de umidade relativa do ar, em 2 séries de

medições elétricas de capacitância, realizadas na frequência de 1 kHz, na temperatura ambiente de 50 °C.

Em ambas as séries (1 e 2) de medições elétricas de capacitância, os valores crescentes (C1 e C2) apresentam maior linearidade quando comparado com os valores decrescentes (D1 e D2).

5. CONCLUSÃO

O elemento sensor cerâmico, sinterizado na temperatura de 1100 °C, respondeu de maneira mais adequada (apresentando comportamentos de sensibilidade e linearidade) em valores altos de umidade relativa do ar (>40 %). Nas séries 1 e 2, as curvas decrescentes apresentaram valores menores de capacitância quando comparado com as curvas crescentes (histerese). Isso se deve a dificuldade das cerâmicas em desorver as moléculas de água (umidade do ar) adsorvidas quimicamente.

6. Referência Bibliográfica

- [1] 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. 2010.
- [2] CALISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia dos materiais:** Uma introdução. 5ªed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 2002. 589p. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. (Materials Science and Engineering: An Introduction. Copyright© 2000, John Wiley & Sons, Inc.).
- [3] 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.
- [4] GUSMANO, O.; MONTESPERELLI, G.; NUNZIANTE, P.; TRAVERSA, E. Influence of the powder synthesis process on the A. C. impedance response of MgAl₂O₄ spinel pellets at different environmental humidities. In: S. I. Hirano, G. L. Messing and H. Hausner (eds.), **Ceramic powder science IV, ceramic transactions**, v. 22, American Ceramic Society Publishing, Westerville, USA, 1991. p.545-551.
- [5] SENSORES CAPACITIVOS em:
http://www.ufrgs.br/eng04030/aulas/teoria/cap_07/sens_capa.htm. Acessado em 07/2012.
- [6] Site: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>. Acessado em: 16/05/2013.
- [7] BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M. PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. 1ª Edição. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305p. ISBN 85-87918-05-2.
- [8] KULWICKI, B. M. Humidity sensors. *J. Am. Ceram. Soc.*, v. 74, 697-708p., 1991.
- [9] NITTA, T. Development and application of ceramic humidity sensors. In: SEIYAMA, T. (ed.), **Chemical sensor technology**, v.1, Kodansha, Tokyo/Elsevier, Amsterdam, p. 57-78, 1988.