



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**ALEXANDRE PIZZOLATTO GONÇALVES FERREIRA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM *SMART SENSOR* PARA MEDIDA DE UMIDADE EM  
POLPA DE PAPEL USANDO UM SENSOR CAPACITIVO TIPO *FRINGING FIELD*  
BASEADO EM TECNOLOGIA PCB**

**DEVELOPMENT OF A SMART SENSOR TO MEASURE MOISTURE CONTENT IN  
PAPER BULB USING A CAPACITIVE SENSOR FRINGING FIELD TYPE BASED ON  
PRINT CIRCUIT BOARD TECHNOLOGY**

**CAMPINAS**

**2019**

**ALEXANDRE PIZZOLATTO GONÇALVES FERREIRA**

DESENVOLVIMENTO DE UM *SMART SENSOR* PARA MEDIDA DE UMIDADE EM  
POLPA DE PAPEL USANDO UM SENSOR CAPACITIVO TIPO *FRINGING FIELD*  
BASEADO EM TECNOLOGIA PCB

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia Elétrica e de Computação da  
Universidade Estadual de Campinas como parte  
dos requisitos exigidos para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica na área de  
Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias.

ESTE TRABALHO DIGITAL  
CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA  
DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO  
ALEXANDRE PIZZOLATTO GONÇALVES  
FERREIRA E ORIENTADA PELO  
PROFESSOR JOSÉ ANTONIO SIQUEIRA  
DIAS

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

Ferreira, Alexandre Pizzolatto Gonçalves, 1970-

F413d      Desenvolvimento de um smart sensor para medida de umidade em polpa de papel usando um sensor capacitivo tipo fringing field baseado em tecnologia PCB / Alexandre Pizzolatto Gonçalves Ferreira. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: José Antonio Siqueira Dias.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Sensor. 2. Capacitores. 3. Umidade. I. Dias, José Antonio Siqueira, 1954-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Development of a smart sensor to measure moisture content in paper bulb using a capacitive sensor fringing field type based on print circuit board technology

**Palavras-chave em inglês:**

Sensor  
Capacitor  
Moisture

**Área de concentração:** Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

**Titulação:** Mestre em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

José Antonio Siqueira Dias [Orientador]  
Luis Fernando Caparroz Duarte

Flávio José de Oliveira Moraes

**Data de defesa:** 29-11-2019

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-4127-1427>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/8210106460603957>

## COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Candidato:** Alexandre Pizzolatto Gonçalves Ferreira RA: 037289

**Data da Defesa:** 29 de novembro de 2019

**Título da Tese:** " Desenvolvimento de um smart sensor para medida de umidade em polpa de papel usando um sensor capacitivo tipo fringing field baseado em tecnologia PCB”

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente)

Prof. Dr. Luís Fernando Caparroz Duarte

Prof. Dr. Flávio José de Oliveira Moraes

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no SIGA (Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese) e na Secretaria de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

## DEDICATÓRIA

*Dedicar é ser devoto, manifestar amor e respeito. Acima de tudo dedico minha vida a Deus e dedico este trabalho às pessoas que amam gratuitamente às outras como Jesus nos ensinou e, em particular, ao Professor Siqueira por tudo o que ele gratuitamente fez por mim nesta jornada. Meus respeito e gratidão eternos.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço minha querida esposa pelo apoio, a meus filhos por entenderem as minhas várias ausências e as brincadeiras às quais me abstive; minha mãe e meu pai por tudo o que fizeram por mim abrindo mão de suas vidas para me suportar sempre.*

## RESUMO

Sensores capacitivos são aqueles que trabalham baseados no funcionamento de um capacitor, ou seja, a formação de um campo elétrico a partir de dois eletrodos energizados e separados de forma específica por um material dielétrico, material este que, ao variar, promove variação no campo que por sua vez, promove alteração na corrente ou na tensão que passam pelos eletrodos. Estes recebem tensão ou corrente e/ou um ou outro retornam ao circuito de processamento, de maneira que a variação interpretada traduz a variação do meio em questão.

A forma e os materiais construtivos dos eletrodos determinam o modo de funcionamento do sensor. O objetivo deste trabalho é construir um sensor capacitivo do tipo PCB - *Print Circuit Board* avaliando os resultados de várias amostragens para determinar a viabilidade deste dispositivo de medição.

Os experimentos demonstrados indicaram leituras positivas de variação de capacitância em função de amostras de polpa com umidades entre 90 e 94% com significativa repetibilidade. Os desvios padrão calculados demonstraram a pequena dispersão em relação às amostras.

**PALAVRAS-CHAVE:** sensores, capacitores, umidade, capacitância.

## **ABSTRACT**

Capacitive sensors are sensors that work based on the capacitor principles, it means, an electric field is created from two energized wires with specific dielectric environment that can change and due to the changes can change the current or voltage that goes by through the wires. The wires that connect sensor and processor circuit deliver the current or voltage to the processor that defines the variation of the environment. The form and base materials of the sensors determine how the sensors work. The scope of this work is to build a capacitive sensor type PCB - "Print Circuit Boarding" and evaluate the results and feasibility of this type of capacitive sensor.

The experiment had demonstrated positive results of capacitive variation face to samples of pulps with different levels of moisture between 90 and 94% with reasonable repeatability. The standard deviations were calculated and had demonstrated small spread regarding the samples indicating good work of the prototype.

Keywords: sensors, capacitors, moisture, capacitance.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Esquema do sensor interdigitado e seus principais componentes                                  | 24 |
| Figura 2  | Esquema do sensor “HUMENI” e suas partes   | 25 |
| Figura 3  | Esquema de placas de área A e distância entre placas d   | 32 |
| Figura 4  | Esquema do sensor em camadas e suas partes   | 34 |
| Figura 5  | Circuito RC , processo de carga e processo de descarga   | 37 |
| Figura 6  | Arranjo RC para medição com sensor capacitivo, processo de carga e processo de descarga        | 39 |
| Figura 7  | Arranjo RC para medição com sensor capacitivo  | 40 |
| Figura 8  | Arranjo RC modificado pela adição de $R_1$   | 40 |
| Figura 9  | Esquema de interface direta utilizado no experimento   | 41 |
| Figura 10 | Esquema do sensor PCB do experimento   | 43 |
| Figura 11 | Esquema de carga e descarga do sensor capacitivo $C_x$ do experimento                          | 45 |
| Figura 12 | Esquema de carga instantânea com pulsos de descarga controlados                                | 46 |
| Figura 13 | Diagrama de blocos do circuito do sensor inteligente   | 47 |
| Figura 14 | Fotografia do sensor fabricado: (a) lado inferior; (b) lado superior.                          | 51 |
| Figura 15 | Gráfico das médias das capacitâncias medidas com umidades variando de 90, 92 e 94% de umidade. | 52 |
| Figura 16 | Gráfico de desvio padrão para umidade 90%  | 53 |
| Figura 17 | Gráfico de desvio padrão para umidade 92%  | 54 |
| Figura 18 | Gráfico de desvio padrão para umidade 94%  | 54 |
| Figura 19 | Gráfico de teste de reproducibilidade  | 55 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|             |   |
|-------------|---|
| GIS         | <i>Geographic Information System</i> – Sistema de Informação Geográfica |
| RFID        | <i>Radio frequency Identification</i> – Identificação Radio Frequência  |
| PCB         | <i>Printed Circuit Board</i> – Circuito Impresso em Placa               |
| ADC         | <i>Analogic Digital Converter</i> – Conversor analógico digital         |
| Circuito RC | Circuito Resistor Capacitor   |
| E           | Campo Elétrico  |
| R           | Resistor  |
| C           | Capacitância  |
| $\Delta C$  | Variação de Capacitância  |
| $V_{dd}$    | Variação de Tensão entre placas   |
| $V_{th}$    | Limite de Tensão superior   |
| $V_{tl}$    | Limite de Tensão inferior   |
| F           | Unidade de Capacitância - Faraday                                       |
| Q           | Unidade de carga elétrica - Coulomb                                     |
| p           | Pico – $10^{-12}$   |
| k           | Kilo – $10^3$   |
| M           | Mega – $10^6$   |
| n           | Nano – $10^{-9}$  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\mu$  Micro
- $\Omega$  Ohm - resistência
- $\phi$  Fluxo de Campo Elétrico
- $\mathcal{E}_0$  Permissividade no vácuo

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO                                 | 13 |
| 1.1 - OBJETIVO  | 15 |
| CAPÍTULO 2 - UMIDADE                                    | 16 |
| CAPÍTULO 3 – SENSORES                                   | 19 |
| 3.1 – DESENVOLVIMENTOS DE SUBSTRATOS E FILMES           | 19 |
| 3.2 - SENSORES RESISTIVOS DE UMIDADE                    | 24 |
| 3.3 – SENSORES RESISTIVOS DE BASE POLIMÉRICA            | 25 |
| 3.4 – SENSORES CAPACITIVOS                              | 29 |
| 3.5 - SENSORES CAPACITIVOS – ARRANJOS CONSTRUTIVOS      | 34 |
| CAPÍTULO 4 – INTERFACE DIRETA SENSOR / MICROCONTROLADOR | 36 |
| CAPÍTULO 5 – CIRCUITO DE PROCESSAMENTO DE SINAL         | 43 |
| 5.1 - CIRCUITOS DE INTERFACE                            | 44 |
| 5.2 – IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO                         | 45 |
| CAPÍTULO 6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS                   | 51 |
| 6.1 – LEITURAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE UMIDADE         | 51 |
| 6.2 – TESTES DE REPETIBILIDADE                          | 52 |
| 6.3 – TESTES DE REPRODUCIBILIDADE                       | 54 |
| CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES                                 | 56 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS                              | 57 |

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Em 1780 começava no mundo uma transformação que revolucionaria as técnicas de fabricação de máquinas e equipamentos substituindo o calor gerado pela queima de madeira por calor de caldeiras à vapor aquecidas com a queima de carvão mineral. Na literatura a Revolução Industrial durou até cerca de 1840, contudo a evolução dos processos e dos materiais vem acontecendo até a atualidade. A qualidade dos processos evoluiu significativamente e as descobertas em 1880 dos motores elétricos e do processo de geração de energia elétrica deram novo impulso para a industrialização, juntamente com a descoberta dos motores a combustão interna e o início da indústria automobilística no mundo.

Os processos evoluíram e começaram a ser automatizados de maneira a aumentar a produtividade e diminuir as variações de processo. Estas automatizações eram puramente mecânicas com a inserção de copiadores mecânicos ou pantográficos, limitadores de curso e uso de seguidores excêntricos (*comes*) para avanços e recuos de ferramentas.

O outro marco por volta de 1900 foi a descoberta do elétron por Joseph Thomson, além dos estudos de armazenamento de energia em pilhas por Alessandro Volta e da descoberta da geração de corrente através de ímãs passando próximo a bobinas de fios. Estas descobertas possibilitaram o chaveamento elétrico de motores e resistores, permitindo certas automações baseadas em repetições cíclicas e a sinalização das mesmas para os operadores.

A eletrônica digital teve seus primeiros passos por volta da década de 1930 usando circuitos com válvulas. A partir daí o que se viu foi uma contínua evolução buscando a otimização de tamanho e aumento de capacidade até os dias de hoje.

A eletrônica passou a permear os desenvolvimentos dos produtos e dos processos de manufatura de maneira a automatizá-los melhorando a repetibilidade e contribuindo para a diminuição da variação de processo, seja pela mão de obra com a automatização, seja pela melhoria dos controles.

Enquanto as automações de operações eram muito dependentes da mão de obra humana. Os relés eram acionados por roletes e chaves de fim de curso e algumas chaves possuíam

controles de tempo. Com o surgimento dos microcontroladores e dos microprocessadores, a automação de operações de máquinas e equipamentos passou a incorporar controladores de processos com movimentações através de atuadores. Um ótimo exemplo de automação de uma série de passos é a usinagem com comandos numéricos como tornos e fresadoras capazes de realizar com perfeição peças complexas.

