

JOSÉ ÂNGELO DE FARIA

SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO DE ÓXIDO
DE ALUMÍNIO ANODIZADO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorolo-
gia Agrícola, para Obtenção do
Título de "Magister Scientiae".

T
SCIA
FARIA
1975
21/07

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JULHO - 1995

BIBLIOTECA
DEPTO. ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VICOSA

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

F224s
1995

Faria, José Ângelo de, 1947-

Sensor de umidade capacitivo de óxido de alumínio anodizado/José Ângelo de Faria. - Viçosa : UFV, 1995.

78p. : il.

Orientador: Evandro Ferreira Passos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

1. Sensor de umidade de óxido de alumínio - Projetos e construção. 2. Sensor de umidade de óxido de alumínio - Estudos experimentais. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 18.ed. 551.571

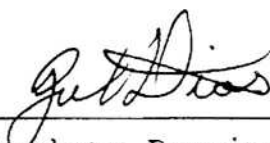
CDD. 19.ed. 551.571

JOSÉ ÂNGELO DE FARIA

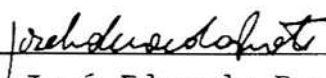
SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO DE ÓXIDO
DE ALUMÍNIO ANODIZADO

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorolo-
gia Agrícola, para Obtenção do
Título de "Magister Scientiae".

APROVADA: 6 de fevereiro de 1995.



Prof. Gutemberg Pereira Dias
(Conselheiro)



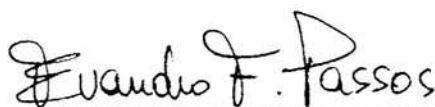
Prof. José Eduardo Prates



Prof. João Francisco Escobedo



Prof. José Mário D. de Melo



Prof. Evandro Ferreira Passos
(Orientador)

À professora Maria Geralda Gianicchinni
Bosco, D^a Zazita, pelo carinho, pela dedicação, pelo
incentivo, pelo estímulo, os quais contribuíram
eficazmente para o prosseguimento dos meus estudos,
motivo pelo qual sou-lhe muito grato.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Evandro Ferreira Passos, pela eficiente orientação, pela dedicação, pelo desempenho, pela irrestrita colaboração e pelo apoio dedicado a este trabalho.

Ao prof. Gutemberg Pereira Dias, pelas valiosas sugestões, pela ajuda, pelo incentivo e pelas críticas científicas que contribuíram para esta pesquisa.

Ao prof. José Maria Nogueira da Costa, pela amizade e pelo incentivo que estimulou o meu retorno ao curso de mestrado.

Aos professores João Francisco Escobedo, José Eduardo Prates e José Mário Domingos de Melo, pelas valiosas sugestões.

Ao prof. Adil Rainier Alves, pela oportunidade de realização do curso.

À minha esposa Zarife e a meus filhos Ângelo e Matheus, pelo carinho e pela compreensão.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

José Ângelo de Faria, filho de Ângelo Antônio de Faria e Maria Barbosa de Faria, nasceu em Bambuí, Estado de Minas Gerais, em 19 de setembro de 1947.

Em dezembro de 1971, concluiu o curso de Licenciatura Curta em Ciências, na Universidade Federal de Minas Gerais.

Em dezembro de 1979, graduou-se em Física, na Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 1993, reiniciou o curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa-MG.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Medidas da Umidade Atmosférica	8
2.1.1. Higrômetro de Fio de Cabelo	8
2.1.2. Higrômetro de Resistência	9
2.1.3. Higrômetros de Ponto de Orvalho	10
2.1.4. Higrômetros Espectroscópicos	11
2.1.5. Psicrômetros	12
2.2. Sensor de Umidade Sólido	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Confecção dos Elementos Sensores	21
3.1.1. Anodização	22
3.1.2. Deposição do Ouro sobre o Elemento Sensor	27
3.1.3. Montagem do Elemento Sensor	28

	Página
3.2. Montagem Experimental para Testes dos Sensores	29
3.2.1. Testes dos Sensores	31
3.3. Teste de Campo	35
3.4. Tempo de Resposta	35
3.5. Constante de Tempo	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1. Capacitância em Função da Umidade Relativa .	38
4.2. Histerese	48
4.3. Resistência do Sensor	51
4.4. Frequência do Oscilador em Função da Umidade Relativa	52
4.5. Teste de Campo	53
4.6. Tempo de Resposta e Constante de Tempo	57
4.7. Considerações Gerais sobre os Sensores	60
5. RESUMO E CONCLUSÕES	62
BIBLIOGRAFIA	64
APÊNDICE	67

EXTRATO

FARIA, José Ângelo de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1995. **Sensor de Umidade Capacitivo de Óxido de Alumínio Anodizado**. Professor Orientador: Evandro Ferreira Passos. Professores Conselheiros: Gutemberg Pereira Dias e José Maria N. da Costa.

O sensor foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa. Basicamente, consiste de um capacitor plano em forma de disco, contendo uma placa de alumínio e outra de delgado filme de ouro, obtido por deposição de evaporação a vácuo. O dielétrico é o óxido de alumínio formado por eletrodeposição sobre a própria placa de alumínio e por anodização, cujo eletrólito foi uma solução de H_2SO_4 a 10%, com densidade de corrente elétrica controlada.

Para a realização dos testes utilizou-se uma câmara de controle de umidade, efetuando-se sucessivas medidas da umidade relativa do ar no interior da câmara do valor

correspondente à capacitância do sensor. Os testes mostraram que a capacitância do sensor varia, exponencialmente, com a umidade relativa do ar. Embora a maioria dos sensores tenha apresentado resistência elétrica muito elevada, não tendo sido possível medi-los, verificou-se, por meio de um dos sensores, que a resistência elétrica é outra grandeza do sensor que também varia com a umidade relativa do ar, sendo a relação entre resistência do sensor e umidade relativa do ar uma função logarítmica.

Verificou-se também que, apesar de a capacitância variar exponencialmente com a umidade e de a resistência variar logaritmicamente com a umidade, pode-se obter uma grandeza derivada da frequência, que, por meio de um circuito oscilador adequado, varie linearmente com a umidade relativa do ar. Isto vem facilitar a utilização desse sensor na construção de um higrômetro.

Mediante resultados obtidos, concluiu-se que o sensor que apresentou melhor desempenho foi aquele obtido com anodização, cuja densidade de corrente foi de $0,10 \text{ mA/cm}^2$ e tempo de anodização de 30 minutos.

1. INTRODUÇÃO

O ar atmosférico é constituído de uma mistura de gases e de vapor d'água. A concentração de vapor d'água na atmosfera é extremamente pequena, chegando, no máximo, a 4% em volume. A quantidade máxima de vapor que o ar pode reter depende da pressão e da temperatura, visto que, para dada pressão, quanto maior a temperatura, maior a capacidade de retenção do vapor d'água pelo ar. Quando a concentração do vapor d'água no ar atinge capacidade máxima de retenção, o ar é dito saturado. Geralmente, o ar encontra-se com uma concentração de vapor menor que a de saturação. A pressão de vapor inferior àquela de saturação, nas mesmas condições de pressão e temperatura, é denominada pressão parcial do vapor. O quociente entre a pressão parcial do vapor e a pressão de vapor de saturação, nas mesmas condições de pressão e temperatura, é a umidade relativa do ar.

O teor de umidade relativa do ar é de grande importância para o desenvolvimento dos vegetais e

microorganismos, além de estar diretamente ligado ao condicionamento dos animais, entre eles, do homem (ROSENBERG et al., 1983).

A determinação da umidade relativa do ar é, portanto, de grande interesse, sendo de alta relevância na meteorologia, na agricultura e nas pesquisas do meio ambiente. Também o seu controle em ambientes fechados, muitas vezes, é desejado, tanto para estudos sobre ambiência como para o monitoramento de variáveis de controle do conforto dos seres vivos em geral.

Muitos materiais têm valor de umidade ótimo para estocagem, visto que, para alguns, um pequeno acréscimo na umidade aumenta, enormemente, o risco de ataque por microorganismos (fungos, por exemplo). Numa galeria de artes, a melhor conservação do tecido e da pintura de um quadro se dá quando a umidade relativa encontra-se entre 55 a 60%. Se a umidade relativa passar os 70%, o risco de ataques de fungos é muito sério.

O controle de umidade proporciona ao homem melhores condições de trabalho, visto que esse controle possibilita maior conforto durante sua permanência no local de trabalho, resultando, conseqüentemente, em maior produtividade (PENMAN, 1958).

Para medir a umidade do ar podem-se usar psicrômetros ou higrômetros. Os psicrômetros fornecem um valor, na maioria das vezes, preciso, mas apresentam a desvantagem de serem necessários alguns minutos para a estabilidade das leituras das temperaturas, principalmente a do termômetro de bulbo úmido. Além disso, uma vez obtidas, as temperaturas

(bulbo seco e bulbo úmido) devem ser trabalhadas analiticamente, ou serem usados tabelas ou gráficos. Também, se se desejar medir a umidade de um local pequeno e fechado, o vapor resultante da evaporação do bulbo úmido afetará o valor real, aumentando-o. Os higrômetros fornecem diretamente o valor da umidade relativa do ar, mas, em geral, são menos precisos que os psicrômetros, e, muitas vezes, apresentam tempo de resposta consideravelmente grande, como, por exemplo, cerca de 5 minutos para o higrômetro de fio de cabelo.

Certas restrições existem para medir a umidade com fins científicos ou tecnológicos. Em ambientes de pequenas dimensões, requer-se um higrômetro também de pequenas dimensões, com tempo de resposta suficientemente rápido e precisão compatível com a finalidade a que se destina (por exemplo: medição da umidade relativa no interior de ninhos de pássaros, nos formigueiros ou nas colméias, etc.). Esse instrumento, muitas vezes, não se encontra disponível no mercado ou é muito caro.

Com o objetivo de construir um higrômetro capaz de preencher essas características, desenvolveu-se um sensor sólido, capacitivo, tendo como elemento sensível o óxido de alumínio. A grandeza associada à umidade, nesse caso, é a capacitância ou resistência elétrica, cujos valores são alterados quando a umidade varia (JASON, 1965; LAI e HIDY, 1968; NAHAR et al., 1984; KHANNA e NAHAR, 1983 e 1986).

Esse sensor poderá ser usado também no monitoramento ou no controle de umidade em ambiente fechado, para medidas de umidade à distância, por meio de transmissões de ondas

eletromagnéticas em locais preenchidos com grãos, além de inúmeras outras aplicações.

Somente um número limitado de metais pode ser anodizado. Metais, como o cobre e outros, podem ser anodizados em um meio altamente alcalino, mas seu filme não serve para fins elétricos. Outros, ao serem anodizados, não apresentam poros em sua camada oxidada. Dentre os metais que podem ser anodizados, o alumínio fornece uma camada, porosa e espessa, de até $1,27 \cdot 10^{-1}$ mm (127 micrômetros), segundo JASON (1965); ou de $7,0 \cdot 10^{-2}$ mm (70 micrômetros), conforme KAJIMOTO et al. (1991), cujos poros permitem a troca de vapor d'água com a atmosfera, permanecendo em equilíbrio de umidade com o meio ambiente.

Objetivando estudar o sensor de óxido de alumínio, este estudo visou:

- a) desenvolver um sensor de óxido de alumínio anodizado;
- b) caracterizar esse sensor, com relação à capacitância e à resistência elétrica, em função das diversas condições de umidade relativa obtidas em laboratório;
- c) analisar a resposta do sensor às condições ambientais durante o curso diário da variação da umidade relativa;
- d) avaliar o tempo de resposta e a constante de tempo do sensor.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O vapor d'água existente no ar exerce uma pressão denominada pressão de vapor. Em dada pressão e temperatura, o ar consegue reter o vapor d'água até certa concentração limite. Nessa condição, o ar é dito saturado e a pressão, que é exercida pelo vapor d'água e apresenta concentração máxima, é dita pressão de vapor de saturação. O valor dessa pressão de vapor de saturação depende da temperatura, visto que aumenta com a elevação da temperatura do ar, segundo a equação de Clapeyron.

Pela lei de Dalton, pode-se afirmar que a pressão atmosférica total é inteiramente devida à soma das pressões parciais de cada constituinte do ar, incluindo o vapor d'água.

Desde que a situação não seja de condensação, o vapor d'água tem comportamento muito próximo ao de um gás ideal. Pode-se, então, usar a equação de Clapeyron:

$$PV = nRT, \quad \text{eq. 1}$$

em que

P = pressão parcial do vapor d'água (Pa),

V = volume do sistema,

n = número de moles da água presente no volume V,

R = constante universal dos gases (8,3143J/K.mol),

T = temperatura na escala Kelvin.

Substituindo n por m/M, em que m é a massa de vapor existente, e M, a massa molecular da água, e fazendo $m/V = \mu$ (massa específica do vapor da água), pode-se escrever:

$$P = \mu RT/M \quad \text{eq. 2}$$

ou

$$\mu = PM/RT. \quad \text{eq. 3}$$

Essa densidade do vapor d'água por unidade de volume do ar atmosférico é denominada umidade absoluta, conforme PEARCY et al. (1989).

Quando a lei dos gases é aplicada, especificamente, ao vapor d'água, a pressão do vapor é representada por "e", e a densidade é expressa em g.m^{-3} .

A densidade do vapor é calculada pela expressão:

$$\mu = 2,17e/T, \text{ em } (\text{g.m}^{-3}).$$

Outra expressão da massa de vapor na atmosfera é a umidade específica (q), que é a razão entre a densidade do vapor d'água e a densidade do ar úmido. Pode-se determinar o valor de q pela expressão:

$$q = 0,622e/(P - 0,379e), \quad \text{eq. 4}$$

em que

P = pressão total do ar,

e = pressão do vapor d'água existente no ar,

0,622 = razão da massa molecular de água (M_w) e de ar seco (M_a),

0,379 = razão $(M_a - M_w)/M_a$.

A razão da pressão do vapor d'água atual, presente na atmosfera (e_a), e a pressão de vapor numa situação da atmosfera saturada (e_s), nas mesmas condições de temperatura, são denominadas umidade relativa (U.R.).

$$U.R. = (e_a / e_s) 100\%, \quad \text{eq. 5}$$

ou, segundo TUBELIS e NASCIMENTO (1986), a umidade relativa também pode ser determinada por:

$$U.R. = (u/u_s) \cdot 100\%, \quad \text{eq. 6}$$

em que

u = umidade absoluta na condição da atmosfera atual,

u_s = umidade absoluta na saturação numa mesma temperatura.

Se o ar atmosférico for resfriado sem perda ou ganho de vapor d'água, chegará a uma temperatura em que a U.R. atingirá valor igual a 100%. Qualquer resfriamento abaixo desse valor provocará condensação do vapor. Esse valor da temperatura é denominado temperatura do ponto de orvalho.

O ponto de orvalho é de grande valor para determinação da umidade atmosférica, já que se pode resfriar o ar ambiente nas circunvizinhanças até a temperatura de saturação.

Usando-se uma tabela ou um gráfico apropriado, comumente usado em meteorologia, pode-se obter uma relação entre pressão do vapor no ar, "déficit" de pressão de vapor, ponto de orvalho e umidade relativa.

Outro termo muito usado em estudos da umidade do ar é temperatura do bulbo úmido. Essa é a temperatura de uma superfície úmida, quando resfriada pela evaporação. Se a atmosfera estiver não-saturada, a água evaporará da superfície, retirando calor desta e provocando diminuição de sua temperatura. Essa temperatura pode ser medida por um termômetro, tendo seu bulbo envolto por gaze ou por cadarço, embebido de água. Simultaneamente, outro termômetro de bulbo seco indicará a temperatura do ar ambiente. A expressão que relaciona a temperatura do bulbo úmido (T_w) com temperatura do ambiente (bulbo seco; T_a), pressão de vapor na atmosfera e pressão de vapor de saturação é:

$$e_a = r e_s (T_a - T_w), \quad \text{eq. 7}$$

em que

r é a constante psicrométrica. Seu valor varia com a temperatura e com a forma como ocorreu a evaporação, por ventilação forçada ou aspirada.

2.1. Medidas da Umidade Atmosférica

2.1.1. Higrômetro de Fio de Cabelo

Atualmente, um dos dispositivos mais usados na medição da umidade relativa do ar é o higrômetro, cujo

funcionamento se baseia na variação do comprimento de um fio de cabelo humano e com a umidade do ar a que é submetido. Essa variação do comprimento do fio de cabelo e da umidade do ar é uma função logaritma sujeita à variação de histerese significativa (cerca de 3%) a um tempo de resposta muito longo (cerca de 5 minutos) (PEARCY et al., 1989). Os mecanismos desses higrômetros são pouco precisos; além disso, se os fios de cabelos forem expostos a uma umidade relativa abaixo de 15% ou acima de 90%, a calibração do higrômetro pode ficar permanentemente deslocada (Day, citado por PEARCY et al., 1989).

Outras formas de degradação do cabelo também podem afetar a calibração do higrômetro; por isso, os higrômetros mecânicos de fio de cabelo são usados para medidas aproximadas, em que o principal interesse é o baixo custo.

2.1.2. Higrômetro de Resistência

Há grande variedade de higrômetros de resistência, nos quais o elemento sensor é constituído de uma espiral coberta por uma solução diluída de cloreto de lítio. A corrente elétrica que passa pela espiral aquece-a, fazendo com que a água evapore da cobertura.

A taxa de evaporação é uma função da pressão do vapor do ar circunvizinho. Ao secar a solução de cloreto de lítio, a resistência elétrica da espiral aumenta, ocasionando redução da corrente e, conseqüentemente, resfriamento da espiral.

Alternando aquecimento e resfriamento da espiral, tem-se um equilíbrio de temperatura e umidade, o qual pode ser calibrado pela pressão de vapor ambiente e, por meio desta, pela temperatura do ponto de orvalho (PEARCY et al., 1989).

Segundo White e Ross, citados por PEARCY et al. (1989), entre -10 e 38°C , o cloreto de lítio fornece precisão, com um desvio absoluto de 1°C abaixo ou acima do ponto de orvalho. Uma desvantagem desse elemento sensor é que o tempo de resposta é demorado, de 5 a 10 minutos, e ainda ocorre o efeito de histerese.

Segundo PEARCY et al. (1989), Jonas e Wexler projetaram um eletrodo de filme de fluoreto de lítio numa solução com sensibilidade entre 20 e 100% de umidade relativa e tempo de resposta de alguns milésimos de segundos.