Se o seqüenciamento de várias operações e o sincronismo destas cabe ao processador, aos sensores cabe a missão de medir grandezas físicas, para entregar a variação destas grandezas ao processador de maneira que o mesmo possa interpretá-las e comandar o processo de controle na automação. O processador normalmente processa variações de corrente e tensão elétrica, e através destas consegue interpretar as grandezas. Essas grandezas incluem, entre outras, medidas de deslocamento, força, temperatura, vazão e pressão.

Há uma grande variedade de tipos de sensores, bem como o campo para suas aplicações é enorme. As possibilidades de utilizações de um sensor vão de instrumentações para experimentos, sistemas automatizados, Sistemas de Informação Geográfica (GIS), climática e sismológica, até o monitoramento de ambientes na agricultura e na engenharia civil. Tomando por exemplo o embarque da eletrônica de controle em motores de combustão interna, avanço tecnológico necessário para restringir os níveis de emissões de poluentes: a base da introdução da lógica de um controlador autônomo eletrônico para o controle do *timing* de injeção e da quantidade de combustível injetada por ciclo foi a introdução de monitoramento através de sensores para informar vazões, pressões e temperaturas dos fluidos do motor, bem como rotações dos eixos de comando e virabrequim para que o controlador pudesse fazer o processamento, os cálculos e então determinar quando e quanto combustível injetar para o correto funcionamento do motor.

Algumas aplicações no uso de sensores:

- Utilização de termopar para controle de temperatura de fornos;
- Utilização de dispositivos mecânicos para detecção de fim de curso;
- Sensores fotoelétricos para detecção de presença de produtos e controle de produção;
- Dispositivo elétrico (indutivo) para detecção de corrente e conseqüentemente detecção de motor ou componentes ligados;
- Sensor de visão para detecção de imperfeições em produtos;

- Micrômetro laser para medição de diâmetros;
- Sensor ultrassônico para medição de níveis de silos e tanques;
- Identificação por rádio frequência (RFID) para leitura de etiquetas e rastreabilidade de produção.

## 1.1 – OBJETIVO

O escopo deste trabalho é desenvolver um *smart sensor* do tipo PCB - *Printed Circuit Board* de baixo custo para ser usado em medições de umidade em polpas de papel dissertando desde a sua construção até a construção do circuito de interface e comunicação via *bluetooth* utilizando um celular como receptor e ao final demonstrando os resultados da aplicação com a repetibilidade e a reprodutibilidade do conjunto após algumas séries de medições.

Para tanto nos próximos capítulos deste trabalho serão caracterizados os sensores, o princípio de funcionamento de alguns sensores, as diferenças de funcionamento entre sensores resistivos e capacitivos, os tipos de sensores produzidos e os diferentes materiais e coberturas utilizados nos sensores pra modificar suas propriedades e melhorar suas acurácia e histerese durante o trabalho de medição.

## CAPÍTULO 2 - UMIDADE

Muitos autores têm apresentado trabalhos sobre aplicações de meios para medição de umidade em diversas situações e sua importância para diferentes setores da produção. Como exemplos de setores que dependem da evolução destas tecnologias de medição:

- Confinamento de safras de grãos;
- A integridade de matérias primas higroscópicas tais como polpa de papel de gráficas em ambientes com umidade controlada;
- A umidade dos solos para aperfeiçoar a irrigação;
- Construção civil com a medição de umidade em infra-estruturas que possam apresentar corrosão;
- Análise de corrosão em terrenos com erosão.

A medição dos níveis de umidade tornou-se imperativa para garantir a qualidade dos diferentes processos e conseqüentemente a integridade de estoques destes diferentes materiais. Muito se tem trabalhado na direção de encontrarem-se meios de mensurar mais eficazes, menos custosos e de tamanho reduzido, de maneira a facilitar e reduzir custos os processos de manufatura.

Utilizando os mesmos princípios de monitoramento da umidade, existem algumas outras aplicações bem específicas relacionadas à área da saúde, como por exemplo sistemas de monitoramento remoto, muito importantes para a evolução de tratamentos de saúde sem a presença obrigatória de pacientes no hospital.

A umidade é estudada de duas formas distintas: umidade absoluta e umidade relativa. Umidade absoluta é a quantidade exata em massa de vapor de água medida em um determinado volume de ar.

Já a umidade relativa é a razão entre a massa de ar medida em um determinado volume de ar, também chamada de pressão parcial e a máxima massa de vapor suportável por este volume de ar a uma determinada temperatura a qual chamamos de ponto de saturação. Como



seu nome diz, é uma relação entre umidades e, assim sendo, é um adimensional (normalmente expressa em porcentagem).

Quando a umidade do ar está baixa pode-se sentir pela na pele, olhos, nariz e gargantas secos, cabelos secos e falta de disposição, além do ambiente seco predispor à formação de focos de incêndios em matas secas. Geralmente provocados por massas de ar quentes e secas, tal situação pode causar, além dos desconfortos citados, danos à saúde. Por este motivo, é interessante notar algumas informações sobre a baixa umidade relativa do ar.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde, a umidade do ar ideal compreende a faixa entre 50 e 80 %. Entretanto, em algumas épocas do ano, como no inverno, ela tende a cair, inclusive, abaixo de 30 %. No Brasil as regiões Centro-Oeste e Sudeste são, geralmente, as mais prejudicadas com a queda da umidade relativa do ar.

De acordo com Farahani [1], os estudos das principais aplicações que demandam sensores para umidade são aqueles que tratam de umidade absoluta e umidade relativa.

Umidade absoluta é a razão entre a massa de vapor contida em um determinado volume de ar. Existem na literatura dois pontos importantes sobre umidade absoluta a ressaltar:

- *Dew point - ponto de condensação* – Temperatura na qual o vapor de certa quantidade de ar torna-se saturado;

- *Frost Point - ponto de congelamento* - Temperatura abaixo de zero grau na qual a água condensará como uma faixa de gelo em qualquer superfície a que for exposta.

Ambas as temperaturas acima variam de acordo com a umidade relativa.

A umidade absoluta, é normalmente utilizada para medições de monitoramento e consideradas medições primárias. Os principais sensores para medição de umidade absoluta disponíveis no mercado são os sensores de umidade sólidos e os sensores do tipo *chilled mirror*.

Basicamente o primeiro trabalha com um campo magnético de alta frequência e o ar é o elemento dielétrico. Quando outro material ocupa o lugar o efeito do campo magnético é alterado e então é possível detectar a mudança. Já no processo do “espelho refrigerado”, o espelho é mantido à temperatura na qual a taxa de condensação de orvalho é exatamente igual

à taxa de evaporação da camada de orvalho. Neste estado, a massa da camada de orvalho não está aumentando nem diminuindo, e o depósito está em equilíbrio dinâmico com a pressão de vapor de água da amostra de gás circundante, definindo assim a temperatura do ponto de condensação da amostra. Nestas condições, a temperatura na superfície de condensação metálica representa a temperatura de saturação para o vapor de água no gás em estudo.

A Umidade relativa é a mais comumente utilizada e largamente empregada em ambientes fechados e relacionadas a conforto humano, sendo por este motivo considerada sua medição secundária. São de baixo custo pelo largo uso e pela simplicidade de fabricação. A grande maioria dos sensores utilizados para medição de umidade relativa era agrupada de acordo com o tipo de material sensível utilizado em sua composição e ainda com seu princípio de funcionamento.

Logo a medição da umidade é uma grandeza complexa cuja medição depende da interação do material sensível do sensor com o ambiente a ser medido e da capacidade de retorno deste material sensível ao estado original uma vez cessada a exposição ao ambiente úmido, capacidade esta chamada de histerese e que é muito importante na seleção de materiais para este tipo de sensor. Este assunto será abordado no Capítulo 3 – Sensores.

## CAPÍTULO 3 - SENSORES

Existem materiais cujas propriedades físicas variam sensivelmente face à variações de grandezas escalares tais como temperaturas, extensão / compressão mecânica e umidade.

Com relação à temperatura, verifica-se que nos metais, de uma forma geral, a resistividade elétrica aumenta com a temperatura, enquanto que nos semicondutores, a resistividade diminui com o aumento da temperatura. Desta forma, se este material for utilizado como um resistor em um circuito simples fonte - resistor, sua resistência irá variar conforme a temperatura a que for exposto e, desta forma, a corrente de retorno variará proporcionalmente, para uma tensão constante. Esta variação de corrente pode ser percebida e relacionada a mudança de temperatura para o processador ou controlador.

Assim como a temperatura, outras grandezas se comportam da mesma maneira, tais como tração e compressão. Entretanto, a umidade é uma grandeza que exige um processo diferenciado.

### 3.1 – DESENVOLVIMENTO DE SUBSTRATOS E FILMES

Aprofundando um pouco na história sobre a evolução dos sensores e sua classificação, a primeira ocorreu em 1980 de acordo com Yamazoe e Shimizu [2] e contemplava três diferentes grupos: eletrólitos, cerâmica porosa e polímeros orgânicos.

De acordo com a classificação de Traversa [3] a predominância dos sensores fabricados era de cerâmica porosa e Filmes de polímeros orgânicos.

Chen e Lu [4] definiram outra forma de classificar os sensores e os dividiram em três classes principais: sensores cerâmicos, semicondutores e sensores de polímeros orgânicos.

Atualmente existem muitos fabricantes de sensores de umidade, sendo que tanto os que estão atualmente sendo comercializados quanto os que estão em desenvolvimento continuam sendo predominantemente os sensores de umidade relativa, que foram novamente

reorganizados em três classes: semicondutores tipo cerâmicos, sensores com base de polímeros orgânicos e uma nova classe para os sensores híbridos orgânicos / inorgânicos com base cerâmica ou polimérica.

De acordo com os números divulgados pelo setor demonstram que muito mais de 80 % dos sensores encontrados nestes três tipos são baseados nas propriedades eletrolíticas e físicas do “material sensível” base do sensor, em virtude da umidade interna dos eletrólitos.

Sensores de umidade cerâmicos inorgânicos podem ser ainda subdivididos pela sua composição, seja por nano condutores, nano fibras, nano conexões ou heterojunções p-n.

A cerâmica, por definição, é uma combinação de materiais metálicos e não metálicos, que formam carbetos, nitretos e óxidos. Geralmente, a ligação predominante é iônica e são materiais resistentes à altas temperaturas e ambientes severos. Como exemplos de óxidos simples tem-se a Alumina ( $Al_2O_3$ ), a Berília (óxido de berilo), a Magnésia (óxido de Mg), a Zircônia (óxido de zircônio), a Tória (óxido de tório) e a Sílica ( $SiO_2$ ). Um exemplo de óxido composto é a mistura de alumina, magnésia e sílica.

Com relação as propriedades intrínsecas do material sensível estes sensores cerâmicos podem ainda ser designados pela utilização de materiais semicondutores ou compósitos dielétricos.

Já os sensores poliméricos têm em sua base de materiais sensíveis, polímeros semicondutores ou dielétricos. Da mesma forma que exposto para os materiais cerâmicos, a umidade ofertada à superfície do material faz com que haja mudança na condutividade, portanto, variação esta que demonstra a variação indireta e proporcional de umidade.

Existe uma grande variedade de polímeros disponíveis, que são gerados a partir da junção de monômeros e formam filmes quando evaporados seus solventes, apresentam elevada viscosidade e comportamento visco-elástico. Na maioria são materiais dielétricos, tais como os plásticos, contudo alguns são condutores de eletricidade, como a polianilina.

Com relação a seu comportamento higroscópico, é importante ressaltar que alguns polímeros são extremamente sensíveis à umidade, como, por exemplo, os poliésteres enquanto outros (como a poliamida) têm níveis de absorção elevados. Os polímeros podem ser ainda

baseados em polieletrólitos que são polímeros com alguns grupos ionizáveis em sua cadeia molecular.

Em todos os casos a base de trabalho destes tipos de sensores é a mudança das propriedades físicas e elétricas dos seus *materiais sensíveis* face à exposição a diferentes níveis de umidade atmosférica, ambiente no qual o sensor está inserido e, com isto, permitir uma medição de umidade devido a quantidade de vapor de água absorvido ou liberado. Por isto também são chamados de sensores higrométricos.

Estão também entre os fatores importantes, a presença de porosidade intergranular ou intragranular e a distribuição dos tamanhos dos poros.

A medição de umidade por um sensor tipo higrométrico se dá pela variação da impedância ou capacitância em função da mudança de algumas propriedades físicas de materiais orgânicos ou não orgânicos. A base da sensibilidade à umidade é a absorção ou liberação física ou química de moléculas de água.

Dunmore [5] em 1937 desenvolveu um sensor de umidade eletrolítico cuja base era de Cloreto de Lítio que acabou por se tornar o primeiro e único sensor de umidade elétrico para os trinta anos seguintes. O cloreto de lítio foi bastante utilizado em balões de sonda meteorológicos e aplicações médicas. A confecção do material sensível se dá pela imersão de um material poroso de suporte em um acetato de polivinil hidrolisado parcialmente sensível à umidade, o qual é impregnado com cloreto de lítio e uma diferença de potencial foi aplicada entre os eletrólitos de forma a formar a célula eletrolítica. O princípio de funcionamento é o da absorção de umidade da atmosfera pela mídia porosa, a condutividade iônica da célula muda e a quantidade de umidade detectada.

Este modelo de sensor tem algumas restrições, como baixo tempo de recuperação e falta de capacidade de trabalhar em ambientes muito úmidos ou próximos de vapores de solventes. Por conta destas restrições outros materiais começaram a ser testados para suprir a estes requisitos.

Criou-se então a denominação “sensores de umidade de impedância sensível”, categoria esta que engloba as classes anteriores e se subdivide em tipo de condução iônica e eletrônica (transportadores de carga). Esta classificação se dá pelo mecanismo de transporte elétrico.

Sensores baseados em eletrólitos são tratados à parte por serem unicamente de mecanismo de transporte iônico.

A impedância sensível pode ser subdividida em impedância iônica, impedância eletrônica ou capacitiva, as quais serão detalhadas nas seções seguintes..

Os sensores de umidade de polímeros orgânicos também podem ser dos tipos resistivo ou capacitivo, sendo que o mecanismo de sensibilidade do primeiro se dá pela presença dos polieletrólitos respondendo à variação de vapor de água com a mudança de resistividade, enquanto que o capacitivo responde a variação de vapor com a variação da constante dielétrica do polímero e, com isso, com a mudança da capacitância.

Os sensores de umidade cerâmicos baseados em óxidos metálicos têm demonstrado superiores resultados quando comparados aos sensores de filmes de polímeros, no que tange resistência mecânica, capacidade térmica, resistência à ataques químicos. Tal superioridade indica que estes materiais são promissores para o futuro desta aplicação de sensores.

Estes sensores, da mesma forma que os anteriormente descritos de polímeros, também tem seu princípio de funcionamento definidos por variação da variação de impedância ou capacitância, por isto são classificados como tipos sensores por variação de capacitância e sensores por variação de impedância, sendo este último subdividido em condução iônica e condução eletrônica. Ambos indicam o valor de umidade em função da variação da condutividade da material sensível face aos diferentes níveis de umidade absorvida.

Com relação ao material base destes sensores, a cerâmica de base óxido metálica é elaborada com processos especiais para obtenção de corpos porosos. A vantagem da absorção pela superfície porosa esponjiforme em relação a condensação se dá pela facilidade com que as moléculas de vapor de água podem transitar pela superfície porosa enquanto que a condensação capilar ocorre nas estruturas porosas capilares formadas na distribuição granular na superfície do material durante a retirada dos poros.

Quanto ao princípio de funcionamento dos sensores cerâmicos, é importante ressaltar as diferentes formas de condução dos prótons na superfície exposta à umidade. O material sensível destes sensores apresenta características especiais tais como: os grãos, superfície intergranular

e a microestrutura porosa controlada que os tornam susceptíveis à aplicação como sensores eletroquímicos.

A condução de prótons neste caso resumidamente pode ocorrer por processo de absorção química, a absorção física e ainda por condensação capilar.

A grande maioria dos sensores de umidade disponíveis são construídos a partir de corpo cerâmico de estrutura sinterizada porosa. A absorção de água ocorre na superfície da cerâmica e altera a propriedade de condução elétrica que abrange a resistência, a capacitância ou ainda a condução eletrolítica, obviamente dependendo do tipo de sensor. Nos elementos sensíveis do tipo iônicos a variação de umidade é diretamente proporcional a variação da constante dielétrica.

Na absorção química o mecanismo de condução é basicamente o “Mecanismo de Grotthuss”, desenvolvido desde 1806 pelo cientista que deu nome ao ciclo Theodor Von Grotthuss. Neste mecanismo os prótons de hidrogênio (cargas positivas) migram de uma molécula de água para a outra. A este processo dá-se o nome de *Difusão dos íons de Hidrogênio*. Isto ocorre graças a característica da água de ser anfiprótica, ou seja, de receber e ceder elétrons tal como uma capacidade de auto ionização.

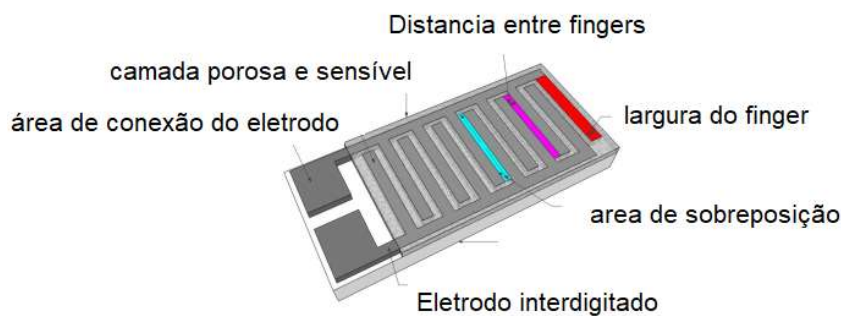
Do mesmo modo tem-se ainda a possibilidade de difusão das hidroxilas, que podem se mover de forma similar ao mecanismo de Grotthuss ou mobilidade da hidroxila (OH<sup>-</sup>).

O funcionamento é relativamente simples. Primeiramente, entendendo que a água tem característica anfiprótica, ou seja, a molécula oferece uma facilidade em se dissociar liberando íons positivos de Hidrogênio. Estes íons necessitam de uma conexão com uma hidroxila que tem carga negativa. A medida que as moléculas de vapor de água se ancoram na superfície começa a haver um aumento da condutividade elétrica que faz com que a condutividade do material sensível mude e, desta forma, possa ser feita uma comparação entre a variação de condutividade com o nível de umidade.

### 3.2 - SENSORES RESISTIVOS DE UMIDADE

A primeira grande diferença deste tipo de sensor está na utilização de metais preciosos nos eletrodos que são montados sobre substratos tais como placas de vidro ou materiais cerâmicos. O eletrodo pode ser literalmente “impresso” através de técnicas de impressão de materiais ou depositados em filmes finos de polímeros. Os eletrodos por sua vez são desenhados da forma interdigitados conforme ilustrado na figura 3 e depois cobertos com um filme sensível à umidade de maneira a que o filme toque igualmente ambos os eletrodos. O conjunto pode então ser revestido por um material condutor podendo ser um sal e um ácido ou até um material cerâmico dopado. Seu princípio de funcionamento é o de alterar a impedância quando energizando os eletrodos e traduzir a variação de impedância em mudança de umidade. Esta analogia normalmente ocorre de maneira inversa exponencial, variando a resistência de  $1\text{ k}\Omega$  a  $100\text{ M}\Omega$ . A mudança de impedância ocorre da mesma forma que os demais apresentados anteriormente, ou seja, a superfície da película recebe as moléculas de valor de água e a altera o fluxo do campo gerado entre os eletrodos, neste caso modificando a impedância.

FIG 1: Esquema do sensor interdigitado e seus principais componentes

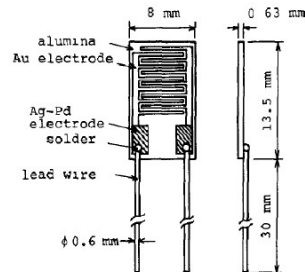


.FONTE: FARAHANI, HAMID - *SENSORS*, 2014

Houve um sensor resistivo de filme fino de alta acurácia que foi desenvolvido pela *Nakaasa Instrument Co Ltd* cujos eletrodos eram depositados em um substrato de alumina. Foi chamado de “Hument” como apresentado na figura 4 e suas deficiências eram os longos tempos de resposta e grandes dimensões.



FIG 2: Esquema do sensor “Hument” e suas partes.



FONTE: FARAHANI, HAMID - *SENSORS*, 2014

### 3.3 – SENSORES RESISTIVOS DE BASE POLIMÉRICA

Dentro desta categoria de sensores, o sensor de base polimérica tem sobrevivido há muitas décadas apesar de não atenderem bem às necessidades demandadas (assim como os sensores de base cerâmica com óxidos metálicos). São predominantemente fabricados com filmes finos de polímeros porosos. O princípio de funcionamento permanece o mesmo já esclarecido anteriormente e a relação entre a variação e a leitura de umidade depende características do polímero. Polímeros eletrólitos, como anteriormente exposto, são grupos de materiais tais como monômeros iônicos, que mostram condutividade iônica quando submetidos atmosfera úmida. De acordo com Chen e Lu [4], eles podem ser classificados em três diferentes categorias: sais de amônia, sais de sulfonato e sais de fosfônio. Entretanto, quando submetidos a níveis elevados de umidade, também apresentam deficiência quanto à resistência, além de apresentarem uma grande histerese. Alguns polieletrólitos são hidrófilos e podem ser solúveis se submetidos a altos níveis de umidade. Várias experiências foram realizadas utilizando-se de diferentes tipos de polímeros, na tentativa de encontrar compostos e dopagens capazes de melhorar a eficiência em altas concentrações de umidade, incluindo os polímeros conjugados orgânicos, com bom desempenho e capazes de atingir 99% de medição de umidade, conseguindo medir níveis bem baixos de umidade.

Os sensores de base cerâmica, como já exposto, são melhores em suas propriedades mas apresentam distorções de medição por conta da variação de suas estruturas intergranulares e

intragranulares, já que a permeabilidade do material é que faz a diferença quando exposto à umidade. Para resolver estas dificuldades, novos materiais foram propostos. Experiências com nanomateriais foram realizadas com diferentes tamanhos de partículas, hibridização dos materiais e dopagem com novos átomos foram avaliadas as propriedades influentes dos materiais com diferentes famílias, diferentes vacâncias e diferentes faixas de valências.

Sensores de umidade com cerâmica porosa ou baseado em nanotubos de cerâmica são obtidos usando técnicas como: filmes grossos, onde pastas condutoras e não-condutoras são depositadas sobre substratos isolantes; filmes finos à base de óxidos metálicos semicondutores, que são depositados em processos com plasma ou CVD; filmes formados a partir de um processo de anodização, normalmente usados em substratos de  $Al_2O_3$ .

A avaliação de sensibilidade por parte destes materiais ocorre tanto em baixos níveis de umidade como em altos níveis de umidade, desta maneira a absorção química com a retenção de hidroxilas ou íons de hidrogênio pela superfície (aumento da condutividade iônica e diminuição da resistividade). Submetido a altos níveis de umidade, quem determina a mudança de condução são os materiais, pois materiais permitem a absorção de água e conseqüente mudança de condutividade eletrônica.

Yamamoto [6] propôs algumas teorias de condução na superfície dos sensores usando Óxido de Titânio e Estanho, e os resultados foram a melhoria da sensibilidade devido a melhora quanto a absorção por capilaridade e com isto eliminou a necessidade de aquecimento auxiliar. Posteriormente Yeh et al [7] fez um sensor puro de titânio e encontrou uma forma de trabalhar com o sensor à temperatura ambiente. Além disto, o sensor se recuperou da leitura de umidade à temperatura ambiente sem qualquer adsorção térmica.