2.1.3. Higrômetros de Ponto de Orvalho

O higrômetro de ponto de orvalho consiste de uma câmara que contém um espelho metálico, cuja temperatura pode ser controlada, com precisão, pelo resfriamento, utilizando um pequeno elemento Peltier, e pelo aquecimento, mediante uma resistência de fio. O espelho é resfriado até que a luz nele refletida varie em resposta à formação de orvalho. A temperatura do espelho é então fixada por meio de um sistema eletrônico de "feedback", assim que a temperatura do ponto de orvalho é atingida, usando-se um fotodetector como sensor.

A temperatura do espelho, medida, com precisão, por meio de um termômetro de resistência de platina ou

termistor, é igual à temperatura do ponto de orvalho do ar ambiente. Como essa temperatura é medida diretamente e a umidade relativa correspondente ou a pressão de vapor é obtida em uma tabela, esse instrumento é muito preciso e estável, visto que fornece precisão com um desvio de $0,2^{\circ}\text{C}$ abaixo ou acima do valor real do ponto de orvalho. A principal fonte de erro desse instrumento está na contaminação da superfície espelhada por soluções ou sais, que podem afetar o ponto de orvalho. O tempo de resposta é moderado; apesar de serem gastos alguns minutos para resfriar a superfície do espelho, esse tempo é suficiente para se obterem medidas precisas da umidade relativa. O ponto fraco desse dispositivo está no alto custo de fabricação (PEARCY et al., 1989).

2.1.4. Higrômetros Espectroscópicos

Os higrômetros espectroscópicos, instrumentos baseados na análise espectral, têm sido largamente utilizados em laboratório, mas somente agora estão sendo desenvolvidos para medições de campo. Apresentam a grande vantagem de fornecer resposta muito rápida, alguns milésimos de segundos, e serem bem sensíveis a valores baixos da umidade relativa (PEARCY et al., 1989).

Esses higrômetros podem ser acoplados a sensores remotos com luz ultravioleta, e distinguem a absorção da luz pelo vapor d'água e pelo oxigênio, mediante radiação de $3,0 \cdot 10^{-4}$ mm (300 nm).

Outro tipo de higrômetro utiliza dois tubos, um fechado com ar seco ou com teor de vapor d'água conhecido que serve como referência, e outro de igual dimensão, mas por onde deverá circular o ar ambiente. Uma fonte emite radiação infravermelha, que atravessa os dois tubos, intercaladamente e com a mesma intensidade. Após atravessar os tubos, os feixes infravermelhos serão absorvidos por outro gás que serve como detector, no qual está conectado um oscilador que transforma as variações de pressão em impulsos elétricos, que serão amplificados. O lado do detector que receber menos radiações indicará menor pressão do gás. Mediante diferença de pressão desenvolvida nos detectores obtém-se a concentração do vapor d'água na atmosfera. Embora caro, esse sistema é muito preciso e apresenta resposta bastante rápida, como também pode ser usado no monitoramento do conteúdo de vapor d'água na atmosfera e na medição da concentração de CO_2 e do teor de fotossíntese (ROSENBERG et al., 1983).

2.1.5. Psicrômetros

O psicrômetro é um instrumento constituído, basicamente, por dois termômetros comuns. Um dos termômetros fornece a temperatura do ar, e o outro tem o bulbo coberto com uma gaze ou cadarço de algodão, que deve ser umedecido com água destilada, constituindo o termômetro de bulbo úmido. Com a evaporação, a água absorve calor do bulbo e o termômetro de bulbo úmido indica temperatura inferior àquela indicada pelo termômetro de bulbo seco, a não ser que o ar esteja saturado e não haja evaporação. Por meio das

temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido pode-se calcular a umidade relativa do ar, conforme equação 7 ou método tabular (TUBELIS e NASCIMENTO, 1986).

Se os termômetros fornecerem valores precisos nas leituras das temperaturas, os valores de umidade relativa obtida pelos psicrômetros terão boa precisão.

Mesmo quando existem outros instrumentos para medir a umidade relativa do ar, os psicrômetros de bulbo seco e úmido são usados, freqüentemente, como padrão de calibração (PEARCY et al., 1989).

Há vários tipos de psicrômetros; alguns utilizam ventilação dos bulbos por aspiração, enquanto outros, ventilação forçada; podem apresentar ainda o elemento sensor de temperatura variado, para obtenção de melhor precisão e melhor sensibilidade. Além dos psicrômetros, podem-se usar também termopares, termistores e termômetros de resistência, pois a precisão da umidade depende exatamente da precisão da medida das temperaturas.

2.2. Sensor de Umidade Sólido

Nos últimos vinte anos, têm sido desenvolvidos capacitores, como sensores de umidade atmosférica. Em geral, são formados por uma camada de polímero que cobre um metal com uma fina camada de ouro depositada sobre o polímero, por meio de evaporação a vácuo. A camada de ouro, na realidade, é um filme suficientemente fino, que permite a difusão do vapor d'água por meio dessa camada. Esses higrômetros são bastante sensíveis e apresentam variação linear da

capacitância elétrica, com umidade relativa entre 0 a 75% e precisão em torno de 2%. Nessa faixa, o tempo de resposta é muito rápido, de alguns décimos de segundo, embora se torne mais lento com a redução da temperatura. Acima dos 75% de umidade relativa, verificam-se aumento no tempo de resposta e afastamento maior da linearidade (Field e Mooney, Day, citados por PEARCY et al., 1989).

Ainda segundo PEARCY et al. (1989), há tendência de desenvolvimento de sensores de umidade atmosférica no estado sólido, em razão das vantagens que estes normalmente apresentam, como baixo custo, pequeno tempo de resposta e grande sensibilidade.

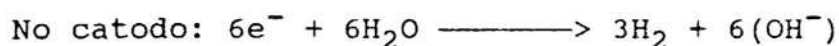
Um desses tipos de sensores é aquele que utiliza, como grandeza sensível à umidade relativa do ar, a capacitância. O sensor é, na essência, um capacitor plano ou cilíndrico, tendo como elementos um dielétrico, formado por óxido de alumínio envolto por dois eletrodos metálicos, um de alumínio e outro, em geral, de ouro.

Historicamente, essa característica do óxido de alumínio, como referência literária científica, parece ter sido criada em 1953, em Londres, por A. Charlesby. Todavia, foi registrada uma patente, em 1941, por Koller, que descreveu um higrômetro com base na importância elétrica de um condensador plano, fabricado por óxido de alumínio anodizado, com um eletrodo de metal depositado na superfície oxidada (JASON, 1965).

Em 1968, foi desenvolvido um microsensor cilíndrico, semelhante àquele de 1953, para medir a umidade relativa numa corrente de ar. Neste, a placa externa era formada por

uma película de ouro. Basicamente, consistia de um cilindro de alumínio que funcionava como uma das placas do condensador, o qual era, então, recoberto por uma camada de óxido de alumínio, obtido pelo processo de eletrodeposição anódica. A camada era envolta por um delgado filme poroso de ouro, que formava a outra placa do condensador, enquanto o óxido de alumínio era o dielétrico. A eletrodeposição é obtida pela reação que ocorre no anodo, daí o nome anodização do alumínio. O resultado é a deposição de óxido de alumínio sobre os discos de alumínio.

As reações que ocorrem são:



Mais tarde, em 1983 e 1984, as propriedades dos poros de óxido de alumínio, como sensor elétrico da umidade relativa, foram analisadas na Índia (KHANNA e NAHAR, 1983 e 1986, NAHAR et al., 1984). O princípio básico manteve-se o mesmo, mudando-se apenas o formato das placas cilíndricas para formato em discos. As armaduras eram formadas por uma placa de alumínio do lado externo, enquanto a parte interna sofrera processo de anodização. A outra placa era uma delgada lâmina de ouro porosa, também em formato de disco. Essa placa de ouro, um filme de espessura de, aproximadamente, $3,0 \cdot 10^{-5}$ mm (300 Å), foi depositada sobre os poros de óxidos de alumínio pelo processo de "sputtering" (evaporação do ouro por bombardeamento eletrônico) (KHANNA e NAHAR, 1983).

Algumas limitações foram observadas, como pouca sensibilidade à umidade relativa muito baixa (abaixo de 20%) e aparente efeito de histerese, quando ocorriam mudanças bruscas de umidade relativa (KHANNA e NAHAR, 1983 e 1986). Esse efeito pode ser, em parte, eliminado por meio de ventilação forçada (LAI e HIDY, 1968); porém, todas as análises verificadas indicam que o sensor de óxido de alumínio anodizado apresenta propriedades que satisfazem a construção de higrômetros.

Workers idealizou um modelo da camada porosa de óxido de alumínio e propôs que a parte sólida do óxido seja permeável, formada por poros tubulares paralelos dispostos hexagonalmente, conforme Figura 1 (JASON, 1965).

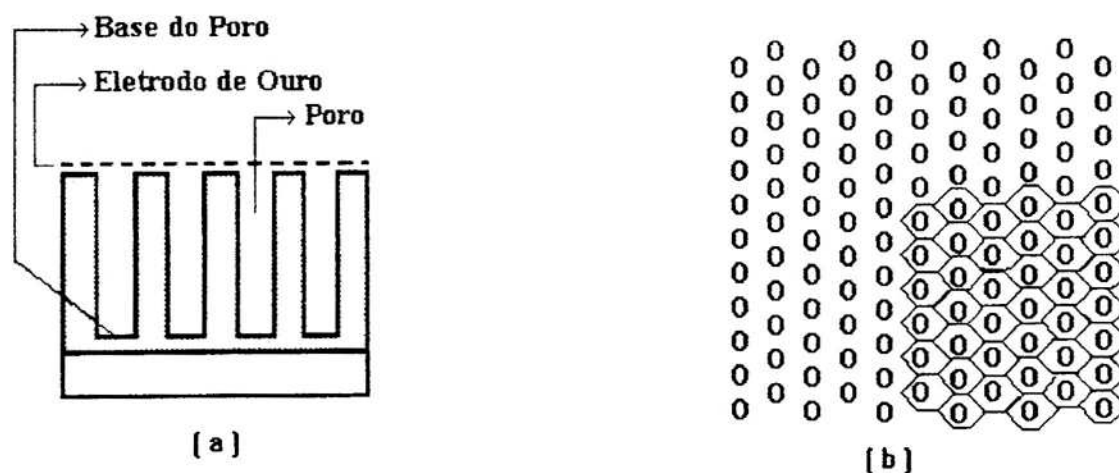


FIGURA 1 - Modelo da Estrutura dos Poros: (a) Corte Vertical (Lateral dos Poros), e (b) Corte Horizontal (Vista Superior dos Poros).

Booker e Wood, citados por JASON (1965), confirmaram que a estrutura dos poros estende-se por toda a espessura da camada de óxido e que o diâmetro e o espaço dos poros não variam muito através da camada. Esses autores deram as seguintes dimensões, que podem ser registradas como típicas da estrutura das camadas de poros formadas por eletrólise com ácido sulfúrico.

Espessura da camada de óxido $3,0 \cdot 10^{-2}$ a $1,27 \cdot 10^{-1}$ mm,
 Diâmetro da célula $4,5 \cdot 10^{-5}$ a $6,0 \cdot 10^{-5}$ mm,
 Diâmetro do poro $1,9 \cdot 10^{-5}$ a $3,0 \cdot 10^{-5}$ mm,
 Volume do poro/volume da camada 16%.

É evidente que os poros apresentam enorme área para adsorção de gases e vapores, cerca de 16% da superfície oxidada; além disso, a estrutura regular possibilita eficiência ainda maior na adsorção pela superfície.

O comportamento elétrico da camada de óxido de alumínio anodizada é condicionado pela estrutura desta. A capacitância do elemento é devida ao efeito conjugado do óxido de alumínio, do ar e da água. A adsorção de água pelo dielétrico altera, apreciavelmente, as propriedades do capacitor, provocando aumento na capacitância, o que permite seu uso como sensor de umidade (JASON, 1965).

Vários são os fatores que afetam o processo de anodização, tais como temperatura, concentração, natureza química do eletrólito, tempo de anodização, densidade de corrente, voltagem. De acordo com a combinação dessas variáveis, diferentes espessuras e porosidades podem ser produzidas. A escolha da densidade de corrente é, sem

dúvida, arbitrária, mas não deverá exceder $0,50 \text{ mA/mm}^2$, senão a camada de óxido tende a se lascrar durante a anodização (JASON, 1965). Ainda de acordo com este autor, a maneira pela qual a capacitância e a resistência do elemento variam com a umidade relativa depende da estrutura e da espessura da camada do óxido de alumínio.

Os poros do filme de óxido de alumínio crescem por meio de uma fina barreira ondulada na base da camada, com forma quase cilíndrica, e cada um é rodeado por uma célula. Para o ácido sulfúrico, o diâmetro dos poros é $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ mm/V}$ (10 \AA/V), e o diâmetro da célula, $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ mm/V}$ (25 \AA/V); nesse caso, a densidade superficial dos poros seria calculada por $(10/25)^2$, ou seja, a área ocupada pelos poros corresponde a 16% da área total. Com a iniciação dos poros, ocorre aumento da voltagem da solução eletrolítica; o diâmetro dos poros e o das células aumentam e, conseqüentemente, alguns poros param de crescer. Zahavi e Metzger, citados por KHANNA e NAHAR (1983), encontraram que a densidade dos poros, após 150 segundos de anodização, representava a metade da densidade, a 15 segundos de anodização. A primeira camada tem cerca de $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$ (0,50 micrômetros). Além da primeira camada, os poros têm formato de pera no interior da superfície e de trombeta na parte mais externa da superfície, em razão do ataque pelo ácido. Outro aspecto notável desse filme é que a orientação dos poros laterais é normal à superfície (KHANNA e NAHAR, 1983). Para uma densidade de corrente de $0,02 \text{ mA/mm}^2$, a taxa de crescimento da camada é de 11 \AA/s , segundo MAISSEL e GLANG (1980), e, para uma corrente de $0,10 \text{ mA/mm}^2$, de

41,7 Å/s, conforme KHANNA e NAHAR (1983).

Booker e Wood, citados por JASON (1965), afirmaram que a estrutura dos poros da camada não varia muito através da camada inteira, mas KHANNA e NAHAR (1983) verificaram que os diâmetros dos poros variam segundo a voltagem, durante o processo de anodização. Outro aspecto também citado por esses autores é que a camada de óxido contém íons residuais OH^- e Al^{+3} , os quais afetam a capacitância na presença da água adsorvida e cuja formação é dependente da densidade de corrente durante a anodização.

O'Sullivan e Wood, citados por KHANNA e NAHAR (1983), confirmaram a presença de outros radicais ácidos (SO_3^{-2} , SO_4^{-2} , HSO_4^-) juntos com OH^- , ligados ao íon Al^{+3} , na estrutura do filme. Segundo Morrison, Wade e Hackerman, citados por KHANNA e NAHAR (1983), o vapor d'água do ar ambiente, adsorvido pela camada de óxido de alumínio, interage com esses íons, de modo que a água adsorvida do ambiente facilita a formação e o deslocamento desses íons. Assim, com o aumento da umidade haverá diminuição da resistência elétrica, pois a água adsorvida pela camada fará o papel de eletrólito.

Um circuito equivalente, baseado na estrutura da camada de alumínio anodizada, é mostrado na Figura 2.

Como a capacitância varia em função da umidade adsorvida, pode-se correlacionar, convenientemente, a umidade relativa do ar com a capacitância do sensor.

Para medir a capacitância do capacitor, pode-se utilizar um instrumento especial que fornece o valor da capacitância diretamente (faradímetro).

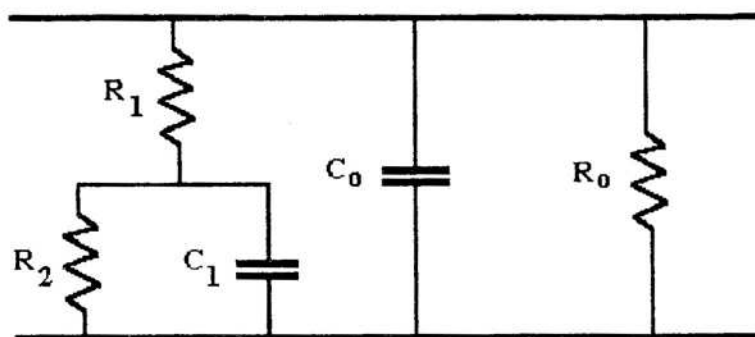


FIGURA 2 - Circuito Equivalente de um Poro Simples. C_0 é a Capacitância da Camada Inteira de Óxido; C_1 , Capacitância da Base do Poro; R_0 , Resistência do Óxido de Alumínio Sólido; R_1 , Resistência dos Poros Laterais; e R_2 , Resistência da Base.

Outra grandeza do sensor, que também varia com a umidade, é sua resistência. Para medi-la, utiliza-se um ohmímetro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Confecção dos Elementos Sensores

Os sensores de umidade foram desenvolvidos e testados no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da Universidade Federal de Viçosa. Inicialmente, um tarugo de alumínio foi seccionado em um torno mecânico, de modo a se obterem 30 discos, com diâmetro de 8 mm e espessura de 3 mm.

Cada disco teve uma de suas faces polida, inicialmente, por meio de fricção sobre uma lixa d'água (nº 600), fixa sobre um bloco de madeira e ligeiramente umedecida. Em seguida, a face polida foi limpa com um pano umedecido com água e o processo de polimento prosseguiu mediante fricção desta em uma flanela. A flanela foi fixada no disco de um esmeril e comprimiu-se, ligeiramente, a face do disco de alumínio contra a flanela, enquanto o esmeril girava, até que a face polida ficasse espelhada, indício de que estava bem polida.

Após o polimento, os discos foram limpos com água destilada e, após secos, foram pintados com esmalte isolante, exceto a face polida, cuja eletrodeposição era desejada.

3.1.1. Anodização

Para construção dos eletrodos, foram recortadas duas placas circulares de alumínio de 50 mm de diâmetro, com um pequeno furo no centro, onde eram conectados os fios do circuito para o processo da eletrodeposição.

Em uma das placas foram feitos cinco furos do mesmo tamanho dos discos a serem eletrodepositados (Figura 3a). Cinco discos foram justapostos nos orifícios por meio de compressão mecânica manual, de maneira que ficassem presos com as faces polidas voltadas todas para o mesmo lado.