Foram estudados também os sensores de base ferrita de magnésio, e em alguns casos, com 20 a 60 % de substituição deste primeiro material por Lítio. Trata-se de um material semicondutor com alta resistividade elétrica e baixas perdas magnéticas e elétricas, muito utilizado para sensores e dispositivos eletrônicos, núcleos de transformadores e outras aplicações. Como resultado da substituição parcial com elementos de Lítio, houve melhoria na porosidade intergranular e conseqüente melhora da sensibilidade tanto na absorção quanto na operação inversa a dessorção.

Os sensores de base óxido metálicos semicondutores foram, por sua vez, subdivididos em sensores tipo condução eletrônica, e foram principalmente estudados em temperaturas acima de 100 °C. Neste caso não há absorção física, apenas a absorção química, portanto seu mecanismo de condutividade é baseado apenas neste modo de absorção.

O termo *Perovskite* refere-se a cerâmica baseada em Titanato de Cálcio. Filmes e material puro foram utilizados para buscar novos resultados. Seu princípio de funcionamento inicia-se pela doação de íons de água, ou seja, condução eletrônica. Foi descoberto que para a cerâmica baseada em Cério, a mobilidade dos prótons é maior que a dos íons de oxigênio com a temperatura aos 700°C. Estes passaram a se chamar sensores de umidade potenciométricos. O uso da cerâmica com Bário demonstrou boa estabilidade com baixas temperaturas e baixa umidade.

Viviani [8] estudou o comportamento da sensibilidade à umidade dos Óxidos de Molibdemium Bário. A síntese foi feita com temperaturas entre 1250 e 1700°C e igualmente a conclusão foi a de que a condução se dá pela superfície protônica.

Imran [9] estudou os efeitos de inserir Titanato de Cádmio. Foi usada uma técnica de fotolitografia utilizando-se ainda de eletrodos de alumínio. A diferença e consequente vantagem obtida foi a sensibilidade de 40 a 90 % de umidade e a histerese que diminuiu bastante. Pode-se concluir que, ao aplicar materiais alcalinos ferrosos tais como Berílio, Magnésio, Cádmio, estanho, Bário e Radônio, estes atuam no sentido de melhorar a condução iônica face a característica higroscópica destes.

Sensores de filmes espessos são bastante populares. Uma aplicação onde utiliza bastante este tipo de sensores é a miniaturização e a utilização em circuitos híbridos. Golonka [10] foi um estudioso que utilizou de bases cerâmicas e estudou efeito de dopantes para verificar os efeitos na absorção de umidade mudando as características de resistência. Qu [11] e [12] buscou efeitos com a dopagem por Cloreto de Lítio, citado anteriormente, o Lítio influi negativamente na leitura a baixas quantidades de umidade pois diminui a resistência neste caso.

Arshaka [13] utilizou-se de uma dupla camada de Manganês - Zinco em base de Ferrita. e alcançou níveis elevados de sensibilidade da ordem de menos de 2% de umidade relativa.

Utilizando estrutura de eletrodos interdigitada e filme espesso de Titanato de Bário, Wargiran [14] alcançou a linearidade na resposta do sensor e baixa histerese com tempos de dessorção de 15s.

Yuan [15] melhorou a resposta do sensor anteriormente dopado com Cloreto de Lítio, substituindo este por óxido de Zinco, pois a característica de solubilidade do LiCl o tornava degradável a certos níveis de umidade.

Foram estudados Óxidos de Ferro-Manganês e vários também materiais alcalinos foram checados por Yamazoe [2], Katayama [16] e Vijaya [17], e de todas as propostas a melhor sensibilidade foi a de Estrôncio com Zeólito carregado de Cobalto. Finalmente, conclui-se que a adição de catalisadores alcalinos melhora a absorção intergranular e o aumento da superfície porosa.

"Dopar" um sensor significa adicionar uma impureza química (ou um átomo estranho àquela estrutura), alterando a sua condutividade elétrica de forma controlada, de maneira a obter o nível de condutividade desejada.

Muitos trabalhos foram feitos com dopagens de vários materiais, tais como Óxidos de Zinco e Estanho. Entretanto, comparando os resultados de redução de histerese ou tempo de regeneração (dessorção) e faixa de leitura de umidade, pouca ou nenhuma melhoria houve. Estudos de dopagem em cerâmica Perovskite também foram realizados e, segundo Adhyapak [18], o processo de dopagem foi feito a partir da sintetização de nanocristais com ácido esteárico, demonstrando bons resultados e um processo bem mais simples e barato que os métodos de "sol-gel" (método no qual em determinado momento ocorre a mudança de estado de solúvel para gel).

Em um trabalho foram feitas experiências com cerâmica a base de Titanato de Bário e Estanho com dopagem por Cloreto de Magnésio para melhorar a sensibilidade à umidade. Os resultados de faixa de leitura de umidade relativa foram de 5 a 92%, com um decréscimo na resistividade (corrente contínua).

Em síntese pode-se concluir que ao analisar o uso de polímeros ou cerâmicas como base e filmes como elementos de melhoria bem como catalisadores para acelerar respostas, tem-se que, para a Umidade Relativa baixa, o mecanismo de condução eletrônica baseia-se nos

elétrons que o vapor de água cede para a estrutura; no caso das umidade relativas médias, as camadas absorvidas fisicamente (capilaridade) ou quimicamente (movimentação de íons), o campo eletrostático se deve a condução iônica ou eletrônica; e por último, nos casos de umidade relativa elevada, vale a condução iônica entre as moléculas de água.

### 3.4 – SENSORES CAPACITIVOS

O princípio que tem se mostrado mais eficaz para a medição de umidade é o de usar um sensor capacitivo para esta medição. Para entender o sensor capacitivo é necessário entender o princípio de funcionamento do capacitor.

Os primeiros estudos que demonstraram que cargas elétricas geravam forças entre si de atração ou repulsão de acordo com a polaridade foi *Charles Augustim de Coulomb* (1736 – 1806). De acordo com a Lei enunciada de Coulomb, dada uma carga de referência, ao se aproximar uma segunda carga será observado um movimento de atração ou repulsão, que depende dos sinais das cargas em discussão, haja visto que cargas de mesmos sinais se repelem e cargas de sinais opostos se atraem. A força de atração ou repulsão pode ser calculada pela expressão:

$$F = \frac{(k_0 x Q x q)}{d^2} \quad (1)$$

Onde:

**F** = força eletrostática (N)

**k<sub>0</sub>** = constante dielétrica do vácuo (N.m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>)

**Q** = carga elétrica (C)

**q** = carga elétrica de prova (C)

**d** = distância entre as cargas (m)

Em 1835 Carl Friedrich Gauss elaborou um conjunto de quatro equações chamadas “Equações de Maxwell”, dentre as quais a “Lei de Gauss”, que relaciona o fluxo elétrico com o produto do campo elétrico pela área carregada com cargas elétricas:

$$\phi_E = \int_S E x dA \quad (2)$$

Onde:

$\phi_E = \text{Fluxo do Campo elétrico};$

$E = \text{Campo elétrico}$

$A = \text{Área calculada a partir da integral da área infinitesimal } dA$

Por outro lado a carga  $q$  na superfície é proporcional ao produto do fluxo elétrico  $\phi_E$  e da permissividade no vácuo,  $\epsilon_0$ , ficando:

$$\phi_E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (3)$$

Onde:

$\epsilon_0 = \text{Permissividade no vácuo (F / m)}$

$Q_f = \text{carga envolvida na superfície } A$

Substituindo (3) em (2) tem-se:

$$\frac{q}{\epsilon_0} = \int_S E x dA$$

(4)

Com a definição de intensidade do campo elétrico ( $\sigma$ ):

$$\sigma = Q/A$$

(5)

E a relação entre Intensidade e permissividade no vácuo:

$$E = \sigma/\epsilon_0$$

(6)

Substituindo tem-se:

$$E = Q/(Ax\epsilon_0)$$

(7)

E como a tensão aplicada nas placas  $V_{AB}$  relaciona o campo E e a distância d:

$$V_{AB} = E \times d$$

(8)

Onde:

d = distância entre as placas de um capacitor;

Obtém-se:

$$V_{AB} = \frac{(Qxd)}{(Ax\epsilon_0)}$$

(9)

O capacitor é um dispositivo elétrico cuja função é armazenar energia potencial através da formação de um campo elétrico. Chama-se capacitância a esta característica de armazenar cargas elétricas e esta pode ser calculada em função da quantidade de cargas acumuladas em razão da diferença de potencial aplicada:.

$$C = \frac{Q}{V_{AB}}$$

(10)

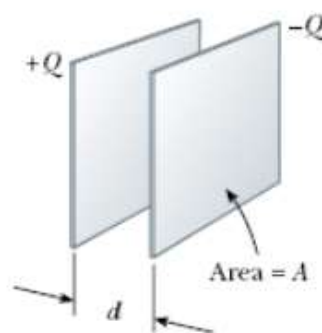
Onde:

Q = carga elétrica em Coulomb

C = capacidade elétrica e

.VAB = Variação de tensão fornecida pela bateria às placas do capacito

FIG 3: Esquema das placas com distância "d" e



FONTE: [www.alicerceedu.com.br](http://www.alicerceedu.com.br)



A capacitância também pode ser calculada a partir da permissividade do meio dielétrico entre as placas de área  $A$  e da distância entre as placas  $d$ :

$$C = \frac{\epsilon_0 \chi A}{d} \quad (11)$$

Portanto, se considerarmos que a permissividade pode ser alterada modificando-se o meio dielétrico, pode-se variar a capacitância e, desta forma, usar esta variação para medir as variações de umidade. A variação de capacitância normalmente fornecerá tempos de carga e descarga diferenciados para o capacitor.

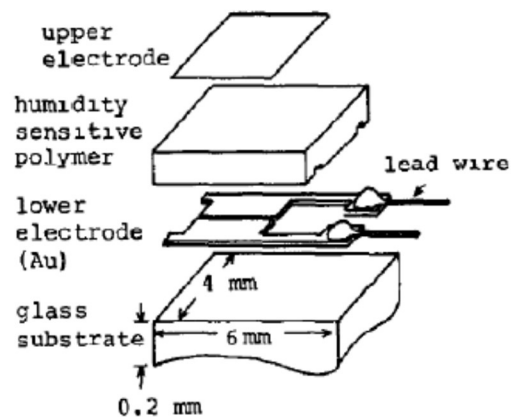
Uma aplicação típica para medição de nível contínuo consiste em uma haste isolada, ou algum eletrodo similar. O sensor é instalado em paralelo a uma parede vertical de um tanque feito de material condutor ou não condutor; no caso do tanque ser condutor é necessário apenas um sensor, enquanto que se o material não for condutor, precisamos de dois eletrodos. O próprio material de enchimento do tanque serve como meio para o campo. A capacitância pode ser lida por uma ponte ou por um circuito que converta capacitância em saída analógica ou digital.

Temos ainda a utilização de sensores capacitivos para se identificar passagem de determinados materiais e como sensor de contagem de peças de determinados materiais.

### 3.5 SENSORES CAPACITIVOS – ARRANJOS CONSTRUTIVOS

Os sensores capacitivos podem ser feitos basicamente a partir da sobreposição de camadas, tal como um sanduíche, ou com seus eletrodos impressos em um substrato dielétrico e recebendo uma cobertura de um filme com propriedades higroscópicas, que vão alterar o campo formado entre elétrons. Na figura 5 tem-se a configuração de um sensor montado conforme a primeira forma descrita:

FIG 4: Esquema do sensor em camadas e suas partes



FONTE: FARAHANI, HAMID - *SENSORS*, 2014

Atualmente estes sensores dominam o mercado (mais de 75% do total). Em ambos os modelos o material sensível à umidade (placa ou filme) determina a mudança do campo dielétrico por conta da capacidade de absorção de vapores de água.

Os sensores capacitivos construídos a partir de polímeros tem sido objeto de vários estudos. Por exemplo, Delapierre [19] estudou a técnica de fraturar o filme através de tensão mecânica, de maneira que as fraturas aumentavam a área de contato e consequentemente a área de absorção. Yeow [20] testou, com sucesso, sensores miniaturizados fabricados com nanotubos de carbono, os quais formam naturalmente estruturas porosas.

Um ponto de retrocesso neste tipo de sensor é sua capacidade de se regenerar após a sua exposição face a um ambiente úmido, pois a umidade retida prejudica a performance de transdução do sensor. Roman [21] propôs um modelo de polímero com agentes reticulados que melhoraram a sensibilidade e reduziram a histerese.

Matsugush [22] fabricou um sensor com base nesta nova poliamida reticulada, com eletrodo inferior de platina e montado em um substrato de vidro. A película posterior foi tratada termicamente para adesão e, por último, um eletrodo de camada de ouro foi formado por evaporação. Este sensor foi testado em diversas situações e provou sua resistência a elementos químicos.

Os sensores capacitivos de base cerâmica também foram desenvolvidos e a principal base era o Óxido de Alumínio. Outras bases foram testadas, mas, em geral, distorções apareciam tanto nas leituras de umidade relativa quanto no tempo de histerese. Li testou e relatou que as cerâmicas de *Perovskite* adicionadas de alcalinos dopantes tornavam mais sensíveis as estruturas à umidade relativa. Contudo, a substituição do Titanato pelo Nióbio requereu uma alta energia de ativação.

Sheng [23] investigou uma estrutura de Fosfato de Bismuto (Silenita cúbica) e encontrou uma capacitância linear, aparentemente o melhor resultado obtido, conseguindo leituras de 1,0 pF à 12,9 pF, referentes a 100 % do campo de variação de umidade.

Da mesma forma que os sensores anteriormente descritos, os mecanismos de absorção físicos por capilaridade, íons por absorção de material poroso são idênticos.

## CAPÍTULO 4 – INTERFACE DIRETA SENSOR / MICROCONTROLADOR

Este capítulo traz importantes informações sobre a interface entre os elementos de processamento e os sensores.

Conforme descrito anteriormente, a base de funcionamento de um sensor é a capacidade que o material que constitui este sensor tem de variar alguma propriedade elétrica face a alguma mudança de uma grandeza escalar como temperatura, pressão, umidade, etc.

Os microcontroladores, assim como os microprocessadores são os componentes eletrônicos que têm a função de receber sinais e comandos de entrada (ou *inputs*) e os processar estes através de códigos de comando para que gerem as saídas (*outputs*). possuem entradas e saídas e podem fazer vários processamentos em intervalos de tempo muito pequenos. Algumas características os diferenciam:

- Microcontroladores são únicos e possuem em sua estrutura: controladores, CPU, temporizadores, memórias e conversores AD, enquanto que os microprocessadores necessitam de circuitos externos para todas estas funções;

- Microcontroladores são mais simples e possuem menor capacidade e velocidade de processamento, além de serem mais baratos, simples e de manutenção mais simples;

- Microprocessadores são circuitos muito complexos, sob forma de circuitos integrados, que podem conter mais de 1 bilhão de transistores que constituem os mais diversos circuitos lógicos: como contadores, registradores, decodificadores, e centenas de outros; tais circuitos lógicos são dispostos de maneira complexa, dando ao microprocessador a capacidade de executar operações lógicas, aritméticas e de controle.

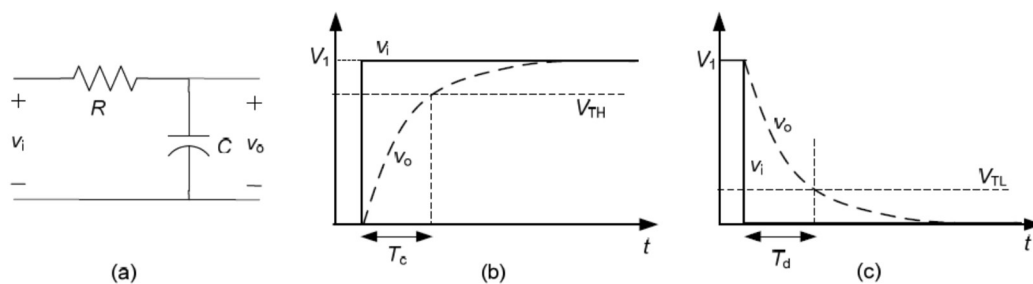
Entretanto para ambos é necessário adequar as entradas e saídas dos sensores às entradas dos microcontroladores. Esta adequação visa a compatibilização do sinal, seja retificando o mesmo, amplificando-o, filtrando-o e, de alguma forma, digitalizando o sinal analógico, sendo que os Conversores Analógico para Digital (ADC's) são elementos comumente utilizados para este tipo de interface.

Estudos recentes evidenciam que sensores e microcontroladores possam interagir sem interface de adaptação, ou seja, o sensor trabalha diretamente com o processador, que passa a

controlar o circuito do sensor e processar diretamente as variações da tensão e/ou corrente deste circuito.

Segundo Reverter [24] são dois os princípios para operação com utilização direta dos sensores conectados diretamente ao microcontrolador: no primeiro princípio a interface é baseada em circuitos Resistores - Capacitores (RC) onde o controlador mede o intervalo de tempo para carregar ou descarregar a capacitância  $C$  de um dado limite de tensão dado através de uma resistência  $R$ . Já o segundo baseia-se no princípio de transferência de carga e o microcontrolador conta quantos ciclos são necessários para carregar um capacitor de referência, dado um limite de tensão de um sensor capacitivo. Neste caso apenas sensores capacitivos podem ser usados, enquanto que usando o primeiro princípio (RC), ambos os sensores (resistivos e capacitivos) podem ser utilizados. O princípio RC é o mais predominantemente utilizado até os dias atuais. Veja os exemplos de circuito RC bem como dos ciclos de carga e descarga na figura 6.

figura 5 - Circuito RC (a); processo de carga (b) e processo de descarga (c).



FONTE: *Journal of Low Power Electronics and Applications* · November 2012

Na figura 6a tem-se a seguinte fórmula para relacionar as tensões e a resistência e a capacitância do circuito RC.

$$V_0(t) = V_1 x [1 - e^{\frac{-1}{RC}}]$$

(12)

Onde:

$V_0$  = tensão de saída em função do tempo;

$V_1$  = Tensão aplicada com o capacitor descarregado =  $V_i$ ;

$RC$  = resistor e capacitor assumido no circuito.

Neste momento o capacitor  $C$  está descarregado e é aplicada uma tensão  $V_i = V_1$ , de maneira que a tensão de saída será  $V_0$  em função do tempo.

Neste caso, o tempo de carga  $T_c$  do capacitor de 0 a um determinado limite  $V_{TH}$  é:

$$T_c = RC \ln\left(\frac{V_1}{V_1 - V_{TH}}\right) \quad (13)$$

e é proporcional a  $C$  e a  $R$ .

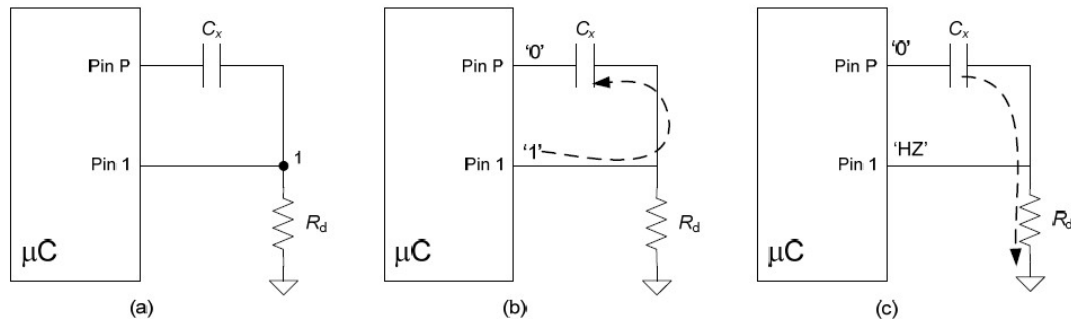
Na descarga do capacitor tem-se que a tensão  $V_0$  diminuindo com o tempo até se igualar a  $V_{TL} = V_i$  (figura 5) da seguinte maneira:

$$V_0(t) = V_1 \times e^{\frac{-t}{RC}} \quad (14)$$

O tempo de descarga então se comportar de acordo com a seguinte fórmula:

$$T_d = RC \ln\left(\frac{V_1}{V_{TL}}\right) \quad (15)$$

Figura 6 - Arranjo RC para medição com sensor capacitivo (a); processo de carga (b) e processo de descarga (c).



FONTE: *Journal of Low Power Electronics and Applications* · November 2012

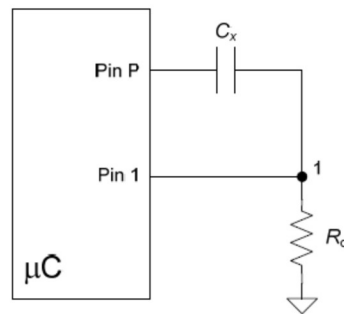
Neste trabalho o foco está nos sensores capacitivos, portanto a análise das interfaces com processadores igualmente ficará restrita aos sensores capacitivos.

O trabalho realizado por Reverter evidencia que duas premissas sobre os componentes são importantes para o uso da interface direta para sensores capacitivos.

Um primeiro lugar é importante o resultado da decisão sobre o compromisso entre velocidade e resolução. No ponto 1, da figura 8, o valor da resistência  $R_d$  ficará muito alto para a obtenção de tempos curtos de carga e, conseqüentemente, susceptível a interferências. Como exemplo, a medição de um sensor capacitivo de 150 pF necessita do uso de um resistor de aproximadamente 1 M $\Omega$ .

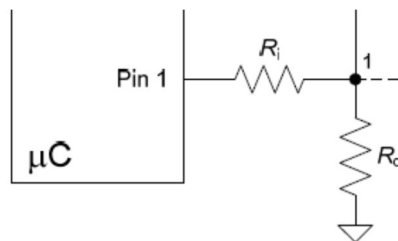
Segundo Reverter o uso da topologia constante da figura 7 é recomendado pois a tensão limite de descarga é mais baixa e menos ruidosa que a tensão limite de carga citada anteriormente.

Figura 7 - Arranjo RC para medição com sensor capacitivo



FONTE: *Journal of Low Power Electronics and Applications* · November 2012

Em segundo lugar, existe a necessidade de inserção de um resistor conforme descrito na figura 9 para melhorar a rejeição à interferência da fonte de tensão. A frequência de corte do filtro passa-baixa é determinada pela resistência  $R_1$  e a capacitância  $C_x$  na fase de carga deve ser a menor possível, aliada a  $R_1$  igualmente baixa em relação a  $R_d$  para permitir o carregamento de  $C_x$ .

figura 8 - Arranjo RC modificado pela adição de  $R_1$ .

FONTE: *Journal of Low Power Electronics and Applications* · November 2012

Dentre os sensores capacitivos destacamos:

- Sensor Capacitivo simples - possui um elemento capacitivo cuja capacitância muda de acordo com umidade, nível de líquido em reservatório e presença de gás. Basicamente a capacitância  $C_0$  é conhecida e usada como base para a comparação com a capacitância  $C_x$  que varia de acordo com o ambiente.



- Sensor Capacitivo com perdas ou *Lossy Capacitive Sensor* - utilizado para medições de umidade, diferenças de concentrações de dois fluidos e como sensor de proximidade.