Foi construído um pequeno suporte de madeira, de modo que as duas placas de alumínio ficassem fixas, dispostas frontalmente entre si, em planos paralelos e distanciadas de 30 mm. A Figura 3b ilustra o suporte, bem como as placas fixas.

Dois fios de alumínio foram conectados aos centros das placas e o suporte foi colocado verticalmente num béquer com solução de H_2SO_4 a 10%, de tal modo que a solução cobria totalmente os eletrodos de alumínio. O eletrodo superior, que continha as pastilhas com as faces espelhadas voltadas para o interior do béquer, foi ligado ao pólo positivo de uma fonte estabilizada modelo Dower FCC 1030D, e o outro eletrodo foi ligado ao pólo negativo da fonte. Um amperímetro digital, modelo MIC 7000 FT DMM, foi ligado ao

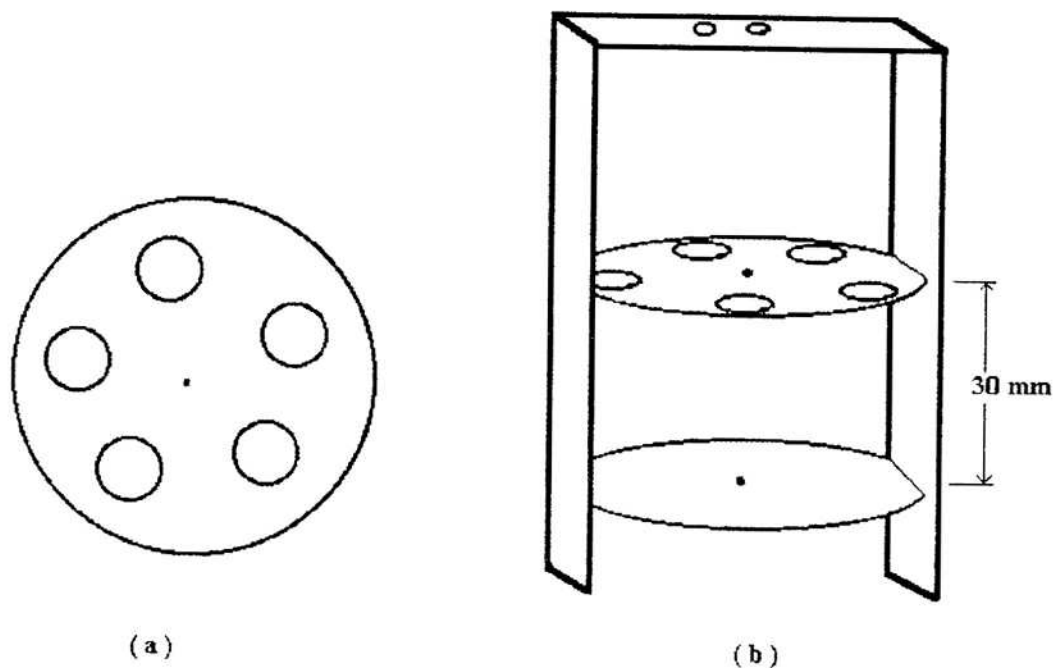


FIGURA 3 - a) Eletrodo de Alumínio Constituído de Uma Placa Circular Contendo Cinco Orifícios para Prensagem das Pastilhas a Serem Anodizadas. b) Suporte de Madeira com Eletrodos Fixos Equidistantes de 30 mm.

circuito para efeito de controle da corrente elétrica. Em cada anodização controlavam-se a densidade de corrente e o tempo de duração. Calculava-se a densidade de corrente, dividindo-se a corrente pela área de uma das faces do eletrodo. Esse valor encontrado era, então, rigorosamente mantido durante todo tempo, por meio de controle manual na fonte de corrente. As condições das anodizações realizadas foram as seguintes:

1ª) AN1030 Data: 13/09/93 Hora: 15h50min às 16h20min
 Local: Laboratório de Instrumentação/DPF
 Solução eletrolítica: H_2SO_4 a 10%
 Densidade de corrente: $0,10 \text{ mA/mm}^2$
 Distância entre as placas: 30 mm
 Tempo de anodização: 30 minutos

2ª) AN1060 Data: 13/09/93 Hora: 10h10min às 11h10min
Local: Laboratório de Instrumentação/DPF
Solução eletrolítica: H₂SO₄ a 10%
Densidade de corrente: 0,10 mA/mm²
Distância entre as placas: 30 mm
Tempo de anodização: 60 minutos

3ª) AN2030 Data: 19/09/93 Hora: 16h30min às 17h
Local: Laboratório de Instrumentação/DPF
Solução eletrolítica: H₂SO₄ a 10%
Densidade de corrente: 0,20 mA/mm²
Distância entre as placas: 30 mm
Tempo de anodização: 30 minutos

4ª) AN3030 Data: 10/09/93 Hora: 14h52min às 15h22min
Local: Laboratório de Instrumentação/DPF
Solução eletrolítica: H₂SO₄ a 10%
Densidade de corrente: 0,30 mA/mm²
Distância entre as placas: 30 mm
Tempo de anodização: 30 minutos

5ª) AN4030 Data: 15/09/93 Hora: 10h52min às 11h28min
Local: Laboratório de Instrumentação/DPF
Solução eletrolítica: H₂SO₄ a 10%
Densidade de corrente: 0,40 mA/mm²
Distância entre as placas: 30 mm
Tempo de anodização: 30 minutos

Obs.: Nesta quinta anodização, durante os primeiros cinco minutos, a tensão foi muito alta (cerca de 15V), enquanto a tensão média durante a anodização foi de 4,8V. Um problema operacional observado foi o rompimento do fio de alumínio conectado ao catodo, o qual provocou a interrupção do processo, sendo substituído por outro.

6ª) AN5030 Data: 05/09/93 Hora: 10h40min às 11h10min
Local: Laboratório de Instrumentação/DPF
Solução eletrolítica: H₂SO₄ a 10%
Densidade de corrente: 0,50 mA/mm²
Distância entre as placas: 30 mm
Tempo de anodização: 30 minutos

Terminada a anodização, as pastilhas foram banhadas com água destilada para retirada de possíveis resíduos e, depois de secas, guardadas em um saquinho plástico, que, após fechado, era etiquetado, com a identificação referente àquela anodização, ou seja, o código de identidade de cada pastilha.

O tempo de anodização e, ou, a densidade de corrente aumentam a massa de óxido depositada e, conseqüentemente, a espessura do dielétrico. A massa eletrodepositada pode ser obtida, segundo BUENO et al. (1979), pela expressão:

$$m = Mit/nF, \quad \text{eq. 8}$$

em que

i = corrente elétrica em amperes,

t = tempo em segundos,

n = número de elétrons recebidos na reação (igual a 3),

F = número de Faraday (96500 C/mol).

Uma vez calculada a massa, obtém-se o volume do dielétrico, dividindo-se a massa do óxido de alumínio pela sua densidade absoluta, segundo DANA (1983).

$$V = m/\mu, \quad \text{eq. 9}$$

em que

V = volume da camada de óxido de alumínio,

μ = densidade absoluta do óxido de alumínio.

Como a camada de óxido tem a forma de um disco, ao dividir seu volume pela área de óxido de alumínio, ou seja, do dielétrico.

$$d = V/A, \quad \text{eq. 10}$$

em que

d = espessura da camada de óxido de alumínio (dielétrico),

A = área da camada de alumínio.

Combinando as equações 8, 9 e 10, obtém-se a expressão que fornece a espessura da camada:

$$d = Mit/A\mu nF. \quad \text{eq. 11}$$

De acordo com ARGENTIÉRE (1985), existe uma eficiência teórica, cujo fator deve ser aplicado à equação anterior para obter a quantidade de massa eletrodepositada durante o processo de anodização. Assim, corrigindo a equação 11, obtém-se:

$$d = nMit/A\mu nF, \quad \text{eq. 12}$$

em que

n = eficiência teórica da eletrodeposição.

Embora não tenha sido quantificada a espessura do dielétrico, pode-se estimar o valor de n , utilizando dados obtidos por KHANNA e NAHAR (1983). Esses autores obtiveram uma camada de óxido de $1,0 \cdot 10^{-2}$ mm (10 micrômetros) de espessura, para uma anodização com densidade de corrente de $0,10 \text{ mA/mm}^2$, tempo de 40 minutos e crescimento médio da camada de óxido em torno de 42 \AA/s . MAISSEL e GLANG (1980)

registraram um crescimento de 11 \AA/s , utilizando uma densidade de corrente de $0,02 \text{ mA/mm}^2$. Aplicando esses valores na equação 12, obteve-se uma eficiência de 0,473, no primeiro caso, e de 0,624, no segundo.

Usando uma eficiência igual à média dos dois casos citados acima ($n = 0,55$), obtêm-se, para cada sensor, as seguintes espessuras, em mm:

Sensor:	AN1030	AN1060	AN2030	AN3030	AN4030	AN5030,
Espessura:	0,0087	0,0174	0,0174	0,0261	0,0348	0,0435.

Como a capacitância de um capacitor plano é inversamente proporcional à distância entre as placas (espessura do dielétrico), e considerando a capacitância do sensor AN1030, como referência, igual a X, têm-se, para os demais sensores, os seguintes valores: AN1060 e AN2030 ($X/2$), AN3030 ($X/3$), AN4030 ($X/4$), e AN5030 ($X/5$).

Contudo, não se deve esperar tal correspondência, uma vez que a presença de conteúdos de partículas de água, provenientes da umidade atmosférica adsorvidos pelos poros da camada de óxidos, altera substancialmente as propriedades elétricas da camada, de tal modo que não se pode considerar apenas a causa da espessura da camada de óxido, uma vez que as comparações foram feitas para teor de umidade relativa do ambiente acima de 30 %.

3.1.2. Deposição do Ouro sobre o Elemento Sensor

Após a obtenção da camada de óxido de alumínio, a fase seguinte foi a deposição de um filme de ouro sobre a

camada de óxido, etapa esta realizada no Departamento de Física da UFMG. As pastilhas, mais uma vez, foram submetidas a um processo de limpeza; fixadas em placas de alumínio, em grupos de três, sempre identificadas; e mergulhadas num béquer com tetracloreto de carbono, submetendo-se a um banho de ultrassom por alguns minutos. Depois, foram retiradas e secas em estufa, ficando prontas para a metalização. A deposição do ouro deu-se pelo processo de evaporação a vácuo. Foram colocadas três pastilhas de mesma anodização em cada placa, num total de 18 pastilhas, na parte interna superior da evaporadora com as superfícies oxidadas voltadas para baixo, onde deveria ser depositado o ouro.

A evaporação foi realizada a uma pressão de 2.10^{-6} mbar, e o vapor de ouro, em contato com a superfície das pastilhas mais fria, condensou-se, formando uma película sobre elas.

Utilizou-se um indicador da taxa de crescimento do metal, depositado para determinar o tempo de operação. A uma taxa de $8,0 \text{ \AA/s}$, o tempo de operação foi fixado em 50 segundos, formando, portanto, um filme com cerca de $4,00.10^{-5} \text{ mm}$ (400 \AA) de espessura. Apesar de bastante tênue, esse filme não poderia ser mais espesso, uma vez que ele tem de ser poroso.

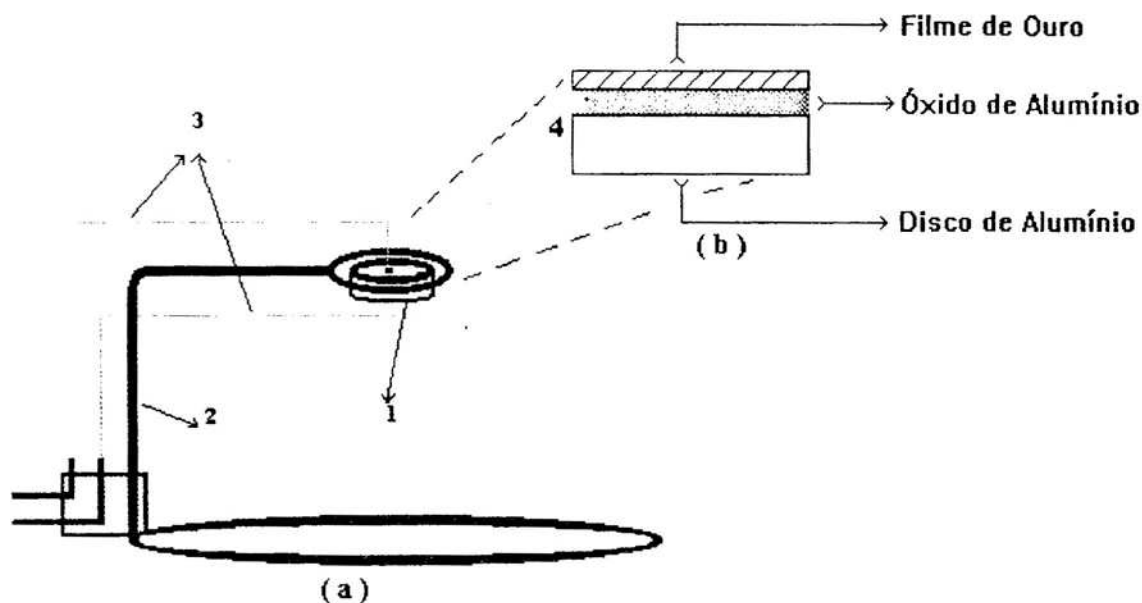
3.1.3. Montagem do Elemento Sensor

A etapa final da construção dos sensores consistiu em conectar fios às superfícies das placas do capacitor, formado pela deposição do ouro sobre o óxido de alumínio.

Na base encontra-se o alumínio e, na superfície, o filme de ouro, ambos separados pela camada de óxido de alumínio (dielétrico). Para isso, cada pastilha foi presa sobre um suporte de arame liso e isolado, no ponto de contato com a pastilha, por uma fita de material isolante. Após presa a pastilha, foram preparados dois fios de cobre recobertos com teflon, com um diâmetro 0,075 mm (0,003 polegada). Para soldá-los cada um a uma das placas, usou-se uma minúscula gota de tinta prata, juntando a ponta dos fios com a superfície de ouro e do alumínio, deixando-os em repouso durante 24 horas, para secagem da tinta prata. Assim, obteve-se um capacitor plano de placas circulares contendo, como dielétrico, o óxido de alumínio (Al_2O_3). Uma das placas era o próprio alumínio, e a outra, o filme de ouro poroso como óxido de alumínio. Esse capacitor é, na essência, o sensor que deverá adsorver vapor d'água do ar por meio dos poros ou ceder vapor ao ar, de modo que entre em equilíbrio de umidade com este e, em consequência, que altere a capacitância e a resistência do dielétrico. A Figura 4 mostra um sensor, após montagem, sobre o suporte.

3.2. Montagem Experimental para Testes dos Sensores

Para testar os sensores, montou-se uma câmara de controle de umidade (Figura 5), constituída de uma caixa de madeira de 400 mm x 500 mm x 800 mm, cujas superfícies internas foram revestidas de papel alumínio, para evitar absorção ou liberação d'água pela madeira para o interior dessa caixa. A face dianteira da caixa era uma porta de



1. Sensor
2. Suporte Metálico
3. Fios de Cobre
4. Ampliação do Sensor

FIGURA 4 - a) Sensor Fixado no Suporte, Conectado aos Terminais nas Placas. b) Detalhe do Sensor (Corte Vertical).

madeira e vidro com borracha nas laterais, para que vedasse bem, quando fechada. A câmara continha também uma prateleira vazada, colocada a 200 mm de altura, onde eram colocados o sensor e o higrômetro de referência. No interior da câmara de umidade foi fixada uma ventoinha para homogeneização do ar, cujo acionamento é feito por meio de uma manivela externa e de acionamento manual.

Inicialmente, usaram-se dois higrômetros como referência, para calibração dos sensores: Um SOAR HT - 150 e um IOPE modelo IOPhigro 50, os quais foram colocados dentro da caixa junto ao sensor, que era ligado a um faradímetro também instalado no interior da caixa. Cada sensor foi

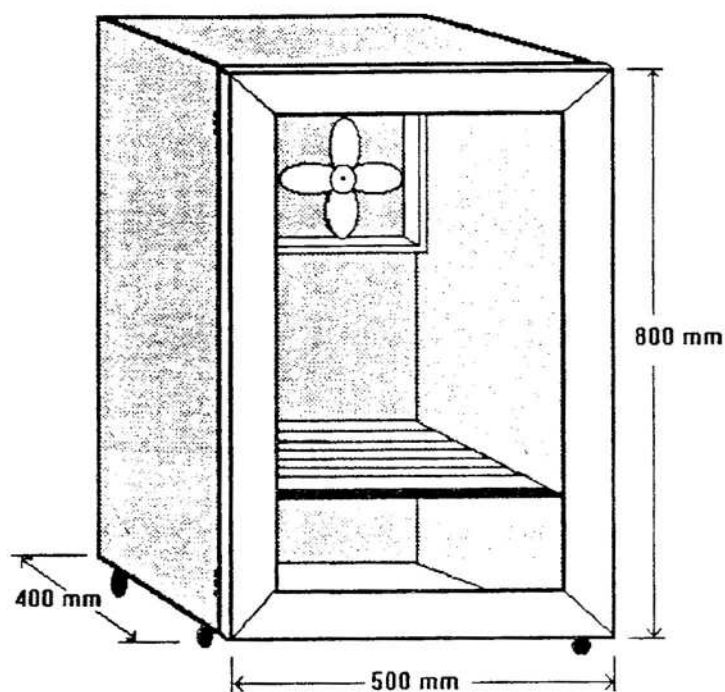


FIGURA 5 - Câmara de Controle de Umidade.

testado individualmente, e, à medida que era feita leitura da capacitância do sensor, simultaneamente, registrava-se o valor da umidade relativa no interior da câmara. Para a homogeneização do ar no interior da câmara, acionava-se a ventoinha.