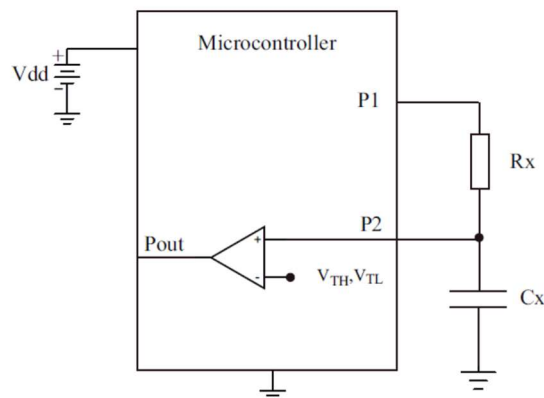
Neste arranjo é introduzida uma condutância em paralelo com o sensor capacitivo de maneira a criar uma perda que auxilia na medição do tempo de descarga.

- Sensor Capacitivo Diferencial - sensores que possuem dois materiais de capacitâncias sensíveis diferentes, e que por compartilhar mesmo eletrodo, reagem de maneira inversa às diferenças de ambiente, ou seja, enquanto um oferta aumento de capacitância face à mudança de capacitância o outro reage de maneira oposta.

- Sensor tipo ponte *Bridge type* - sua construção é frequentemente utilizada para medição de pressão e posições lineares ou angulares.

O modelo escolhido para o trabalho de construção e verificação do sensor escopo deste trabalho é apresentado na figura 10.

Figura 9 - Esquema de interface direta utilizada no experimento.



FONTE: do autor

O circuito é baseado na técnica de medição do intervalo de tempo. Os pulsos gerados por um oscilador de frequência constante são contados e o circuito tem por função medir o

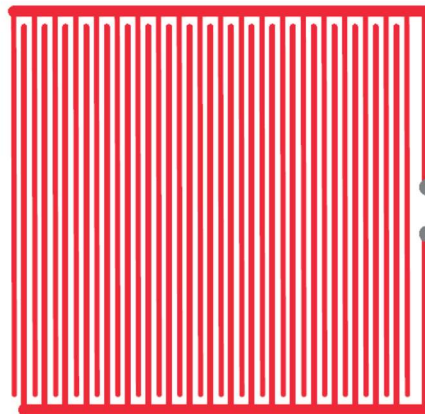
tempo de carga (ou descarga) do capacitor  $C_x$  através do resistor  $R_x$ . Maiores detalhes sobre o experimento serão fornecidos apropriadamente no Capítulo 5.

## CAPÍTULO 5 – CIRCUITO DE PROCESSAMENTO DE SINAL

Dada a importância da medição de umidade em rolos de papéis para jornais e indústrias usuárias de bobinas de papel, foi projetado e construído um sensor capacitivo *smart* do tipo PCB - *Print Circuit Board* - com a finalidade de medir esta umidade. No mesmo circuito foi inserido um circuito de processamento de sinais. Este sensor inteligente é capaz de comunicar com o equipamento de leitura através da tecnologia *bluetooth* . Para manter o circuito de medição de sinais pequeno, foi elaborado um circuito de interface do sensor ao microcontrolador para as leituras de capacitância.

O sensor foi projetado e fabricado com placas de 4 camadas feitas de substrato para circuito impresso tipo FR-4 (de 2,4mm de espessura) com 35  $\mu\text{m}$  de espessura de cobre. Foram construídas placas de 85 x 85mm e as trilhas em formato de *fingers* (eletrodos interdigitados) com comprimento de 75mm, largura de 2mm e espaçamento de 2mm entre as 40 trilhas equidistantes. O *layout* do sensor pode ser visto a partir da figura 11.

Figura 10 - Esquema do sensor capacitivo PCB do experimento



FONTE: do autor

A relação  $L \gg S$  é forçada para assegurar que o comprimento dos *fingers* seja considerado praticamente infinito, se comparado com as suas espessuras.

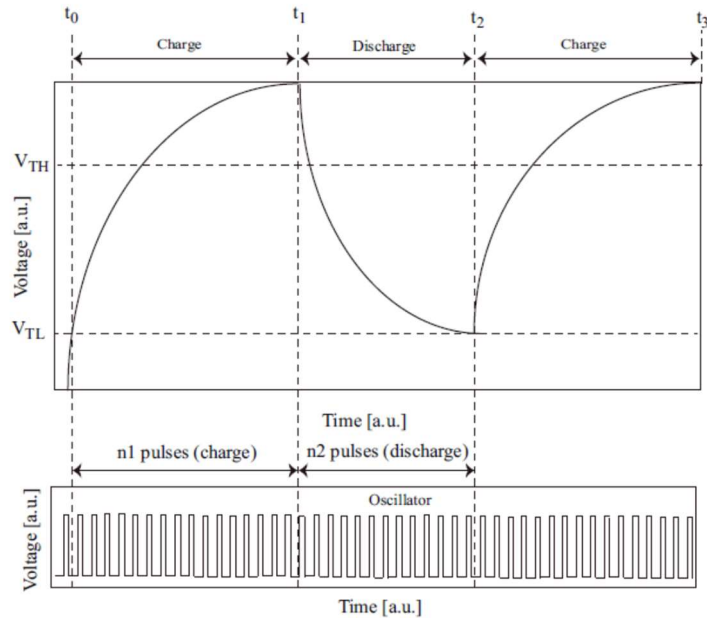
Envolvendo estas placas foi colocada uma película de poliéster (máscara de solda) como película protetiva para evitar curto circuito entre os *fingers* (quando em contato com a água da polpa de papel).

É sabido que para medidas de pequenas capacitâncias a interferência de campos externos influi bastante e a utilização de fios entre sensor e o circuito de processamento de dados capta esta interferência e introduz capacitâncias parasitas. Para minimizar estes efeitos nocivos, a distância entre o circuito de comando e o sensor foi extremamente diminuída, sendo realizada através de uma via entre o *top* e o *bottom* das quatro camadas do PCB.

## 5.1 CIRCUITOS DE INTERFACE

Conforme descrito anteriormente, a interface entre o sensor e o circuito de processamento foi elaborada para atender as condições de projeto de um sensor inteligente. A interface direta simples foi realizada pelo circuito da figura 10. A forma tradicional de utilizar esse circuito é através da contagem de tempo, de maneira que o capacitor  $C_x$  vai ser carregado através do resistor  $R_x$  quando o pino 1 for configurado como 1 irá gerar a tensão  $V_{dd}$  no pino 1 que vai gerar uma corrente que irá passar pelo resistor e alimentar o capacitor. O circuito conta com um oscilador que gera pulsos constantes no tempo para esta tarefa. O número de pulsos durante a contagem é contado de maneira que uma mudança na capacitância altera o número de pulsos que é contada. A mudança da capacitância é resultado de algum parâmetro que a tenha alterado, como a variação da quantidade de água na polpa de papel, por exemplo.

Figura 11 - Esquema carga e descarga do sensor capacitivo  $C_X$  do experimento



FONTE: do autor

Os pulsos gerados por um oscilador de frequência constante são contados e o circuito tem por função medir o tempo de carga (ou descarga) do capacitor  $C_X$  através do resistor  $R_X$ .

As tensões  $V_{TL}$  e  $V_{TH}$  são, respectivamente, as tensões limite inferior e superior para a carga e descarga.

O tempo de carga do capacitor é dado por:

$$t_c = C_X R_X \left[ \ln \left( \frac{V_{dd} - V_{TL}}{V_{dd} - V_{TH}} \right) \right]$$

(16)

Já o tempo de descarga é dado por:

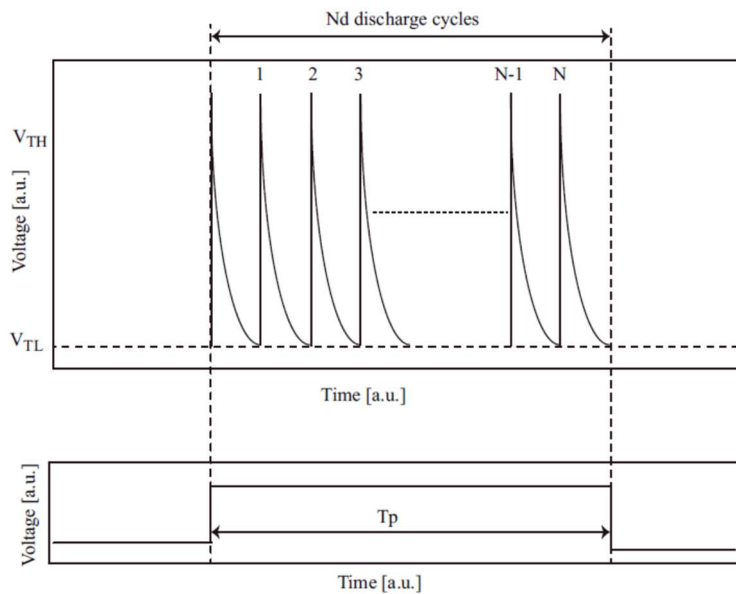
$$t_d = C_X R_X \left[ \ln \left( \frac{V_{TH}}{V_{TL}} \right) \right]$$

(17)

Se o valor de capacitância for muito baixo, os tempos de carga e descarga também serão muito pequenos. De acordo com o experimento, para 0,1 pF de variação, que corresponde a 1% de variação de capacitância, o oscilador necessário terá frequência superior a 50MHz.

No experimento foi desenvolvida uma nova técnica para medir a variação de capacitância. Não foram contados os pulsos gerados pelo oscilador, mas foi utilizado um método de carga do oscilador quase instantâneo, (intervalo menor que 1ns), fixando um tempo de descarga  $T_p$  e contando os ciclos de descarga.

Figura 12 - Esquema de carga instantânea com pulsos de descarga controlados.



FONTE. do autor

O experimento adotou um tempo de contagem de pulsos  $T_p = 1s$ , com este método de carregamento instantâneo e contando as descargas do capacitor foi encontrado uma diferença de cerca de 647 ciclos em função de uma variação de 1pF, que é uma boa diferença e que facilita monitorar variações de capacitâncias e ainda evitar ruídos devido às muitas medições que estão sendo feitas.

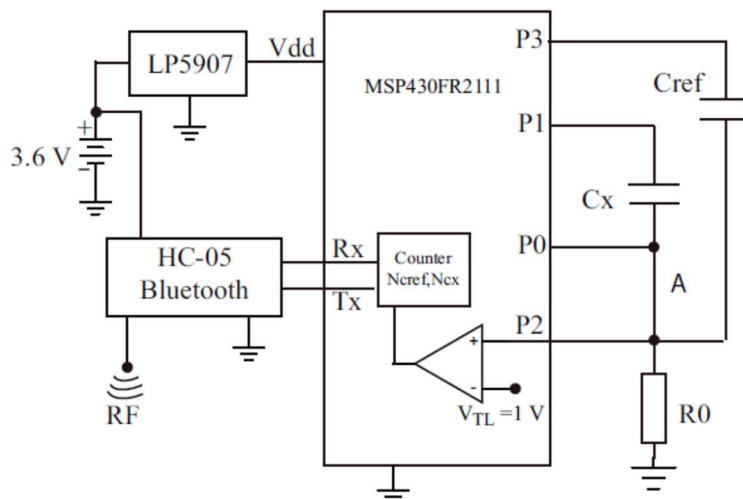
## 5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO CIRCUITO

Foi utilizada uma bateria de 3,6 volts com 1,2 Ah, desta forma atendendo a demanda de baixo consumo do circuito e do *bluetooth*, que é cerca de aproximadamente  $50\mu\text{A}$ .

A temperatura e o ruído são fatores muito importante para a operação do circuito, e para isso foi escolhido um regulador LDO LP5907, de baixo ruído e baixo *drift* de temperatura.

O processador que foi escolhido foi o MSP430FR2111, ficando o circuito como demonstrado na figura 13.

Figura 13 - Diagrama de blocos do circuito do sensor inteligente.



FONTE: do autor

Foi usado um resistor TC muito preciso e baixo  $R_0$  (por exemplo, um resistor de 0,001% e  $\pm 5 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$ ) para eliminar os erros devido a este componente. No entanto existem alguns erros que não podem ser cancelados como:

(a) a variação de temperatura em  $V_{TL}$  (aproximadamente  $1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) definida pela tensão de referência interna  $V_{ref}$ , o microcontrolador;

(b) a impedância de saída diferente de zero dos transistores CMOS introduz uma resistência em série pequena a  $R_0$  durante os ciclos de descarga;

(c) capacitâncias parasitas nos pinos do microcontrolador influenciam o valor da capacitância sendo medida.

Para eliminar esses erros, é utilizado um circuito de autocalibração, em que um circuito *dummy*, com a mesma configuração do circuito usado para medir a capacitância, mede um conhecido capacitor  $C_{ref}$ . O procedimento de medição começa com o circuito de calibração ativado em primeiro lugar e é contado o número de ciclos de descarga com  $C_{ref}$ . Em seguida, o circuito com o capacitor sob a medição  $C_x$  é ativado, o número da medida dos ciclos de descarga é comparado ao capacitor de calibração.

Supondo que os dois capacitores ( $C_{ref}$  e  $C_x$ ) estejam descarregados, a medição começa com o pino de E/S do microcontrolador P3 em “0” lógico, P1 em alta impedância (Hz) e P0 ajustado em “1”. Isso força uma voltagem igual a  $V_{dd}$  no nó entre  $C_{ref}$  e  $R_0$ . Como P3 é deixado em Hz, o capacitor  $C_x$  está flutuando durante esta fase.

Durante o ciclo de carga, o capacitor  $C_{ref}$  é conectado diretamente ao pino do microcontrolador P0 e é carregado até  $V_{dd}$  com um  $dV/dT$  muito rápido, limitado apenas pela corrente de saída do pino do microcontrolador. Como o pino P1, conectado a  $C_x$ , está inicialmente em alta impedância (Hz), toda a corrente que sai do pino do microcontrolador P0 entra em  $C_{ref}$ . Assim, se o limite de corrente de saída do microcontrolador tiver um valor típico de 8 mA, o tempo necessário para carregar um capacitor de 100 pF seria apenas 8 ns e pode ser negligenciado em comparação com a descarga, que é da ordem de dezenas de  $\mu s$ .

Depois que o  $C_{ref}$  estiver totalmente carregado (na próxima instrução do microcontrolador, que ocorre pelo menos 125 ns depois que P0 é definido como alto), P0 é definido como alta impedância e o capacitor  $C_{ref}$  é descarregado através de  $R_0$ .

O comparador detecta quando a tensão em  $C_{ref}$  atinge  $V_{TL}$  e esse tempo de descarga é dado por:

$$T_{d_{ref}} = R_0 * C_{ref} * \ln\left(\frac{V_{TL}}{V_{dd}}\right)$$

(18)



A seguir o mesmo procedimento é feito com o capacitor  $C_X$ , e o tempo de descarga é dado por:

$$T_{d_{C_X}} = R_0 * C_X * \ln\left(\frac{V_{TL}}{V_{dd}}\right) \quad (19)$$

A razão entre os tempos de descarga do capacitor de referência e do capacitor  $C_X$  fica:

$$\frac{t_{dREF}}{t_{dC_X}} = \frac{C_{REF}}{C_X} \quad (20)$$

Logo, pode-se calcular o valor do capacitor  $C_X$  como sendo:

$$C_X = C_{REF} \left( \frac{t_{dC_X}}{t_{dREF}} \right) \quad (21)$$

O número de pulsos contados nos dois capacitores é, respectivamente,

$$N(C_X) = \frac{T_P}{t_{dC_X}} \quad (22)$$

$$N(C_{REF}) = \frac{T_P}{t_{dC_{REF}}}$$

(23)

Portanto, pode-se escrever que o valor de  $C_x$  é dado por:

$$c_x = c_{REF} \times \left( \frac{N_{REF}}{N_{Cx}} \right)$$

(24)

E com isso obtém-se uma relação simples e linear para a função de  $C_x$  em função de  $N_{Cx}$  e  $N_{REF}$ .

Para obter um valor preciso no intervalo de tempo  $T_p = 1$  s, utiliza-se um cristal de tempo real ( $f = 32768$  Hz). O temporizador que define  $T_p$  inicia com a transição de P0 de Hz para nível alto. Depois que  $T_p$  acaba a próxima transição de P0 de Hz para 1 inicia o *timer*  $T_p$  novamente, desta vez para medir  $C_x$ .

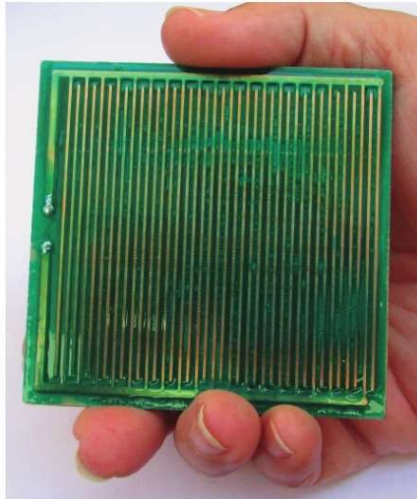
Neste protótipo foi investigada a possibilidade de fabricar circuitos digitais de alta velocidade e circuitos de comunicação na face v oposta da mesma placa onde foi feito o sensor, sem que esses circuitos interferiram no funcionamento do sensor capacitivo.

Um módulo comercial de *Bluetooth* HC-05 foi soldado no lado de top do PCB, para transmitir os dados para um *smartphone*. O sensor inteligente foi configurado para transmitir o número contado de descargas (de cada um dos capacitores) a cada 2 segundos.

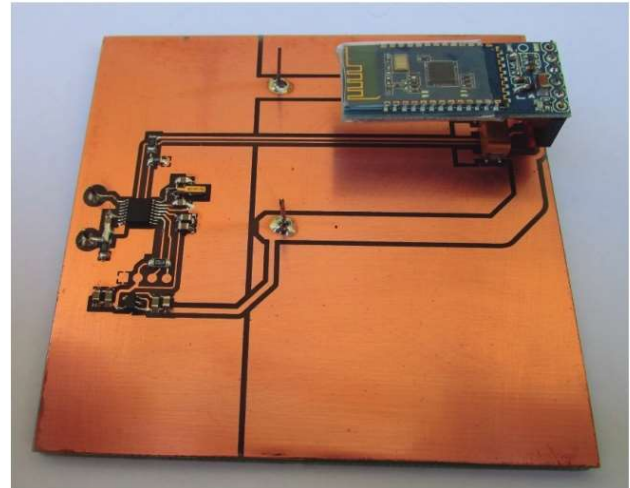
## CAPÍTULO 6 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O sensor desenvolvido e fabricado é apresentado na Fig. 15.

Fig. 14 – Fotografia do sensor fabricado: (a) lado inferior; (b) lado superior



(a)



(b)

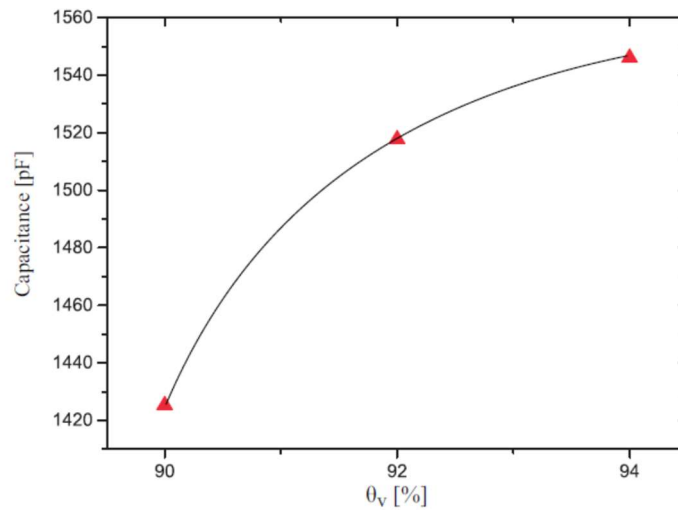
FONTE: do autor.

### 6.1 LEITURAS COM DIFERENTES NÍVEIS DE UMIDADE

Para o experimento foram preparadas amostras com umidades variando de 90, 92 e 94% de umidade, e o tempo de amostragem do sensor inteligente foi ajustado para 2 segundos, de maneira que poderia ser calculada a capacitância em função do número de descargas, conforme previsto inicialmente.

As leituras apresentaram uma evolução não linear da capacitância, conforme gráfico da figura 16. As médias encontradas foram calculadas a partir de cinco amostras medidas por umidade.

Figura 15 - Gráfico das médias das capacitâncias medidas com umidades variando de 90, 92 e 94% de umidade.



FONTE: do autor.

## 6.2 – TESTES DE REPETIBILIDADE

Durante o processo de fabricação do papel, a repetibilidade das medições do teor de água na polpa de papel é importante para obter uma qualidade constante do papel. Assim, foram executados vários testes para avaliar os sensores inteligentes desenvolvidos no que diz respeito à repetibilidade e reprodutibilidade.

Para os testes de repetibilidade foram utilizadas polpas de papel com diferentes teores de água  $\theta$ :  $\theta_v = 90\%$ ,  $\theta_v = 92\%$ ,  $\theta_v = 94\%$ . A emulsão foi colocada num recipiente e o sensor foi instalado. A seguir, sem perturbar a polpa de papel ou o sensor, foram feitas sete medições de capacitância, em intervalos de 2 s. Supõe-se que a celulose não pode alterar seu conteúdo de umidade durante esse pequeno período de tempo. Nas Figuras 17,18 e 19 são apresentados os resultados desses testes. Os valores calculados da média e do desvio padrão são apresentados na Tabela 1.

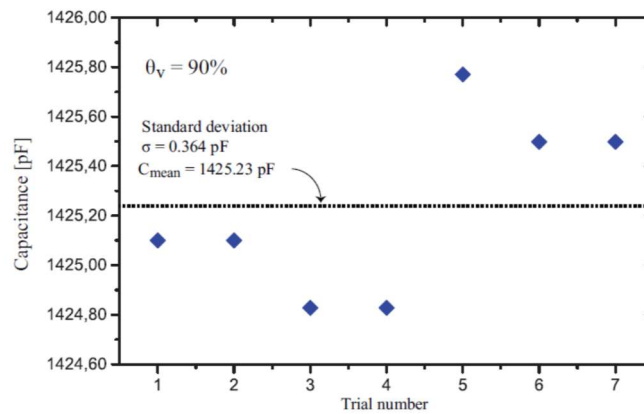
TABELA I

| $\theta_v$ | Mean       | Standard deviation |
|------------|------------|--------------------|
| 90%        | 1425.24 pF | 0.364 pF           |
| 92%        | 1517.68 pF | 0.554 pF           |
| 94%        | 1546.04 pF | 0.383 pF           |

FONTE: do autor.

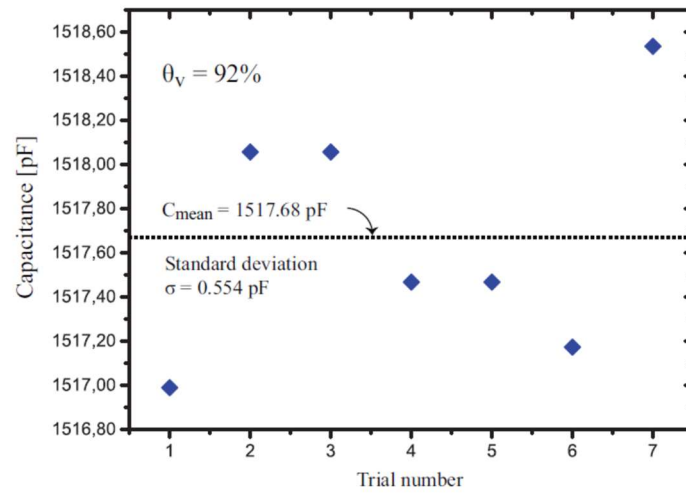
Observa-se que o pior caso ocorreu para  $\theta_v = 92\%$ , quando o desvio padrão calculado é  $\sigma = 554$  pF, quatro ordens de magnitude menores que o valor médio  $C_{\text{mean}} = 1517,68$  pF.