3.2.1. Testes dos Sensores

Para que ocorresse variação da umidade relativa no interior da câmara, procedia-se da seguinte maneira: aquecia-se água em um recipiente apropriado, até que os vapores formados ficassem visíveis. Cerca de 200 ml desta água era colocada num béquer e levada para o interior da

câmara. Já com os instrumentos ligados, higrômetros e faradímetro, fechava-se hermeticamente a caixa, anotando-se as leituras, até que o higrômetro acusasse cerca de 90% de umidade relativa. A partir daí, o béquer era retirado rapidamente e a porta novamente fechada. A vetoinha era, então, acionada e, a partir do momento em que o valor da umidade se estabilizava, as medidas eram efetuadas. A seguir, a porta era ligeiramente aberta e fechada, para induzir à queda na umidade. O procedimento repetia-se em diversos níveis de umidade relativa até que a umidade no interior da câmara entrasse em equilíbrio com a umidade relativa ambiente. A partir desse momento, introduzia-se, no fundo da câmara, uma bandeja com cerca de 250 ml de sílica gel seca. A porta era, então, hermeticamente fechada e as leituras feitas, à medida que a umidade baixava. As leituras eram registradas até que a umidade parasse de baixar, situação em que a sílica não mais absorvia vapor d'água do ar. A montagem era desfeita e os dados assim obtidos eram processados. Esse procedimento experimental, em que os registros de umidade e capacitância eram realizados manualmente, foi repetido para cada sensor testado.

Considerando que a medição de freqüências, mediante freqüencímetros, é mais corriqueira em laboratórios do que a leitura direta de capacitância, montou-se um circuito oscilador, tendo como elemento variável a capacitância do sensor. O oscilador, composto de circuito integrado (CI555), duas resistências fixas e capacitor (sensor), fornecia, como saída, uma freqüência que variava inversamente com a capacitância do sensor.

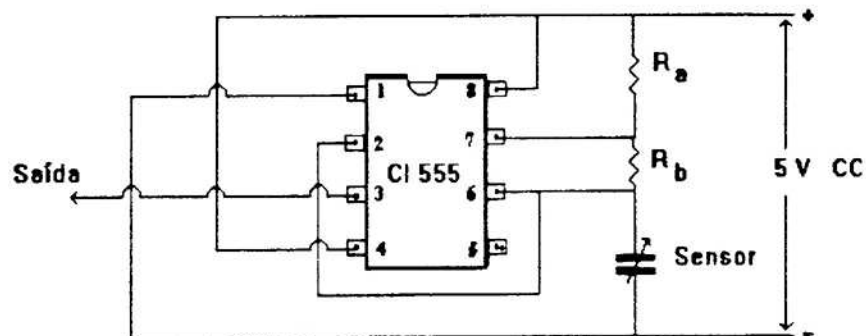
$$f = 1,41 / (R_a + 2R_b) C_S \quad \text{eq. 13}$$

em que

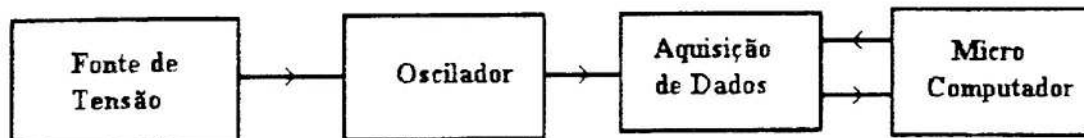
- f = freqüência na saída do oscilador,
 R_a e R_b = resistências fixas,
 C_S = capacitância do sensor.

O diagrama do circuito está mostrado na Figura 6(a).

O circuito foi alimentado com uma tensão contínua de 5,0 V, por meio de uma fonte estabilizada de tensão e corrente marca Dawer, modelo FCC3010D. A saída do circuito foi conectada à aquisidora de dados HP, modelo 3421A, a qual estava acoplada a um microcomputador IBM-PC-XT, que controlava a aquisidora e registrava os dados. A montagem experimental automatizada está mostrada na Figura 6(b).



(a)



(b)

FIGURA 6 - (a) Circuito Oscilador. (b) Diagrama de Bloco do Circuito de Medições Automatizado.

O programa "COLETA" foi utilizado para controlar o experimento, e o sistema programado para registrar 20 leituras, com intervalos iguais de 120 segundos entre dois registros consecutivos. O sensor foi colocado na caixa de madeira (caixa de controle de umidade), juntamente com o higrômetro de referência, SOAR HT-150. Por meio de um fio duplo, fino e flexível o suficiente para não comprometer o vedamento da câmara de controle de umidade, o sensor foi conectado ao circuito oscilador.

Seguindo-se o mesmo procedimento anterior, mediu-se a frequência do circuito oscilador.

Para medir a resistência do sensor, o faradímetro foi substituído pelo ohmímetro. Todavia, obteve-se resultado com apenas um dos sensores, porque as resistências dos sensores tinham valor elevadíssimo, não sendo possível medi-las com os ohmímetros disponíveis que forneciam leituras no máximo de 20 M Ω . Apenas um dos sensores apresentou resistência elétrica na faixa de 100 a 800 M Ω , sendo seu valor avaliado indiretamente. Ligou-se um resistor constante de 12,06 M Ω , em paralelo, ao sensor e mediu-se a resistência equivalente do circuito por meio do ohmímetro.

$$R_s = R_{eq} \cdot R_c / (R_c - R_{eq}), \quad \text{eq. 13}$$

em que

R_{eq} = resistência equivalente do circuito,

R_c = resistência conhecida,

R_s = resistência do sensor.

Os dados da resistência do sensor, em função da umidade relativa, foram processados em um sistema de computação, para serem plotados em gráficos e posteriormente analisados.

3.3. Teste de Campo

Terminada a fase de testes em laboratório, os sensores foram testados em condições ambientais. Para isso, reuniram-se todos os sensores numa mesa, em sala aberta, e junto deles colocaram-se dois higrômetros de referência. No instante em que se fazia a leitura da umidade relativa, as leituras das capacitâncias dos sensores eram feitas, consecutivamente. Ao todo, realizaram-se oito leituras por sensor, num período de 6h30min às 22 horas, em intervalos mais ou menos regulares. Posteriormente, foi efetuado teste semelhante, usando o sensor AN4030, no período de 18 horas de um dia às 18 horas do dia seguinte, com tomadas de leituras de hora em hora. Fizeram-se leituras da capacitância do sensor e da umidade relativa correspondente por meio de um psicrômetro aspirado.

3.4. Tempo de Resposta

Para verificar o tempo de resposta dos sensores, utilizou-se a leitura de frequência, conforme esquema ilustrado na Figura 6. Para submeter o sensor a uma variação brusca de umidade relativa, utilizou-se a mesma caixa referida nos outros testes.

Com o objetivo de obter um aumento brusco da umidade relativa, colocaram-se no interior da caixa, sobre a prateleira, o sensor e o higrômetro de referência. Em seguida, colocou-se no fundo da caixa um pouco de sílica seca, fechou-se a caixa, aguardou-se até que a umidade baixasse e se estabilizasse, e acionou-se o sistema de medição e coleta

de dados, o qual estava programado para registrar valores de frequência. Em média, o tempo entre dois registros sucessivos foi de 3,0 segundos. Após registrar alguns dados, abria-se a porta da caixa e retirava-se o sensor, colocando-o sobre uma mesa próxima, até que ele entrasse em equilíbrio com a umidade ambiente. Um higrômetro colocado sobre a mesa monitorava a umidade relativa ambiente.

Para obter diminuição brusca de umidade, o procedimento foi semelhante, com a diferença de que, em vez de sílica, utilizou-se água quente, uma vez que o objetivo era aumentar a umidade até cerca de 90%. Após a estabilização da umidade neste valor elevado, acionou-se o sistema de medição, sendo os sensores rapidamente retirados da caixa e expostos à umidade ambiente.

3.5. Constante de Tempo

Constante de tempo é a designação genérica que se dá ao parâmetro K_t , que aparece nas equações 15 e 16. O valor de K_t é o tempo necessário para que o valor da grandeza F atinja $1/e$ de seu valor inicial ou cresça a partir de zero, da fração $(1 - 1/e)$ do seu valor máximo (DOEBELIN, 1966).

$$F = F_0 \cdot \text{EXP}(-t/k_t), \quad \text{eq. 15}$$

$$F = F_0 \cdot (1 - \text{EXP}(-t/k_t)), \quad \text{eq. 16}$$

em que

K_t = constante de tempo,

F = grandeza qualquer, correspondente à frequência em nosso teste,

F_0 = mesma grandeza no instante $t = 0$,

t = tempo.

Para obter a constante de tempo para cada sensor pesquisado, procede-se da seguinte maneira: calcula-se a variação total da frequência, que corresponde a $1 - 1/e$, para cada sensor, quando submetido a valores mínimo e máximo, para umidade relativa decrescente (Figura 7). Soma-se esse valor ao valor mínimo da frequência e faz-se a interpolação, obtendo o intervalo de tempo k_{t1} , que corresponde ao início da variação da frequência até o instante encontrado na interpolação, tempo esse que corresponde ao valor da constante de tempo. Para a umidade crescente, o procedimento é semelhante, porém a variação da frequência a ser atingida deverá ser $1/e$ da variação máxima; nesse caso, a constante de tempo é k_{t2} .

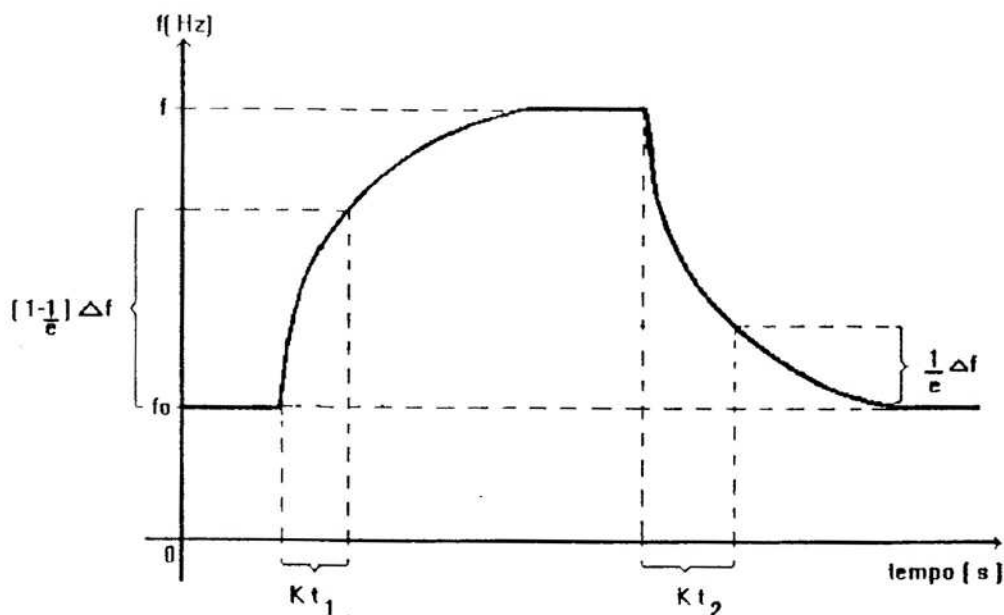


FIGURA 7 - Gráfico da Frequência em Função do Tempo, com as Respectivas Interpolações e Constantes de Tempo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sensor de óxido de alumínio anodizado, ao ser submetido a uma variação da umidade relativa, tem suas propriedades elétricas (Resistência e Capacitância) alteradas.

A capacitância varia sensivelmente, quando o sensor é submetido a uma variação da umidade, aumentando quando esta aumenta. Porém, essa variação não é linear, sendo mais pronunciada em valores mais elevados da umidade relativa. Nos casos analisados, a função que representa melhor a curva dos pontos obtidos é uma exponencial. Em todos os casos analisados, verifica-se que o valor do expoente da função é muito pequeno, indicando que a curva é pouco acentuada, ou seja, aproxima-se de uma reta.

4.1. Capacitância em Função da Umidade Relativa

Para analisar o desempenho dos sensores, observaram-se, inicialmente, as características dos gráficos da

capacitância em função da umidade relativa para cada sensor, e, em seguida, fez-se uma comparação entre eles.

De acordo com os gráficos das Figuras 8 a 15, observam-se duas regiões de quase linearidade. Uma corresponde a valores de umidade relativa, desde 30% até um valor próximo a 50%, enquanto a outra corresponde a valores da umidade relativa superiores. Essas observações estão de acordo com aquelas registradas por NAHAR et al. (1984).

As Figuras 8(a) e 8(b) referem-se a dois experimentos com o sensor AN1030, realizados a temperaturas ambientes ligeiramente diferentes. Percebe-se que há grande semelhança entre as curvas, ou seja, ambas são crescentes e a inclinação aumenta com o aumento do valor da umidade. Para a curva da Figura 8(a), a função exponencial é $y = 0,463 * \text{EXP}(0,01843x)$, e o coeficiente de correlação é 0,9956; para a curva da Figura 8(b), a função é $y = 0,569 * \text{EXP}(0,01699x)$, e o coeficiente de correlação, 0,9924.

A faixa de variação da capacitância foi bastante ampla, de 0,79 a 2,3 nF para uma variação de 30 a 87% da umidade relativa do ar, no primeiro teste, e de 0,87 a 2,37 nF, no segundo teste, com o mesmo sensor, o que caracteriza boa sensibilidade, cerca de 0,025 nF para cada variação de 1% da umidade relativa.

Para evidenciar a semelhança entre as duas curvas, uma superposição destas é mostrada na Figura 9. Essa semelhança confirma a repetitividade dos valores medidos, evidenciando um efeito de temperatura, pois as temperaturas médias dos experimentos diferem cerca de 4°C.

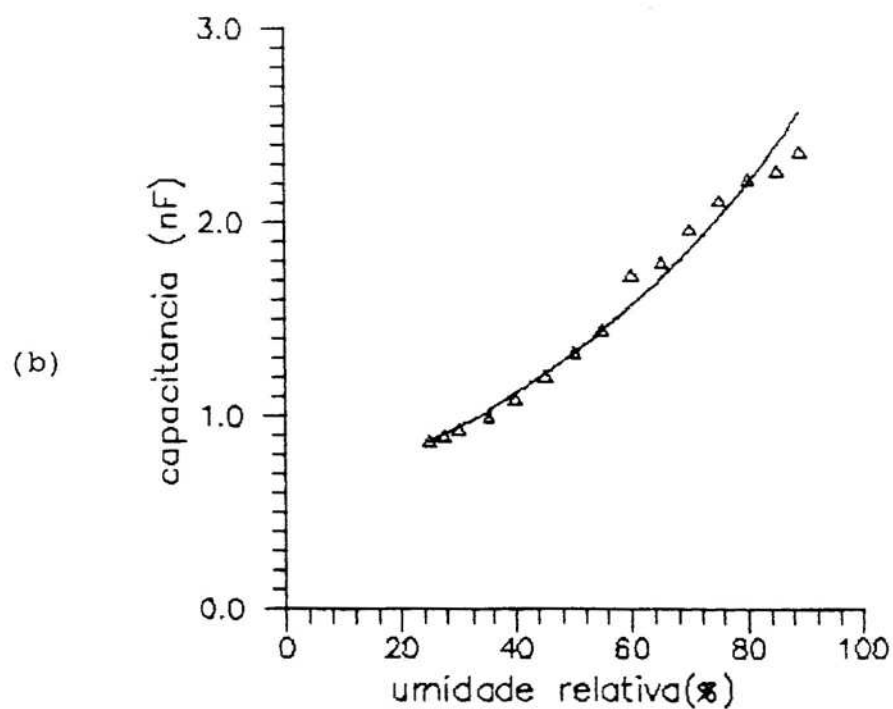
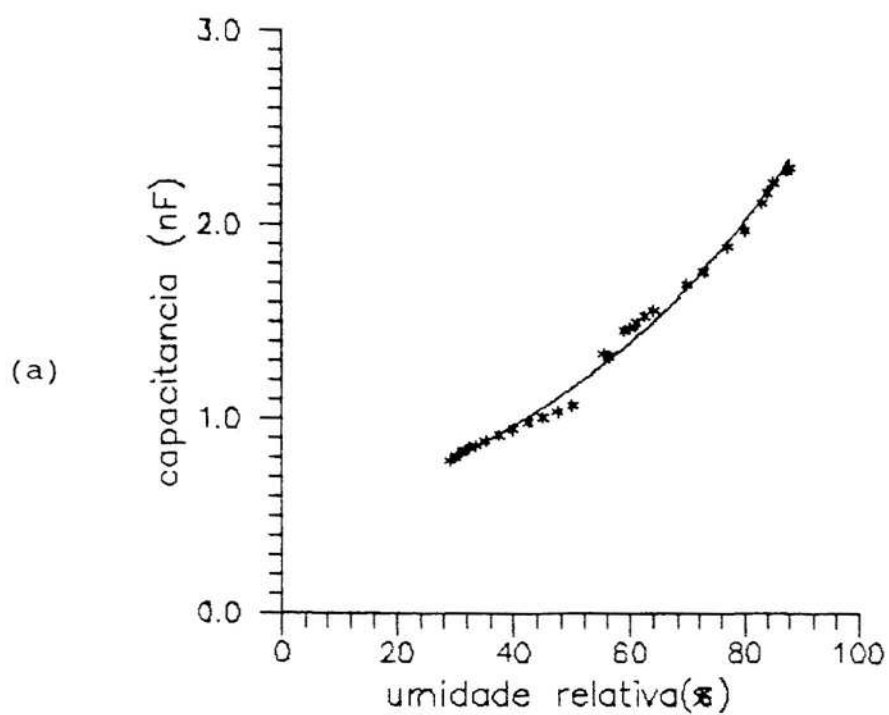


FIGURA 8 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN1030. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, (a) 23°C; (b) 27°C.

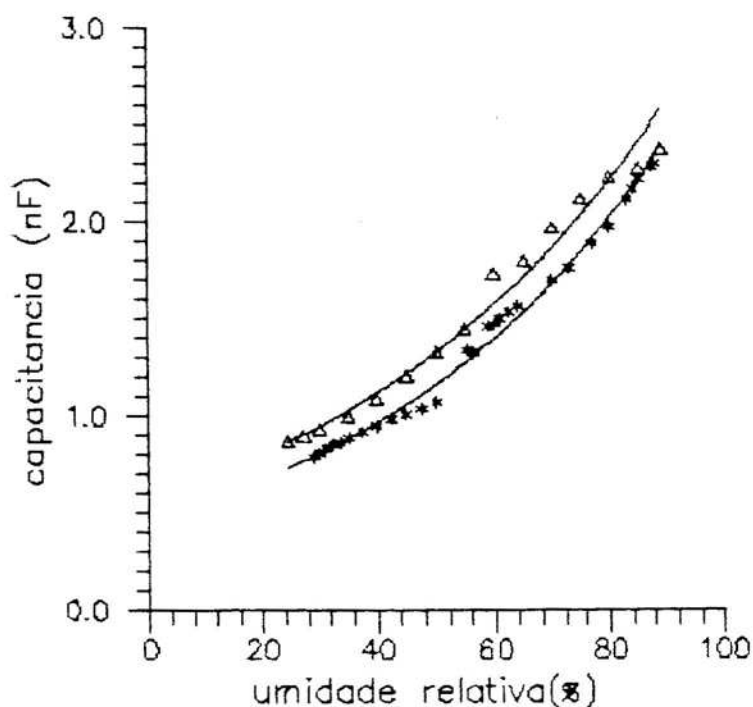


FIGURA 9 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN1030. Superposição das Figuras 8 (a) e (b): 27°C * 23°C.