Figura 16 - Gráfico de desvio padrão para umidade 90%



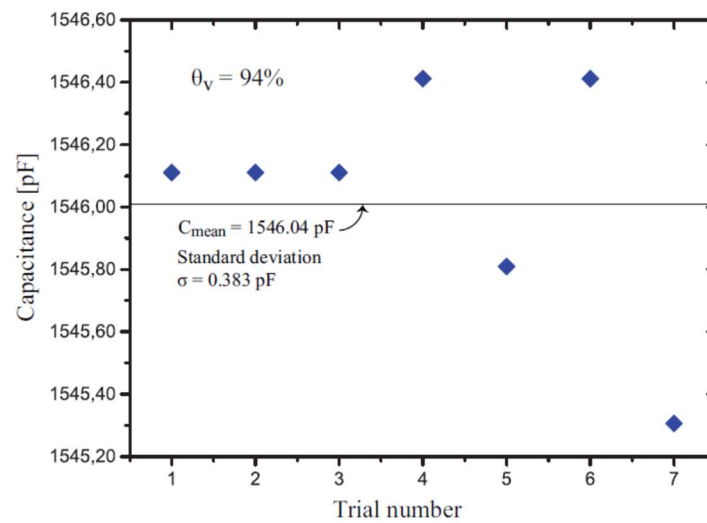
FONTE: do autor

Figura 17 - Gráfico de desvio padrão para umidade 92%



FONTE: do autor

Figura 18 - Gráfico de desvio padrão para umidade 94%



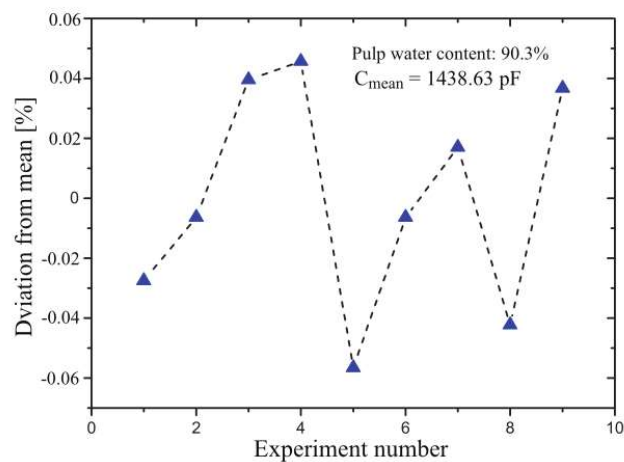
FONTE: do autor

### 6.3 – TESTES DE REPRODUCIBILIDADE

Os testes de reprodutibilidade avaliam os sensores quanto à capacidade de serem instalados e removidos várias vezes, lendo a mesma polpa de papel com valores consistentes. Nos testes realizados, com as já citadas anteriormente polpas de papel preparadas, o sensor foi instalado e desinstalado várias vezes, e a cada montagem foi feita uma nova medição. Para tanto a cada desmontagem o sensor era totalmente removido e limpo, a fim de produzir o efeito de uma nova instalação. Tal procedimento foi repetido por nove (9) vezes e os resultados são mostrados na Fig. 20.

O máximo desvio do valor médio foi de 0,006%, mostrando que o sensor pode ser movido ao longo do *wet end* da máquina e usado para medir diferentes partes da polpa de papel com resultados consistentes. Uma amostra de celulose com  $\theta_v = 90,3\%$  foi utilizado neste teste de reprodutibilidade. Pelos valores encontrados ficou bastante evidente o sucesso das medições e as pequenas flutuações nas medidas encontradas para cada valor de umidade.

Figura 19 - Gráfico de teste de reprodutibilidade



FONTE: do autor

## CAP 7 - CONCLUSÕES

Este trabalho teve por escopo estudar os sensores capacitivos e demonstrar seu funcionamento através de um protótipo que foi desenvolvido em laboratório utilizando a tecnologia PCB para a construção do sensor.

Um sensor inteligente capacitivo de campo de franja projetado para medir o conteúdo de água na polpa de papel no *wet end* de uma máquina de papel foi desenvolvido e testado em laboratório. O sensor capacitivo interdigitado é baseado na tecnologia PCB padrão. O sensor inteligente foi fabricado usando um PCB de quatro camadas, o que permite para adicionar um plano de blindagem de terra e um plano Vdd nas camadas internas da placa de circuito impresso. O capacitor interdigitado é fabricado na parte inferior da placa de circuito impresso e os circuitos de processamento de sinal são soldados no topo da placa de circuito impresso.

Essa técnica de construção elimina a necessidade de fiação entre o sensor e os circuitos de processamento de sinal (a conexão é extremamente curta, feita através de uma via da placa de circuito impresso, ligando a camada superior e inferior), eliminando as capacitâncias parasitas e a interferência que poderia ser acoplada através da fiação. Uma nova técnica de processamento de sinal foi desenvolvida uma técnica, o que permitiu ao sistema medir desvios muito pequenos de capacitância usando um oscilador de baixa frequência.

O sensor foi testado em laboratório usando um recipiente que emulava o “wet end” de uma máquina de papel. Embora a polpa de papel entre na extremidade úmida de uma máquina de papel com alto teor de umidade (geralmente 99%), é necessário esperar até atingir a faixa  $\theta_v = 90\%$  a  $92\%$  até que possa ir para a próxima etapa de fabricação.

Nesta faixa de  $\theta_v$  foi medida uma variação de  $\Delta C = 92,1$  pF. Testes de repetibilidade mostraram que os valores medidos apresentaram um desvio padrão que é quatro ordens de magnitude menor que a média.

Testes de reprodutibilidade realizados com nove medidas diferentes na mesma pasta de papel mostraram que o erro máximo observado foi inferior a  $0,006\%$ . Os dados medidos são transmitidos sem fio (via *bluetooth*), eliminando as conexões entre o sensor e o leitor de conteúdo de água na máquina de papel.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Farahani, Hamid , Wagiran, Rahman; Hamidon, Mohd Nizar; *Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. Sensors* 2014
- [2] Yamazoe, N.; Shimizu, Y. *Humidity Sensors: Principles and Applications. Sens. Actuators* 1986, 10, 379–398.
- [3] Traversa, E. *Ceramic Sensors for Humidity Detection: The State-of-the-Art and Future Developments. Sens. Actuators B Chem.* 1995, 23, 135–156. 49.
- [4] Chen, Z.; Lu, C. *Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. Sens. Lett.* 2005, 3, 274–295
- [5] Dunmore, F. *An Electric Hygrometer and Its Application to Radio Meteorography. J. Res. Natl. Bur. Stand.* 1938, 20, 723–744.
- [6] Yamamoto, T.; Shimizu, H. *Some Considerations on Stability of Electrical Resistance of the TiO<sub>2</sub>/SnO<sub>2</sub> Ceramic Moisture Sensor. IEEE Trans. Compon. Hybrids Manuf. Technol.* 1982, 5, 238–241
- [7] Yeh, Y.-C.; Tseng, T.-Y.; Chang, D.-A. *Electrical Properties of Porous Titania Ceramic Humidity Sensors. J. Am. Ceram. Soc.* 1989, 72, 1472–1475
- [8] Caballero, A.C.; Villegas, M.; Fernández, J.F.; Viviani, M.; Buscaglia, M.T.; Leoni, M. *Effect of Humidity on the Electrical Response of Porous BaTiO<sub>3</sub> Ceramics. J. Mater. Sci. Lett.* 1999, 18, 1297–1299
- [9] Imran, Z.; Batool, S.S.; Jamil, H.; Usman, M.; Israr-Qadir, M.; Shah, S.H.; Jamil-Rana, S.; Rafiq, M.A.; Hasan, M.M.; Willander, M. *Excellent Humidity Sensing Properties of Cadmium Titanate Nanofibers. Ceram. Int.* 2013, 39, 457–462.
- [10] Golonka, L.J.; Licznarski, B.W.; Nitsch, K.; Teterycz, H. *Thick-Film Humidity Sensors. Meas. Sci. Technol.* 1997, 8, 92–98.
- [11] Qu, W.; Meyer, J.-U. *A Novel Thick-Film Ceramic Humidity Sensor. Sens. Actuators B Chem.* 1997, 40, 175–182
- [12] Qu, W.; Meyer, J.-U. *Thick-Film Humidity Sensor Based on Porous MnWO<sub>4</sub> Material. Meas. Sci. Technol.* 1997, 8, 593–600
- [13] Arshaka, K.; Twomey, K.; Egan, D. *A Ceramic Thick Film Humidity Sensor Based on MnZn Ferrite. Sensors* 2002, 2, 50–61
- [14] Wagiran, R.; Zaki, W.W. *Characterization of Screen Printed BaTiO<sub>3</sub> Thick Film Humidity Sensor. Int. J. Eng. Technol.* 2005, 2, 22–26.
- [15] Yuan, Q.; Li, N.; Tu, J.; Li, X.; Wang, R.; Zhang, T.; Shao, C. *Preparation and Humidity Sensitive Property of Mesoporous ZnO-SiO<sub>2</sub> Composite. Sens. Actuators B Chem.* 2010, 149, 413–419. 253
- [16] Katayama, K.; Hasegawa, H.; Noda, T.; Akiba, T.; Yanagida, H. *Effect of Alkaline Oxide Addition on the Humidity Sensitivity of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-Doped TiO<sub>2</sub>. Sens. Actuators B Chem.* 1990, 2, 143–149
- [17] Vijaya, J.J.; Kennedy, L.J.; Sekaran, G.; Jeyaraj, B.; Nagaraja, K.S. *Effect of Sr Addition on the Humidity Sensing Properties of CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Composites. Sens. Actuators B Chem.* 2007, 123, 211–217

- [18] Adhyapak, P.V.; Kadam, V.; Mahadik, U.; Amalnerkar, D.P.; Mulla, I.S. Influence of Li Doping on the Humidity Response of Maghemite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Nanopowders Synthesized at Room Temperature. *Ceram. Int.* 2013, 39, 8153–8158.
- [19] Delapierre, G.; Grange, H.; Chambaz, B.; Destannes, L. Polymer-Based Capacitive Humidity Sensor: Characteristics and Experimental Results. *Sens. Actuators* 1983, 4, 97–104.
- [20] Yeow, J.T.W.; She, J.P.M. Carbon Nanotube-Enhanced Capillary Condensation for a Capacitive Humidity Sensor. *Nanotechnology* 2006, 17, 5441–5448.
- [21] Roman, C.; Bodea, O.; Prodan, N.; Levi, A.; Cordos, E.; Manovicu, I. A Capacitive-Type Humidity Sensor Using Crosslinked Poly(methyl Methacrylate-Co-(2 Hydroxypropyl)-Methacrylate). *Sens. Actuators B Chem.* 1995, 25, 710–713.
- [22] Sakai, Y.; Sadaoka, Y.; Matsuguchi, M.; Sakai, H. Humidity Sensor Durable at High Humidity Using Simultaneously Crosslinked and Quaternized Poly(chloromethyl Styrene). *Sens. Actuators B Chem.* 1995, 25, 689–691
- [23] Sheng, M.; Gu, L.; Kontic, R.; Zhou, Y.; Zheng, K.; Chen, G.; Mo, X.; Patzke, G.R. Humidity Sensing Properties of Bismuth Phosphates. *Sens. Actuators B Chem.* 2012, 166-167, 642–649.
- [24] Reverter, Ferran The art of Directly Interfacing Sensors to Microcontrollers *Journal of Low Power Electronics and Applications* · November 2012
- [25] Moaris, A; Dias, P.C.; Duarte, L.;Costa, E.;Ferreira, A.;Dias, J.A.S.; Fringing Field Capacitive Smart sensor Based on PCBTechnology for measuring Water Content in Paper Pulp *Journal of Sensors*, 2019