A Figura 10 mostra o gráfico da capacitância em função da umidade relativa para o sensor AN1060. Pode-se dividir a curva em duas semi-retas, conforme se destacou anteriormente para a maioria dos sensores, mas estas seriam menos representativas que a curva exponencial, cuja função é $y = 0,398 * \text{EXP}(0,01478x)$, e o coeficiente de correlação, 0,9861. Para esse sensor, verificou-se faixa de variação de 0,92 nF, correspondente a uma variação de 60% da umidade relativa. Isso corresponde a uma variação de 0,015 nF para cada variação de 1% na umidade relativa, em média, portanto, uma sensibilidade bem menor que a do sensor AN1030.

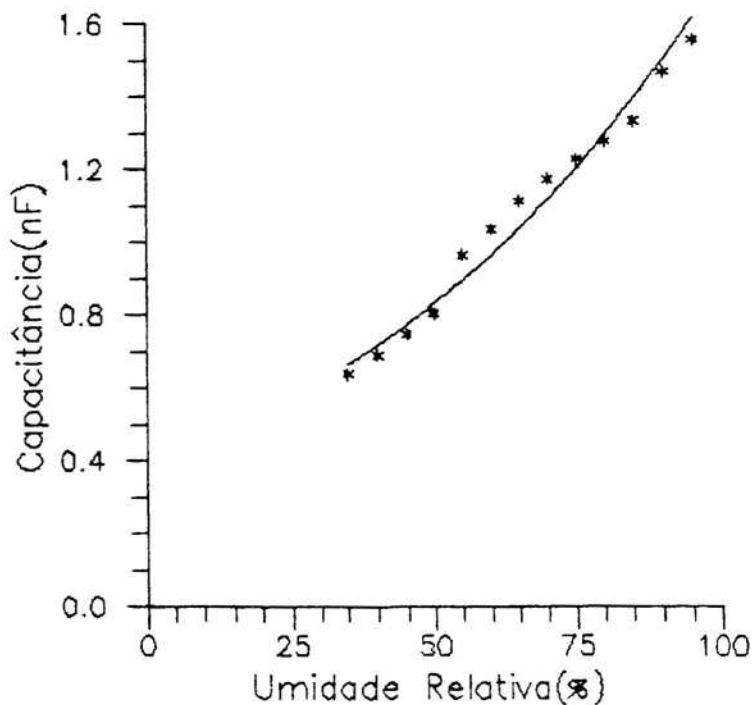


FIGURA 10 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN1060. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, 25°C.

O gráfico do sensor AN2030 está representado na Figura 11, e a função que melhor representa os pontos é a exponencial: $y = 0,0457 * \text{EXP}(0,0125x)$, cujo coeficiente de correlação é 0,9452. Neste gráfico, pode-se visualizar, com bastante evidência, que os pontos podem ser distribuídos em duas semi-retas, uma para pontos inferiores a cerca de 65% da umidade relativa do ar, e outra, mais inclinada, para pontos de umidade relativa superiores a 65%. A variação da capacitância em função da umidade foi de apenas 0,0016 nF, para cada 1% de variação da umidade relativa, considerada bastante baixa, se comparada com a encontrada para o sensor AN1030.

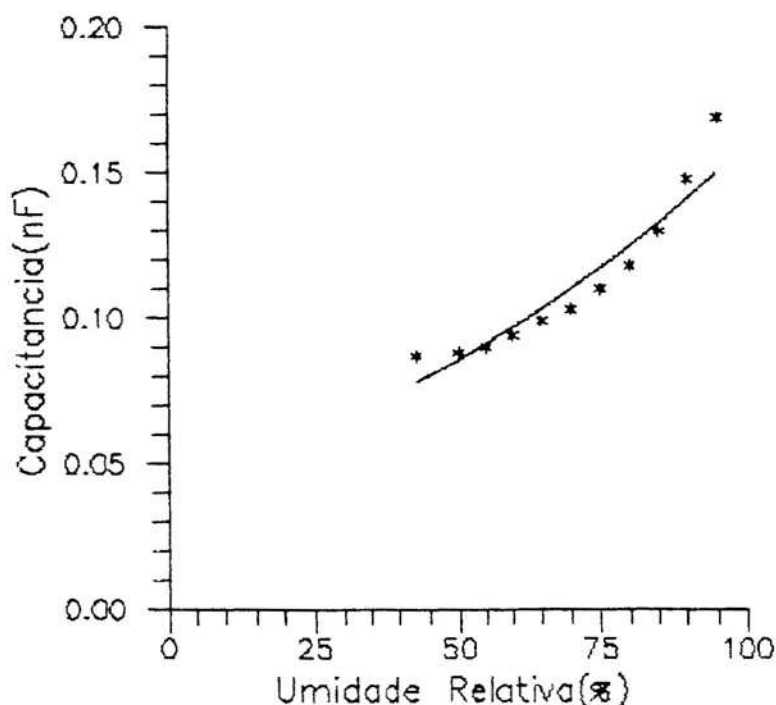


FIGURA 11 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN2030. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, 26°C.

De acordo com a Figura 12, o sensor AN3030 apresentou comportamento semelhante ao do sensor AN2030. A função que melhor representa esses pontos é a exponencial $y = 0,0147 * \text{EXP}(0,02584x)$, cujo coeficiente de correlação é 0,9960. Também aqui se observaram duas semi-retas, uma que corresponde aos pontos de umidade relativa inferiores a 55%, e outra, mais inclinada, que corresponde a valores de umidade relativa superiores. Esse sensor também apresenta sensibilidade baixa, cerca de 0,002 nF, para cada variação de 1% da umidade relativa, em média.

Nas Figuras 13a e 13b, estão representados os gráficos da capacitância em função da umidade relativa para o sensor AN4030, em duas situações quase idênticas,

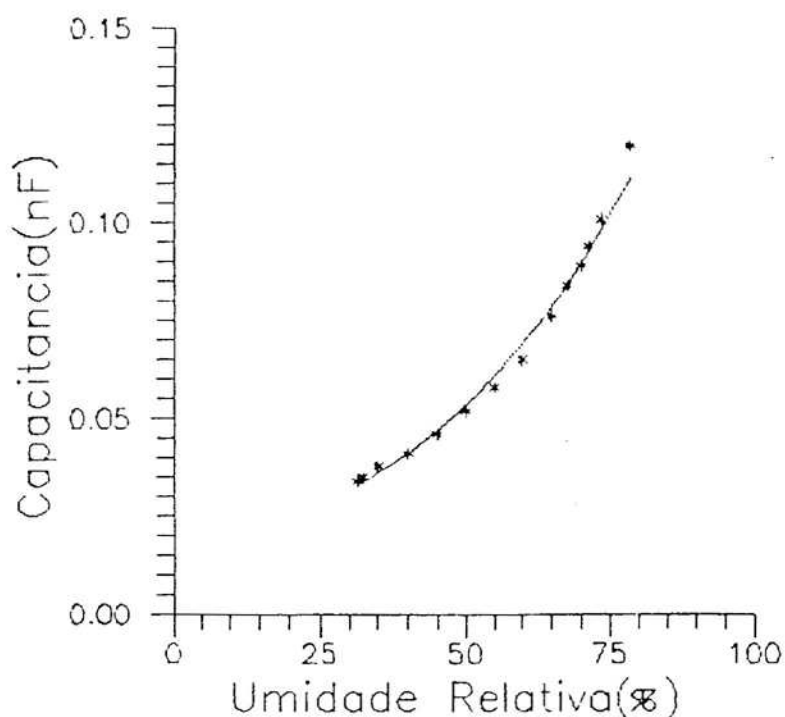


FIGURA 12 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN3030. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, 25°C.

diferindo apenas no valor da temperatura média em que foram realizados os testes, 25°C no primeiro teste, Figura 13(a) e 23°C no segundo, Figura 13(b). As equações das curvas que melhor representaram os pontos em cada um dos gráficos foram: $y = 0,487 * \text{EXP}(0,03713x)$ e $y = 0,409 * \text{EXP}(0,0380x)$, com coeficiente de correlação igual a 0,9788 e 0,9849, respectivamente, nas Figuras 13(a) e 13(b). O sensor AN4030 apresentou ótima sensibilidade, constatada pela grande amplitude de variação da capacitância em função da umidade, em média aproximada de 0,14 nF para cada variação de 1% da umidade relativa, no primeiro gráfico, e de 0,16%, no segundo.

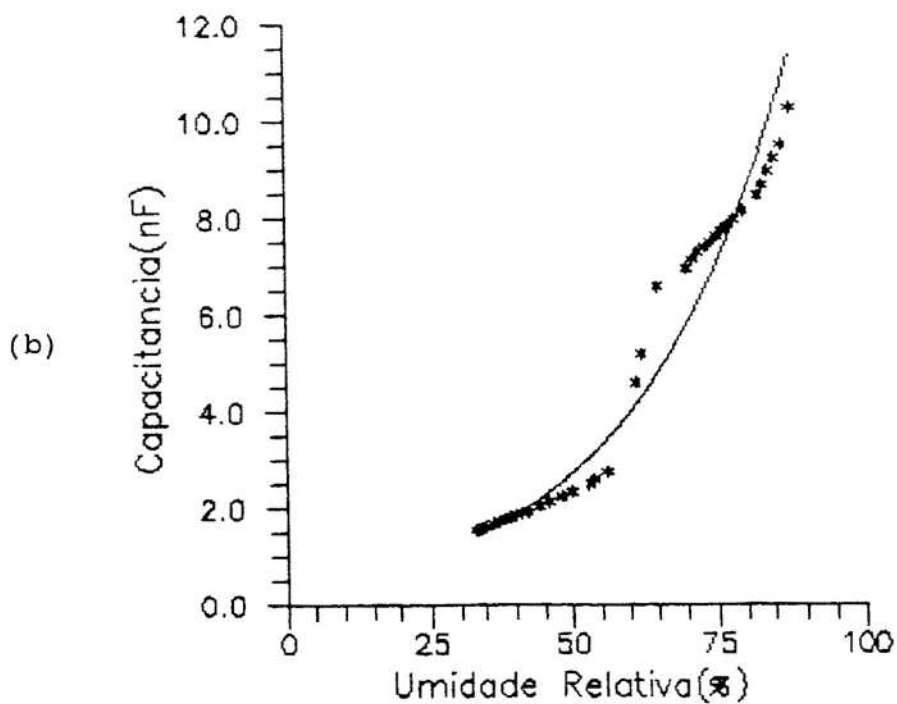
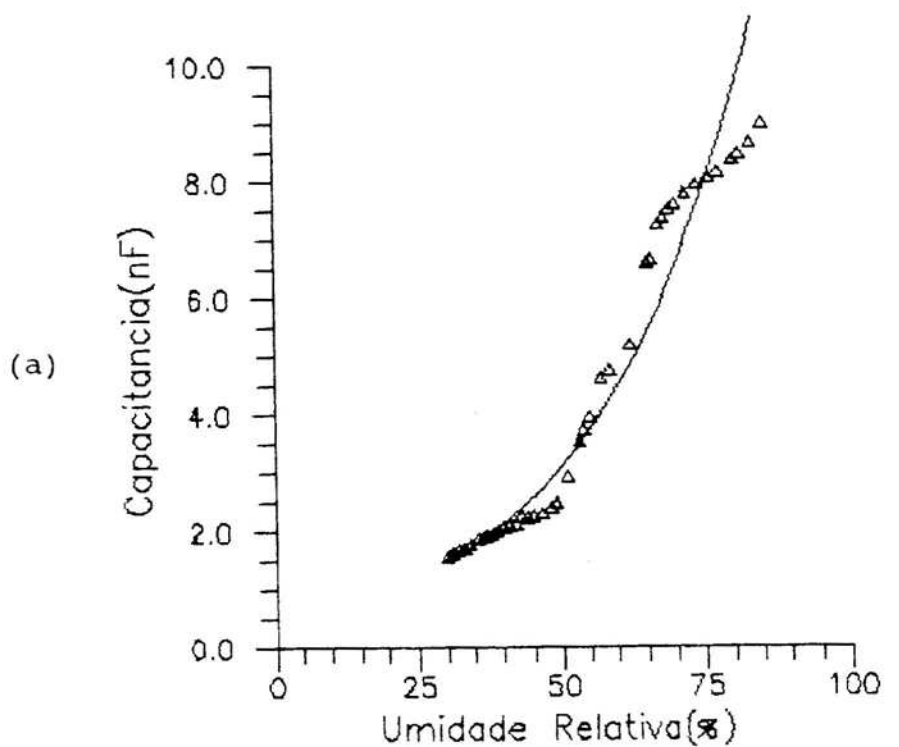


FIGURA 13 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN4030. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, (a) 25°C (b) 23°C .

A repetibilidade do sensor AN4030 está ilustrada na Figura 14, na qual as curvas dos dois testes realizados com este sensor, Figuras 13(a) e 13(b), são representadas em um mesmo sistema cartesiano. Observa-se que essas curvas são bem próximas; e a não-coincidência exata destas pode ser explicada pela diferença de temperatura no interior da câmara, cerca de 2°C de diferença de um teste para outro, e pelos erros inerentes às limitações dos instrumentos de leitura.

A repetibilidade das medidas efetuadas com os sensores desenvolvidos já foi destacada nas Figuras 9 e 14, em que dois testes foram realizados com o mesmo sensor, em situações semelhantes. Para verificar o comportamento de diferentes sensores obtidos a partir da mesma anodização, montou-se outro instrumento sensor, correspondente à mesma anodização, AN4030. Na Figura 15, que mostra os resultados obtidos em relação à Figura 13, pode-se observar uma curva bem mais suave, sem a descontinuidade apresentada pelos pontos da Figura 13. Por outro lado, os valores extremos da capacitância para a mesma faixa de variação da umidade relativa estão bastante próximos. A sensibilidade desse sensor foi semelhante ao da Figura 13, apresentando variação de $0,11\text{ nF}$, para cada 1% de variação na umidade relativa. Infelizmente, este teste não pôde ser repetido, porque este sensor, inexplicavelmente, teve suas placas curto-circuitadas.

De modo geral, percebe-se que há alguns aspectos comuns aos sensores, visto que a função exponencial ajusta-se bem aos dados de capacitância em função da umidade relativa do ar, para todos os casos.

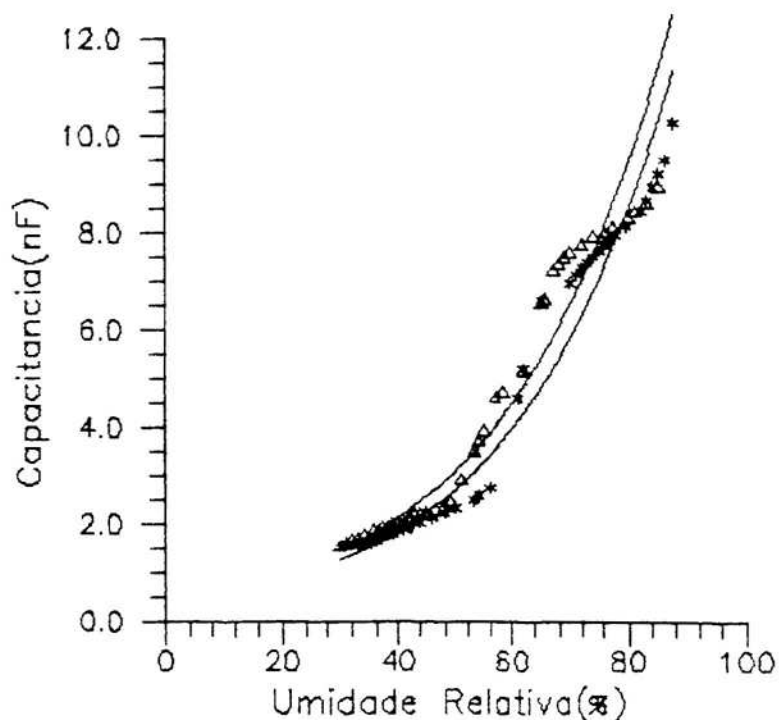


FIGURA 14 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN4030. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, 27°C.

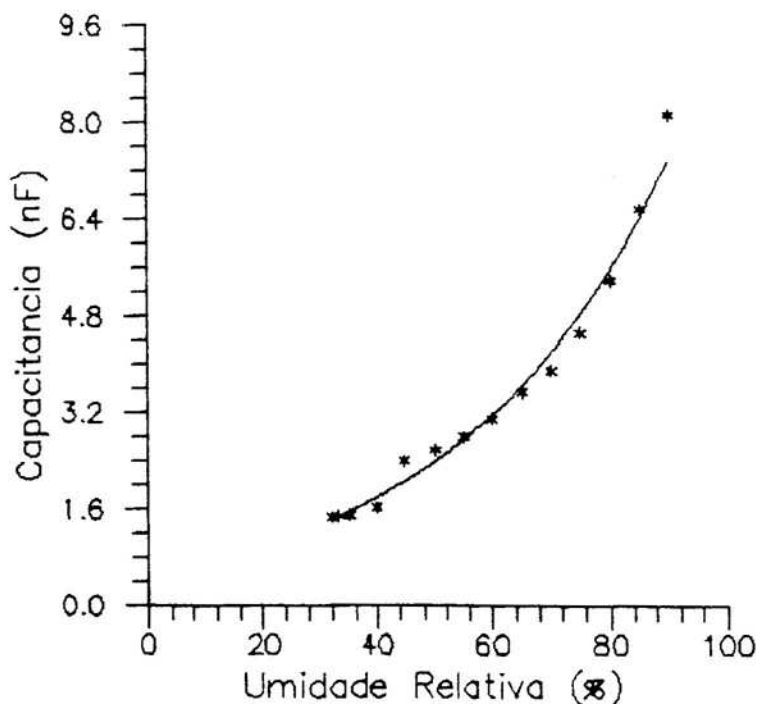


FIGURA 15 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN4030. Temperatura Média do Experimento de, Aproximadamente, 27°C.

A respeito da sensibilidade dos sensores, verificou-se que, ao variar a umidade relativa de 30 para 90%, o valor da capacitância dos sensores, no mínimo, duplicou-se. Em particular, os sensores AN4030 foram os que apresentaram maior sensibilidade, tendo, em média, sua capacitância quadruplicada, quando os valores de umidade relativa do ar variavam de 30 a 90%.

Observa-se que, em razão da forma como as curvas são apresentadas, a sensibilidade dos sensores diminui com a diminuição da umidade relativa, fato confirmado pelos resultados obtidos por NAHAR et al. (1983). Segundo LAI e HIDY (1968), a sensibilidade do sensor estudada caiu, acentuadamente, para umidades relativas mais baixas.

4.2. Histerese

A resposta do sensor, ao ser submetido a uma variação da umidade relativa, depende, ligeiramente, de como a variação da umidade relativa ocorre, isto é, os valores indicados pelo mesmo sensor, quando a umidade relativa é crescente, não coincidem exatamente com os valores indicados quando ela é decrescente. É como se o sensor apresentasse certa inércia no caminho de volta. Quando os sensores são expostos, por algum tempo, à alta umidade relativa, em torno de 90%, há certa inércia, que tende a resistir a entrar em equilíbrio em uma umidade mais baixa, conforme indicam os gráficos das Figuras 16 e 17. Nestes, nota-se que os pontos referentes à umidade crescente, curva inferior, apresentam valores da capacitância inferiores àqueles correspondentes à

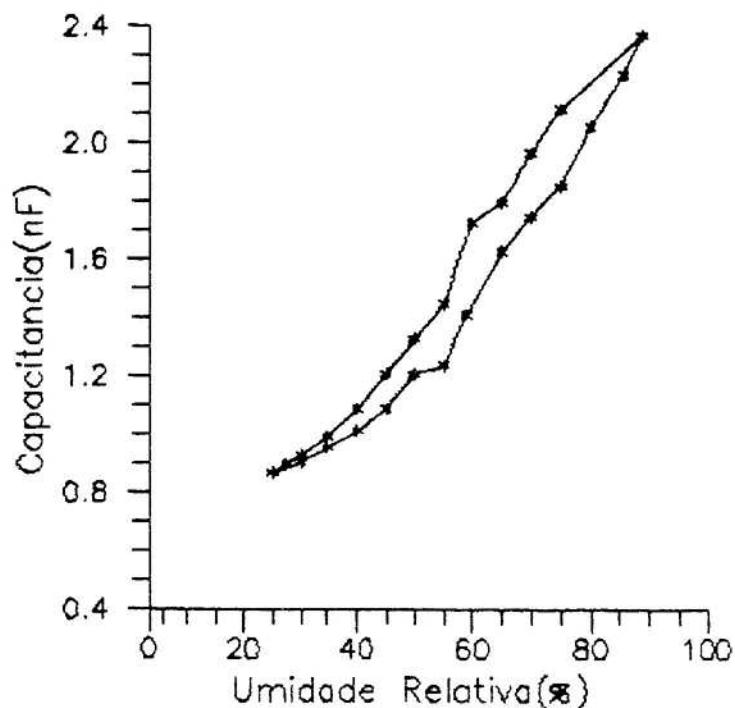


FIGURA 16 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN1030, Apresentando Efeito de Histerese.

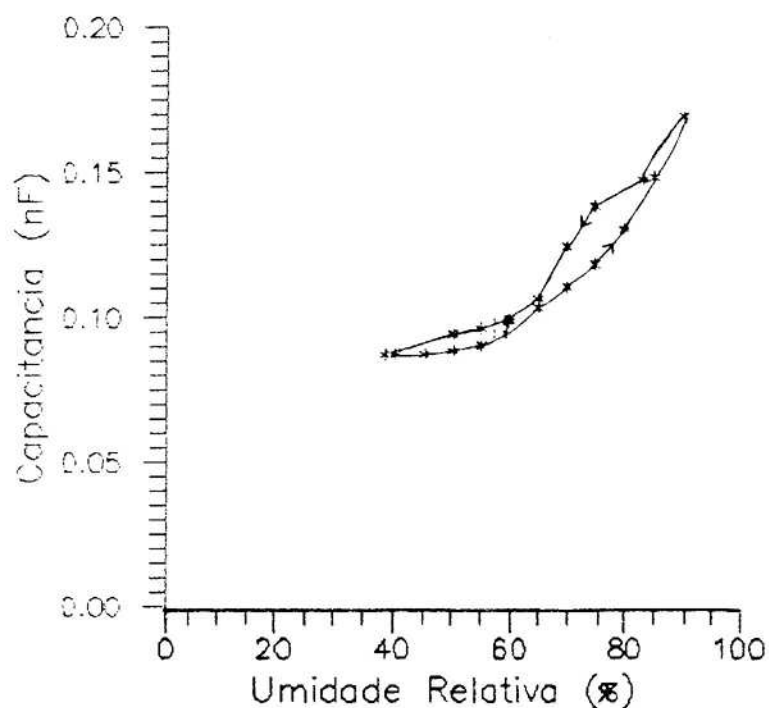


FIGURA 17 - Gráfico da Capacitância em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN2030, Apresentando Efeito de Histerese.

mesma umidade relativa na curva superior (umidade relativa decrescente).

É possível que esse efeito esteja associado a diferenças existentes entre os mecanismos de adsorção e dessorção da água pelos poros do filme de óxido de alumínio. No entanto, a própria histerese dos sensores usados para a determinação da umidade do ar, ou os seus diferentes tempos de resposta, pode ter influenciado na histerese.

O efeito de histerese foi também constatado, para sensores de óxido de alumínio, por WESTCOTT e ROGERS (1985); MIYATA e WATARI (1965); LAI e HIDY (1968) e JASON (1965). Segundo LAI e HIDY (1968), esse efeito pode ser atenuado, ao manter o sensor em local bem ventilado. De acordo com WESTCOTT e ROGERS (1985), o efeito de histerese foi maior quando o sensor foi exposto, durante longo tempo, à umidade relativa elevada. De acordo com esses autores, esse efeito poderá ser diminuído, se o sensor for banhado com água destilada fervente. JASON (1965) considerou desprezíveis os efeitos devidos à histerese, tendo em vista a dispersão dos seus dados experimentais.

Ainda com relação ao efeito de histerese, MIYATA e WATARY (1965) mostraram que se pode reduzir esse efeito, mediante anodização com ácido oxálico. Usando um higrômetro semelhante e solução de óxido oxálico a 3%, ao invés de ácido sulfúrico, concluíram que, ao aumentarem a umidade relativa de 30% a 80% e, depois, ao diminuírem a umidade relativa até 30%, os pontos do gráfico não se repetiam, apresentando pequena histerese, que, segundo eles, apresentou erro de apenas 1,5%. No entanto, tal tipo de anodização apresentou desvios de calibração em testes de longa duração.

4.3. Resistência do Sensor

A Figura 18 mostra que a resistência elétrica é outra grandeza do sensor que também varia em função da umidade relativa, porém, nesse caso, seu valor diminui, quando a umidade relativa aumenta. A variação da resistência em função da umidade relativa não é linear; a curva que melhor se ajusta aos pontos experimentais é uma função logarítmica.

Os valores da resistência dos sensores foram, em geral, muito elevados. A resistência dos outros sensores extrapolou a faixa de medição dos instrumentos disponíveis no Laboratório, mas, provavelmente, deve apresentar comportamento análogo ao do sensor analisado (sensor AN4030).

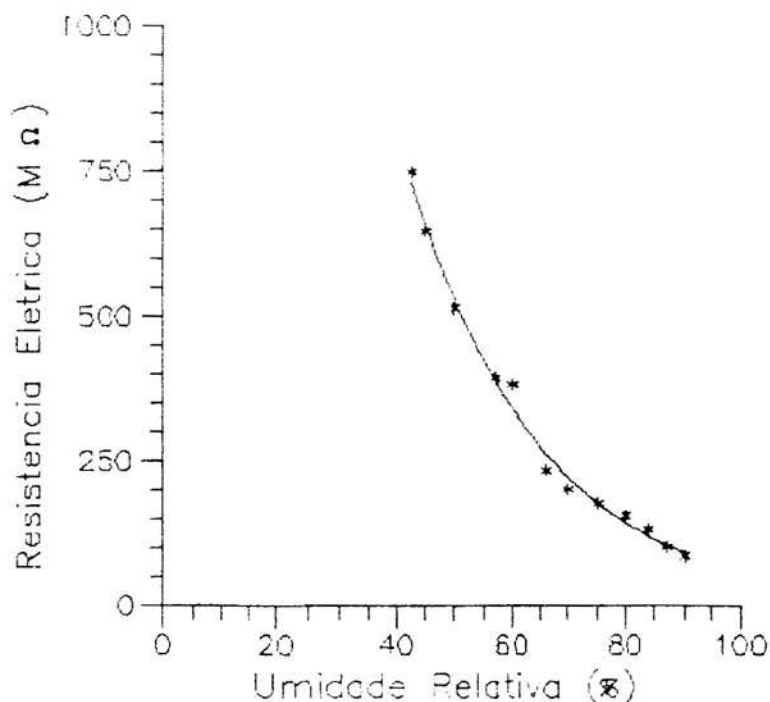


FIGURA 18 - Gráfico da Resistência em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN4030.

4.4. Freqüência do Oscilador em Função da Umidade Relativa

A Figura 19 mostra o gráfico da freqüência obtida pelo circuito oscilador em função da umidade relativa, em que o elemento que induz à variação da freqüência, em função da umidade, é o sensor AN1030. A equação da reta que melhor representa os dados experimentais é $y = -70,1569x + 11293,4$, com um coeficiente de correlação igual a 0,9976.

O fato de os pontos estarem alinhados pode parecer inesperado, porque a freqüência gerada por esse circuito varia com o inverso da capacitância e esta, exponencialmente, varia com a umidade. Assim, poder-se-ia esperar que a freqüência variasse com o inverso da exponencial da umidade, o que daria uma curva, e não uma reta, como a obtida.

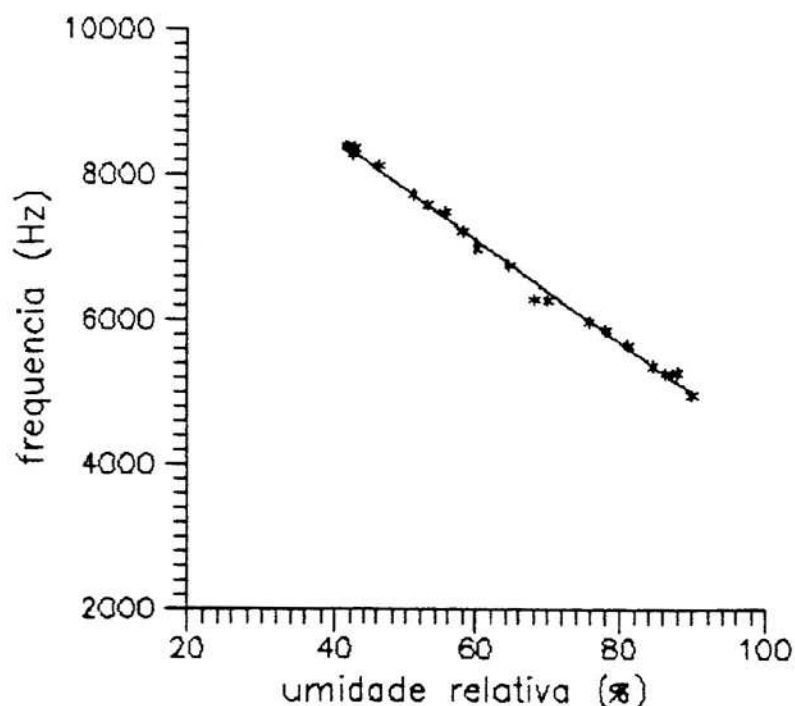


FIGURA 19 - Gráfico da Freqüência em Função da Umidade Relativa para o Sensor AN1030. Temperatura Média do Experimento de 28°C.

Pode-se explicar a linearidade observada na Figura 19, visto que o sensor não é um elemento puramente capacitivo. Como já mencionado anteriormente, além da capacitância, o sensor apresenta resistência elétrica que também varia em função da umidade relativa. Enquanto a capacitância cresce com o aumento da umidade, a resistência do sensor decresce, de forma que tais variações tendem a se compensar, implicando menor alteração do produto RC.

4.5. Teste de Campo

As Figuras 20 e 21(a) mostram as capacitâncias de cada sensor em função da hora em que a medida foi realizada. Em virtude de problemas com as escalas, não foi possível representar todas as curvas em um único sistema cartesiano.

Essas curvas podem ser comparadas com as da Figura 21b, constatando-se grande semelhança entre as curvas da capacitância de cada sensor e as de umidade relativa, indicadas por dois higrômetros para o mesmo local, em função da hora do dia.

O mesmo pode ser constatado nos gráficos da Figura 22, em que se verifica, mais uma vez, que a capacitância do sensor altera sensivelmente com a variação da umidade relativa, desta vez medida por meio de um psicrômetro aspirado. Pode-se notar também a grande semelhança entre os aspectos das duas curvas, da capacitância do sensor e da umidade relativa do psicrômetro, durante o período em que ocorreu a leitura. A temperatura máxima obtida foi $27,2^{\circ}\text{C}$, e a mínima, $18,8^{\circ}\text{C}$.

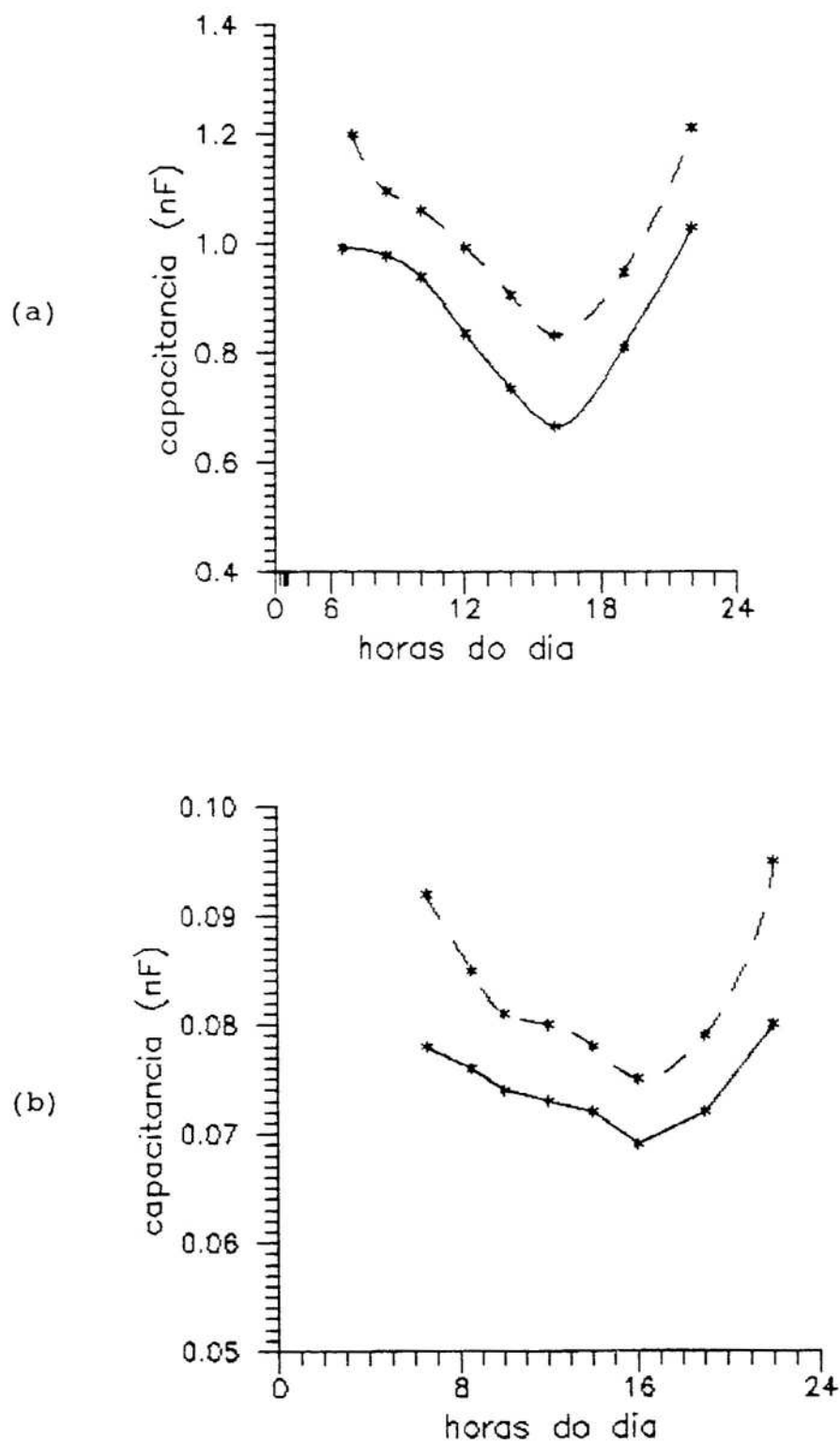


FIGURA 20 - Gráficos da Capacitância em Função da Hora do Dia. (a) AN1030 (Linha Tracejada), AN1060 (Linha Contínua); (b) AN2030 (Linha Tracejada) AN3030 (Linha Contínua).

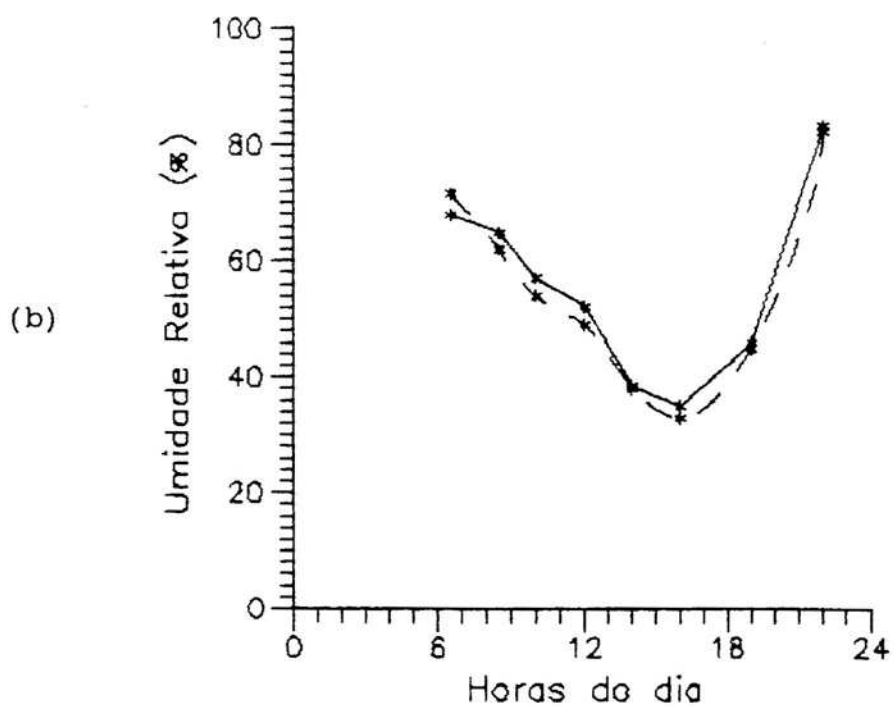
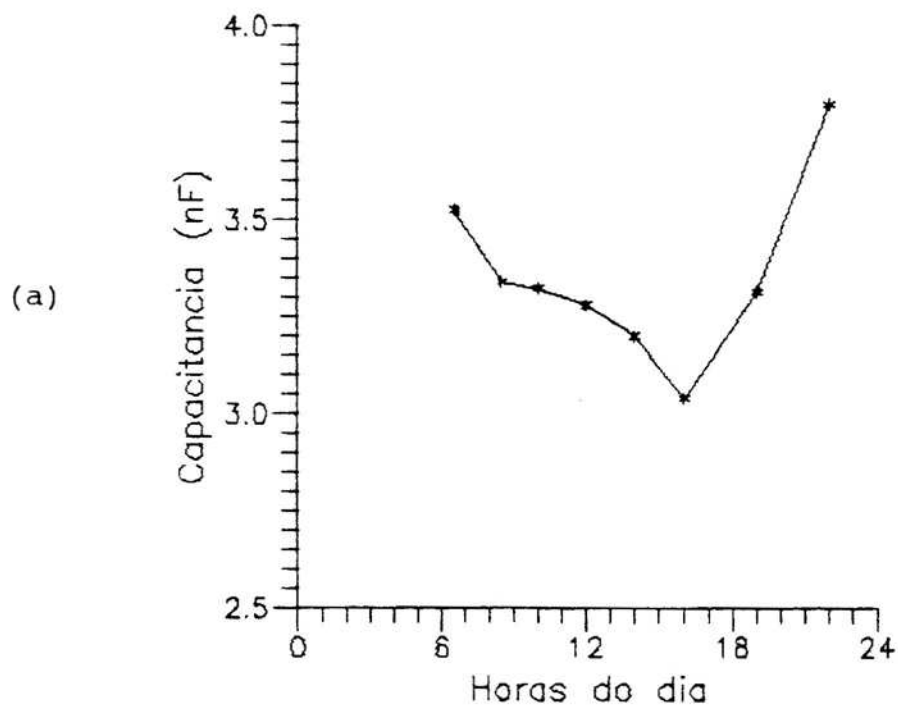


FIGURA 21 - Gráficos da Capacitância em Função da Hora do Dia. (a) AN4030 (b) Higrômetros: IOPhigro 50 (Linha Tracejada), Soar HT-150 (Linha Contínua).

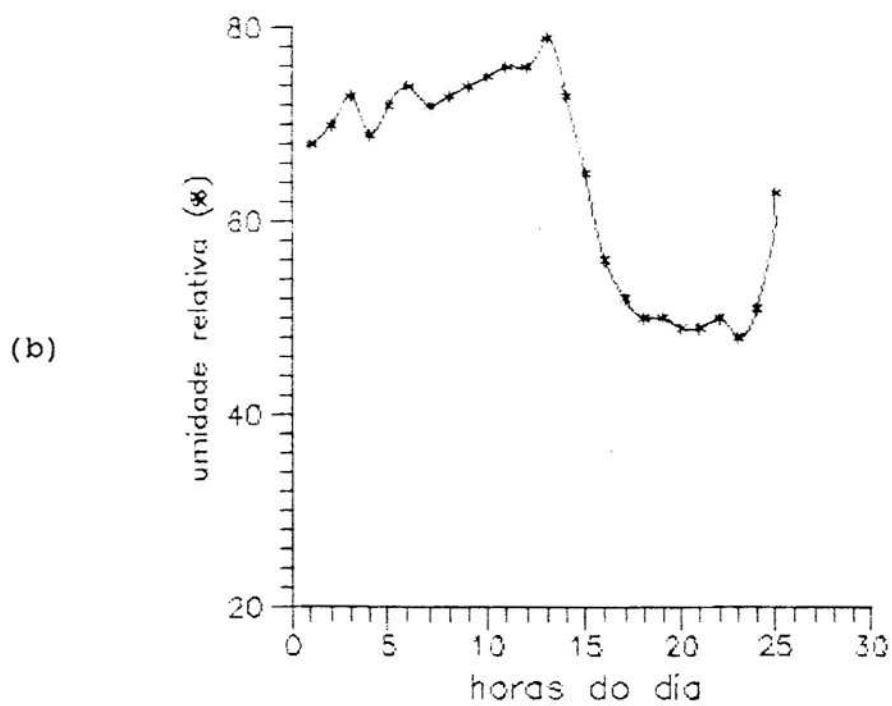
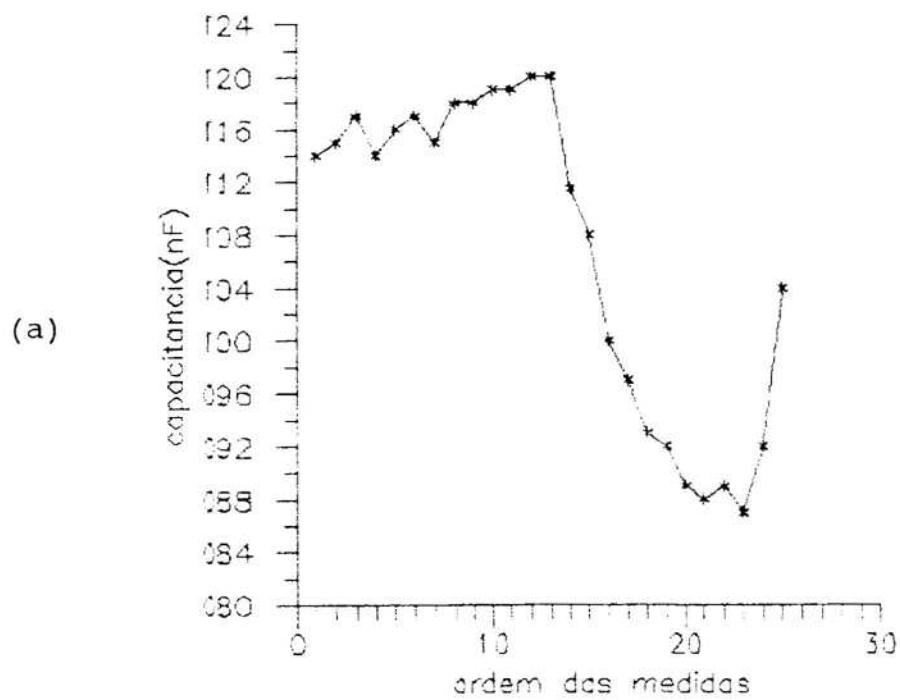


FIGURA 22 - Gráficos: (a) Capacitância em Função da Hora Seqüencial de Leitura para o Sensor AN4030; (b) da Umidade Relativa em Função da Hora Seqüencial de Leitura Obtida no Psicrômetro Aspirado.

4.6. Tempo de Resposta e Constante de Tempo

Para se obter o tempo de resposta, fez-se uso do gráfico da frequência em função do tempo, com variação brusca da umidade relativa do ar. A Figura 23 mostra a resposta do sensor AN1030 a variações bruscas da umidade do ar, enquanto a Figura 24, a resposta do sensor AN4030.

Para uma variação crescente da umidade relativa, não foi possível precisar um valor exato em que a frequência do circuito acusasse um equilíbrio com a umidade relativa, uma vez que os valores finais ainda sofriam pequeno decréscimo (Figuras 23a e 24a). Essa demora na estabilização final pode ser devida à diferença de temperatura entre o interior da câmara e o meio externo, que é mais frio. Como o circuito é constituído de resistores, a diferença de temperatura, mesmo pequena, pode ter afetado o tempo de estabilização.

Para uma variação brusca decrescente da umidade, mediante gráficos das Figuras 23b e 24b, pôde-se determinar o intervalo de tempo entre os valores extremos da frequência, que é o tempo de resposta (t_r), em torno de 20 segundos para o sensor AN1030, e 10 segundos para o sensor AN4030.

Foram encontradas as seguintes constantes de tempo, considerando-se apenas os gráficos de umidade relativa decrescente (Figuras 23b e 24b): 8 s para o sensor AN1030 e 2,5 s para o sensor AN4030.

Os tempos de resposta encontrados são superiores aos constatados por LAI e HIDY (1968), que registraram tempo de resposta, para um sensor cilíndrico, de 0,12 s, para uma variação crescente da umidade relativa de 40 a 90%, e de

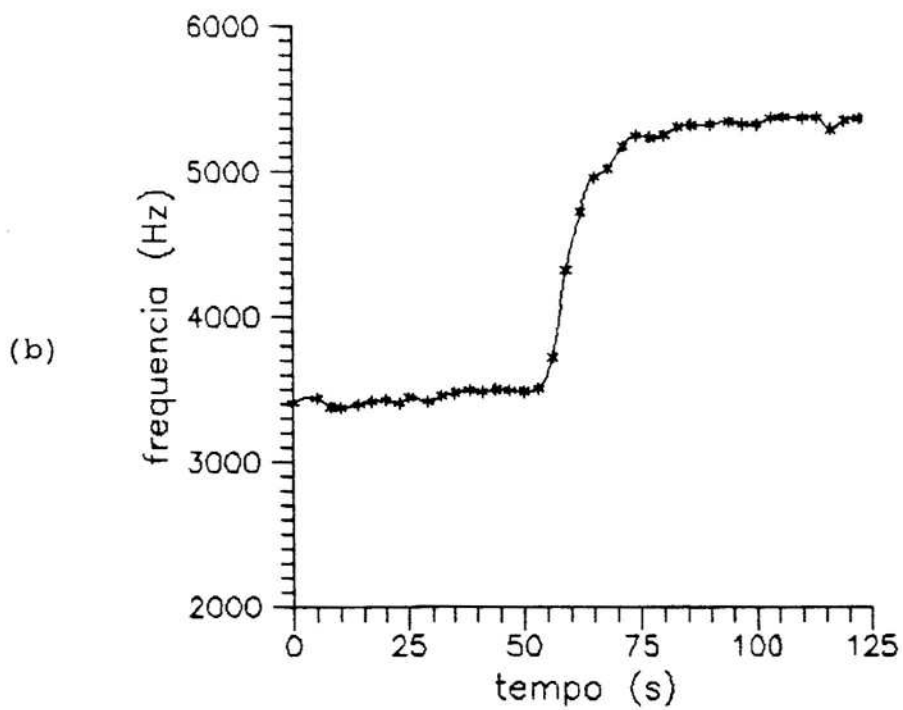
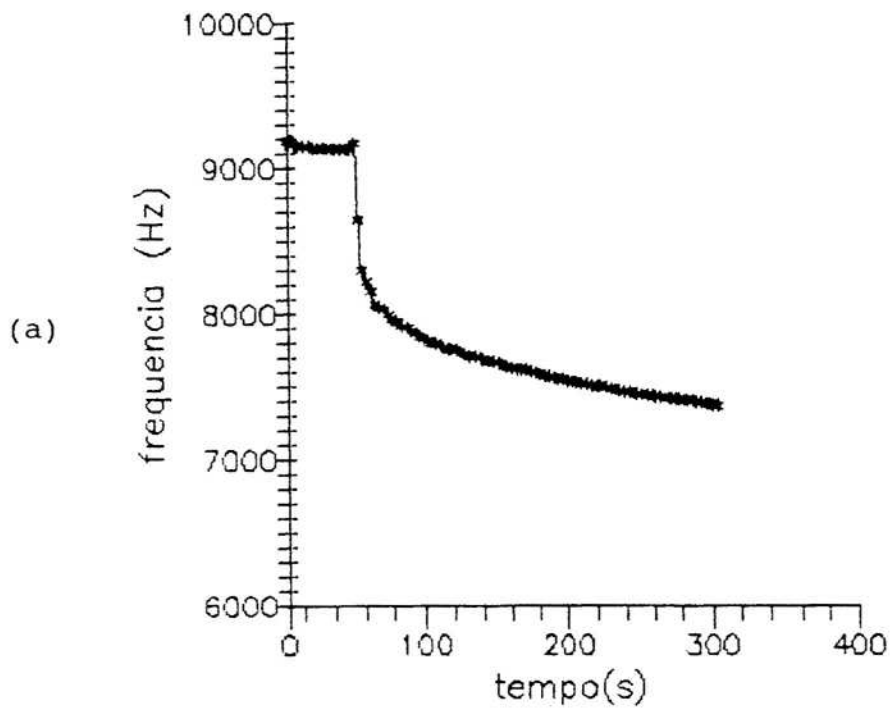


FIGURA 23 - Gráfico da Frequência em Função do Tempo para o Sensor AN1030, sob Variação Brusca da Umidade Relativa de: (a) 31,5 a 67,2%, (b) 90 para 53,7%.

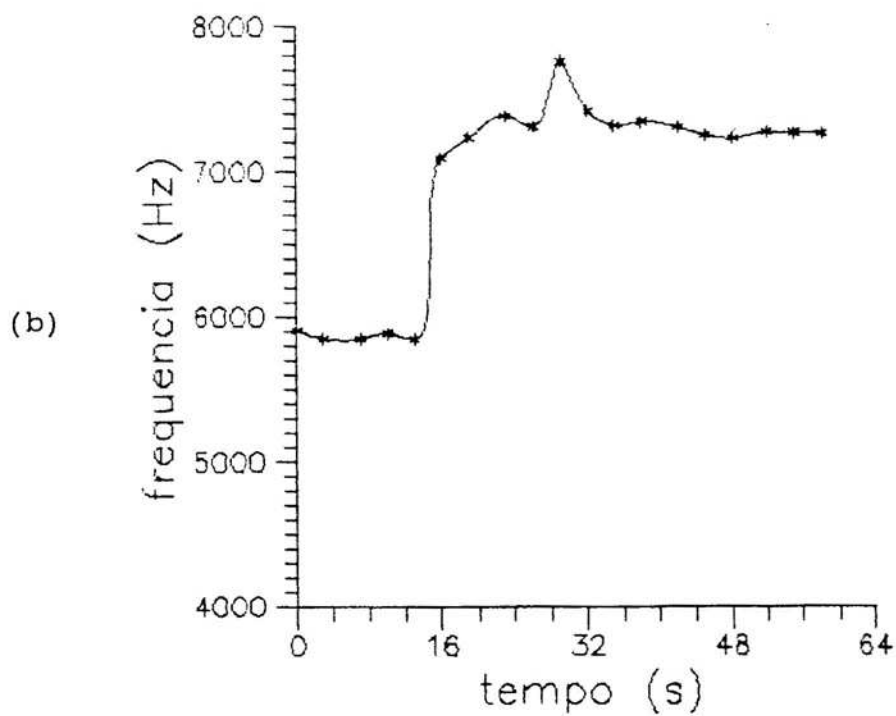
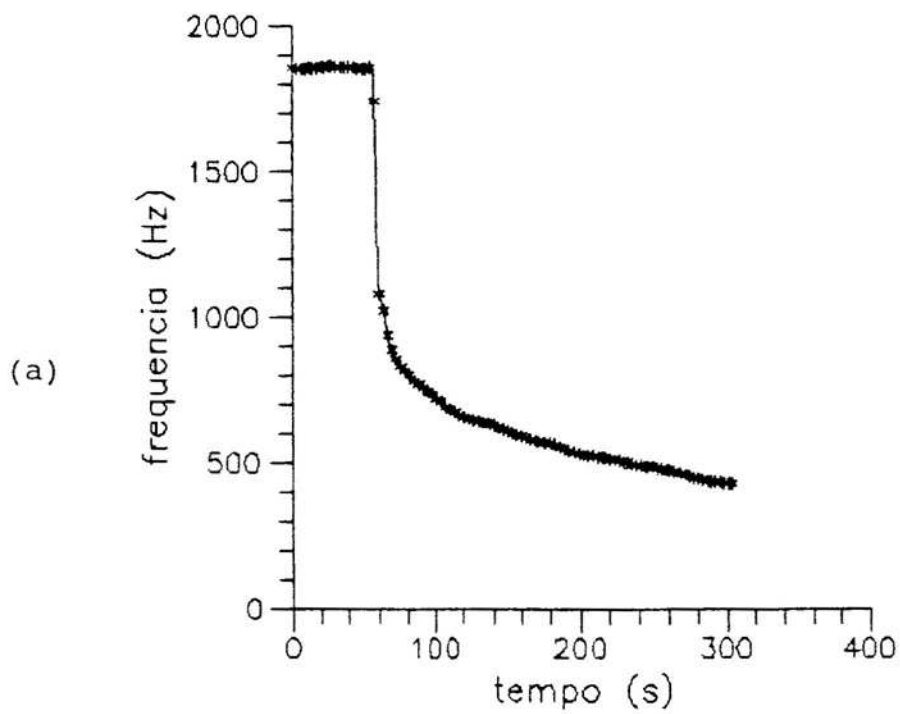


FIGURA 24 - Gráfico da Frequência em Função do Tempo para o Sensor AN4030, sob Variação Brusca da Umidade Relativa de: (a) 33,5 a 66%, (b) 91 para 53,7%.

0,4 s, para umidade relativa de 90 a 40%. Numa segunda tentativa, conseguiram diminuir o tempo de resposta para a umidade decrescente, de 0,4 s para 0,12 s, instalando um jato de ar seco direcionado para o sensor com velocidade de, aproximadamente, 1 m/s. É bom salientar que esses pesquisadores utilizaram, para obterem variação da umidade relativa, um jato de vapor com velocidade de cerca de 10 m/s.

4.7. Considerações Gerais sobre os Sensores

Conforme previsto, verificou-se que, à medida que aumenta a densidade de corrente ou o tempo de anodização, o valor da capacitância diminui. Por exemplo, durante os testes de campo, às 14 horas, em que a umidade relativa era de 38%, as leituras correspondentes a cada sensor foram:

- Para o sensor AN1030, 0,906 nF;
- Para o sensor AN1060, 0,735 nF;
- Para o sensor AN2030, 0,078 nF;
- Para o sensor AN3030, 0,072 nF; e
- Para o sensor AN4030, 3,20 nF.

Esses valores não são, proporcionalmente, iguais aos esperados, considerando apenas o aumento da espessura do dielétrico, mas nota-se diminuição da capacitância, quando se aumentam a densidade de corrente ou o tempo de anodização, exceto para o sensor AN4030, que, ao invés de ter sua capacitância diminuída, teve-a aumentada, o que pode ser explicado pela elevada densidade de corrente utilizada

na anodização ($0,40 \text{ mA/mm}^2$), a qual pode ter ocasionado alteração na camada de óxido.

Segundo JASON (1965), a escolha da densidade de corrente é arbitrária, mas, acima de $0,50 \text{ mA/mm}^2$, a camada de óxido tende a se lascar. Isso explica porque todos os sensores fabricados com essa densidade de corrente (AN5030), em número de três, apresentaram curto-circuito. De maneira semelhante, o sensor AN4030 pode ter sofrido algum dano na camada de óxido.

A não-correspondência do fator de redução pode ser explicada, em primeiro lugar, pelo fato de o conteúdo de água existente entre os poros da camada de óxido alterar, substancialmente, suas propriedades elétricas. Desse modo, não se pode considerar apenas a espessura da camada de óxido, uma vez que as medições foram feitas para teores de umidade relativa superiores a 30%. Além disto, o desenvolvimento de íons nas paredes dos poros depende, fortemente, das condições de anodização e afeta os mecanismos de adsorção.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Foi desenvolvido e testado um sensor de umidade do ar, com base nas variações das propriedades elétricas de um filme de óxido de alumínio.

Discos de alumínio de 8 mm de diâmetro por 3 mm de espessura foram polidos e tiveram uma de suas faces submetidas à anodização em solução de ácido sulfúrico a 10%. Diferentes condições de anodização foram utilizadas, variando-se a densidade de corrente de 0,10 até 0,50 mA/mm², com tempos de anodização de 30 ou 60 minutos. Um filme fino, de ouro, poroso, foi depositado sobre o óxido, mediante evaporação, formando um capacitor plano. A densidade de corrente que mostrou melhores resultados foi a de 0,10 mA/mm², com um tempo de anodização de 30 minutos.

Estudos sobre capacitância em função do teor de umidade mostraram que, para variações de umidade relativa de 30 a 90%, os sensores tiveram sua capacitância multiplicada por fatores entre dois e quatro.

Neste trabalho, apesar de ter-se constatado melhor anodização entre os valores testados para obtenção do sensor, deve-se buscar efetiva otimização das condições de anodização, não apenas mediante estudo do comportamento dos sensores obtidos, mas também mediante caracterização das propriedades físicas dos filmes de óxido produzidos. Recomenda-se, durante cada passo do processo de anodização, cuidado especial com o desgorduramento e com a limpeza da superfície a ser anodizada.

Faz-se necessária uma advertência sobre a solda dos terminais no sensor. A tinta prata, útil em testes de laboratório, com o passar do tempo resseca e acaba soltando os terminais, enquanto as microsoldas, comuns em laboratórios de microeletrônica, não apresentam tal problema.

O sensor desenvolvido apresentou, em relação a vários instrumentos tradicionais, como, por exemplo, higrômetros de fio de cabelo e psicrômetros, algumas vantagens que merecem ser destacadas: maior sensibilidade, menor tempo de resposta, pequenas dimensões e baixo custo, além, naturalmente, da facilidade de registro e de processamento do sinal elétrico fornecido pelo sensor.

Estudou-se o uso do sensor acoplado a um circuito oscilador, considerando-se que a medida da frequência é mais adequada em laboratórios, que a medida de capacitância, visto que aquela apresenta leitura mais acessível. Além dessa vantagem, os resultados obtidos mostraram linearidade da frequência em função da umidade relativa, o que facilita a calibração do sensor e a maneira de expressá-la em números mediante de um sistema digital.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- ARGENTIÉRE, R. **Novíssimo receituário industrial**, São Paulo, Cone, 1985. 411 p.
- BUENO, W.A.; BOODTS, J.F.C.; DEGREVE, L; LEONE, F.A. **Química geral**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1979. 734 p.
- DANA, J.D. **Manual de mineralogia**, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1983. 642 p.
- DOEBELIN, E.O. **Measurement system**; application and design. New York, McGraw - Hill Book, 1966. 772 p.
- JASON, A.C. Some properties and Limitations of the aluminum Oxide Hygrometer, In: WEXLER, A., ed. **Humidity and moisture**, measurement and control in science and industry. New York, Reinhold Publishing, 1965. v.1, p.372-390.
- KAJIMOTO, Z.P.; ALMEIDA, N.L.; SIQUEIRA, F.J.S. **Corrosão atmosférica no estado de São Paulo**. São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológica, 1991. 86 p.
- KHANNA, V.K. & NAHAR, R.K. Carrier-transfer mechanisms and Al₂O₃ sensors for low and high humidities, **J. Appl. Phys.**, 19:141-145, 1986.
- KHANNA, V.K. & NAHAR, R.K. Effect of moisture on the Dielectric properties of porous alumina films. **Sens. Actuat.**, 17:187-198, 1983.
- LAI, J.R. & HIDY, G.M. Microsensor for measuring humidity. **Rev. Sci. Instrumen.**, 38:1197-1203, 1968.

- MAISSEL, L.I. & GLANG, R. **Handbook of thin film technology**, New York, 1980. p.16-24.
- MIYATA, A. & WATARI, H. A higrometer which utilizes an anodic oxid film of alumnum, In: WEXLER, A., ed. **Humidity and moisture**; measurement and control in science and industry. New York, Reinhold Publishing, 1965. v.1, p.391-404
- NAHAR, R.D.; KHANNA, V.K.; KHOKLE, W.S. On the origin of the humidity-sensitive eletrical properties of porous aluminium oxid. **J. Appl. Phys.**, 17:2087-2095, 1984.
- PEARCY, R.W.; EHLERINGER, J.R.; MOONEY, H.A.; RUNDEL, P.W.; **Plant physiological ecology**, field methods and instrumentation, London, British Library, 1989. 442 p.
- PENMAN, H.L. **Humidity**, London, Chapman and Hall, 1958. 71p. (The Institute of Physics. Monographs for students).
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERNA, S.B. **Microclimate: The Biological Environment**, Lincoln, Wiley-Interscience, 1983. 495 p.
- TUBELIS, A. & NASCIMENTO, F.J.L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. Botucatu, USP, 1986. 374 p.
- WESTCOTT, L. & ROGERS, G. Humidity sensitive MIS structure. **J. Phys. E: Sci. Instrum.**, 18:577-580, 1985. (Research Papers).

APÊNDICE

APÊNDICE A

QUADRO 1A - Umidade Relativa e Capacitância para o Sensor AN1030. Temperatura do Experimento em Torno de 23°C

AN1030 x Umidade Relativa (%)	AN1030x Capacitância (nF)	Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
29,10	0,79	59,00	1,46
30,00	0,81	60,00	1,47
31,00	0,83	61,00	1,50
32,50	0,86	62,50	1,53
33,50	0,87	64,00	1,56
35,00	0,89	70,00	1,70
37,50	0,92	73,00	1,76
40,00	0,95	77,00	1,89
42,50	0,99	80,00	1,98
45,00	1,01	83,00	2,12
47,50	1,04	84,00	2,17
50,00	1,07	85,00	2,22
55,50	1,34	87,50	2,29
56,40	1,33	88,00	2,30

QUADRO 2A - Valores da Umidade Relativa e os Correspondentes Valores da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN1030. Temperatura do Experimento em Torno de 27°C

Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
89,00	2,37
85,00	2,27
80,00	2,23
75,00	2,12
70,00	1,97
65,00	1,80
60,00	1,73
55,00	1,45
50,00	1,33
45,00	1,21
40,00	1,09
35,00	1,00
30,00	0,93
27,50	0,90
25,00	0,87

QUADRO 3A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN1060. Temperatura do Experimento em Torno de 25°C

Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
35,00	0,64
40,00	0,69
45,00	0,75
50,00	0,81
55,00	0,97
60,00	1,04
65,00	1,11
70,00	1,17
75,00	1,23
80,00	1,28
85,00	1,33
90,00	1,47
95,00	1,56

QUADRO 4A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN2030. Temperatura do Experimento em Torno de 26°C

Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
43,00	0,087
50,00	0,088
55,00	0,090
60,00	0,094
65,00	0,099
70,00	0,103
75,00	0,110
80,00	0,118
85,00	0,130
90,00	0,148
95,00	0,169

QUADRO 5A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN3030. Temperatura do Experimento em Torno de 25°C

Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
78,50	0,120
73,50	0,101
71,20	0,094
70,00	0,089
67,50	0,084
65,00	0,076
60,00	0,065
55,00	0,058
50,00	0,052
45,00	0,046
40,00	0,041
35,00	0,038
32,50	0,035
31,50	0,034

QUADRO 6A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN4030. Temperatura do Experimento em Torno de 25°C

Capacitância (nF)	Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)	Umidade Relativa (%)
1,57	30,00	3,53	53,20
1,63	31,00	3,74	54,00
1,68	32,00	3,96	55,00
1,71	33,00	4,64	57,00
1,78	34,00	4,76	58,50
1,88	35,50	5,20	62,00
1,90	36,50	6,60	65,00
1,94	37,00	6,65	65,60
1,97	38,00	7,26	67,00
2,01	39,00	7,38	68,00
2,07	40,00	7,51	69,00
2,10	41,00	7,61	70,00
2,14	42,00	7,80	72,00
2,27	43,00	7,95	74,00
2,23	44,00	8,07	76,00
2,27	45,00	8,16	77,50
2,31	46,50	8,37	80,00
2,40	48,00	8,47	81,00
2,49	49,00	8,66	83,00
2,94	51,00	9,00	85,00

QUADRO 7A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN4030. Temperatura do Experimento em Torno de 23°C

Capacitância (nF)	Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)	Umidade Relativa (%)
1,56	33,00	5,20	62,00
1,60	34,00	6,60	65,00
1,63	35,00	6,98	70,00
1,67	36,00	7,15	71,00
1,73	37,00	7,30	72,00
1,77	38,00	7,41	73,00
1,81	39,00	7,53	74,00
1,85	40,00	7,64	75,00
1,89	41,00	7,75	76,00
1,93	42,00	7,86	77,00
2,04	44,00	7,98	78,00
2,13	46,00	8,15	79,50
2,24	48,00	8,47	82,00
2,34	50,00	8,70	83,00
2,50	53,00	8,98	84,00
2,60	54,00	9,25	85,00
2,75	56,00	9,53	86,00
4,61	61,00	10,30	87,00

QUADRO 8A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância, Obtidos para o Sensor AN4030. Temperatura do Experimento em Torno de 27°C

Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
44,70	2,40
50,00	2,58
55,00	2,80
60,00	3,10
65,00	3,55
70,00	3,90
75,00	4,54
80,00	5,40
85,00	6,58
90,00	8,15
40,00	1,63
35,00	1,50
33,00	1,48
31,80	1,47

QUADRO 9A - Valores da Resistência e da Umidade Relativa, Obtidos para o Sensor AN4030. Temperatura do Experimento em Torno de 25°C

Umidade Relativa (%)	Resistência (MΩ)
42,50	750,00
45,00	647,00
50,00	514,00
57,00	393,00
60,00	382,00
66,00	234,00
70,00	202,00
75,00	177,00
80,00	156,00
84,00	133,00
87,00	102,00
90,00	86,00

QUADRO 10A - Valores da Resistência e da Umidade Relativa, Obtidos para o Sensor AN1030. Temperatura do Experimento em Torno de 28°C

Ordem	Tempo (s)	Frequência (Hz)	Umidade Relativa (%)
1	0	4961	90,0
2	124	5272	87,9
3	249	5258	86,4
4	374	5362	84,6
5	499	5652	81,2
6	624	5854	78,0
7	749	5970	75,7
8	874	6272	70,0
9	999	6277	68,0
10	1124	6755	64,5
11	1249	6988	60,0
12	1374	7219	58,0
13	1499	7483	55,4
14	1624	7584	53,0
15	1750	7725	50,9
16	1875	8127	46,3
17	2000	8366	42,8
18	2125	8283	42,5
19	2251	8401	41,5
20	2376	8370	41,7

QUADRO 11A - Tabela de Valores da Capacitância de Diversos Sensores e da Umidade Relativa do Ar Indicada pelos Dois Higrômetros (Higr.) de Referência, e o Horário Correspondente às Respektivas Leituras

Hora	AN1030	AN1060	AN2030	AN3030	AN4030	Higr.Iop	Higr.S
6:30	1,20	0,99	0,092	0,078	3,526	71,7	68,0
8:30	1,10	0,98	0,085	0,076	3,340	62,0	65,0
10:0	1,06	0,94	0,081	0,074	3,323	54,0	67,0
12:0	0,99	0,84	0,080	0,073	3,280	49,0	52,2
14:0	0,91	0,74	0,078	0,072	3,200	38,0	38,5
16:0	0,83	0,67	0,075	0,069	3,040	33,0	35,1
19:0	0,95	0,81	0,079	0,072	3,315	45,0	46,0
22:0	1,21	1,03	0,095	0,080	3,080	82,4	83,6

QUADRO 12A - Valores da Umidade Relativa e da Capacitância para o Sensor AN4030

Ordem	Umidade Relativa (%)	Capacitância (nF)
1	68	1,14
2	70	1,15
3	73	1,17
4	69	1,14
5	72	1,16
6	74	1,17
7	72	1,15
8	74	1,18
9	75	1,18
10	76	1,19
11	76	1,19
12	79	1,20
13	73	1,15
14	65	1,08
15	56	1,00
16	52	0,97
17	50	0,93
18	50	0,92
19	49	0,89
20	49	0,88
21	49	0,88
22	50	0,89
23	48	0,87
24	51	0,92
25	63	1,04

QUADRO 13A - Valores da Frequência e do Tempo, Obtidos para o Sensor AN1030, sob Variação Brusca da Umidade Relativa do Ar, de 35 para 66,5%

Tempo (s)	Frequência (Hz)	Tempo (s)	Frequência (Hz)
0	9194	148	7670
2	9195	151	7660
5	9189	154	7648
8	9175	157	7636
11	9169	160	7628
14	9164	164	7623
17	9156	167	7620
20	9155	170	7616
23	9149	174	7608
26	9143	177	7594
29	9136	180	7587
32	9137	183	7578
35	9136	187	7571
38	9136	190	7563
41	9134	193	7556
44	9135	196	7551
47	9127	200	7542
50	9134	203	7535
53	9175	206	7527
56	8646	209	7523
58	8302	213	7518
61	8224	216	7510
64	8157	219	7510
67	8068	222	7504
70	8043	226	7497
73	8029	229	7488
76	7997	232	7480
78	7969	235	7472
81	7948	239	7466
85	7922	242	7463
88	7905	245	7457
91	7888	248	7450
93	7866	251	7445
96	7848	255	7440
99	7832	258	7438
102	7816	261	7433
104	7803	264	7431
107	7797	269	7421
110	7786	272	7418
113	7769	275	7418
116	7761	278	7416
118	7757	281	7413
121	7750	283	7406
124	7735	286	7403
128	7724	289	7398
131	7712	292	7394
135	7705	295	7387
138	7695	298	7381
141	7690	300	7374
144	7680	303	7370

QUADRO 14A - Valores da Freqüência e do Tempo, Obtidos para o Sensor AN1030, sob Variação Brusca da Umidade Relativa do Ar, de 35 para 66,5%

Tempo (s)	Freqüência (Hz)	Tempo (s)	Freqüência (Hz)
0	3410	65	4966
5	3443	68	5025
8	3380	71	5181
10	3373	74	5253
14	3399	77	5238
17	3416	80	5256
20	3429	83	5313
23	3409	86	5327
25	3445	90	5332
29	3417	94	5347
32	3458	97	5333
35	3477	100	5329
38	3493	103	5372
41	3488	106	5382
44	3503	110	5375
47	3498	113	5378
50	3489	116	5293
53	3509	119	5357
56	3726	122	5369
59	4324		
62	4724		

QUADRO 15A - Valores da Frequência e do Tempo, Obtidos para o Sensor AN4030, sob Variação Brusca da Umidade Relativa do Ar, de 33,5 a 66%

Tempo (s)	Frequência (Hz)	Tempo (s)	Frequência (Hz)
0	1859	153	602
3	1854	157	598
6	1855	160	592
9	1857	163	587
12	1861	166	582
14	1857	169	579
17	1856	172	573
20	1863	176	571
23	1862	180	568
26	1866	183	563
28	1864	186	556
31	1860	189	550
34	1860	192	542
37	1861	196	537
40	1859	199	533
43	1860	202	529
46	1855	205	528
49	1857	209	525
51	1857	211	522
54	1860	215	520
57	1742	217	518
60	1083	220	514
63	1024	223	512
66	940	226	508
69	890	230	503
72	858	232	502
75	830	235	496
78	814	238	493
81	803	241	493
85	782	244	490
88	773	246	489
91	760	249	490
94	746	252	483
98	736	255	483
101	720	258	479
104	712	260	474
107	694	263	471
110	684	268	464
114	675	271	462
117	665	274	454
120	659	277	450
123	651	280	447
130	643	283	444
133	640	286	439
137	634	289	438
140	630	292	437
144	623	295	436
147	615	298	433
150	610	301	432
		304	431

QUADRO 16A - Valores da Freqüência e do Tempo, Obtidos para o Sensor AN4030, sob Variação Brusca da Umidade Relativa do Ar, de 91 para 53,7%

Tempo (s)	Freqüência (nF)
0	5907
3	5851
7	5852
10	5890
13	5852
16	7095
19	7238
23	7387
26	7314
29	7760
32	7422
35	7318
38	7345
42	7308
45	7252
48	7229
52	7272
55	7268
58	7267