



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

TÉSSIO ROGÉRIO NÓBREGA BORJA DE MELO

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO**  
**EMPRESA: SPECTRUM CIRCUITOS ELETRÔNICOS LTDA.**

Campina Grande, Paraíba  
Novembro de 2014

TÉSSIO ROGÉRIO NÓBREGA BORJA DE MELO

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

*Relatório de Estágio Supervisionado submetido  
à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no  
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador:

Professor Francisco Marcos de Assis, Dr.

Campina Grande, Paraíba  
Novembro de 2014

TÉSSIO ROGÉRIO NÓBREGA BORJA DE MELO

## RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO

Relatório de Estágio Supervisionado submetido à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como parte dos  
requisitos necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletromagnetismo Aplicado

Aprovado em        /        /

**Professor Francisco Marcos de Assis, Dr.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

**Professor Bruno Barbosa Albert, Dr.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Romero Tadeu e Maria do Rosário, por nunca medirem esforços para que eu tivesse uma boa formação intelectual e moral.

Aos meus irmãos Têssia, Talyta e Romerinho, e a toda minha família, por sempre me apoiarem e cuidarem de mim.

À minha namorada Ana Cláudia, pelo amor, carinho, constante apoio e compreensão.

Ao professor Francisco Marcos pela orientação.

Ao professor Francisco Tejo pelo auxílio na condução deste trabalho.

Aos amigos Pablo, Paulinho e Tico, pelas boas conversas na hora do almoço.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.



## RESUMO

Este trabalho relata as atividades de estágio de Téo Rogério Nóbrega Borja de Melo, na empresa Spectrum Circuitos Eletrônicos LTDA., durante o período de 26 de maio de 2014 a 29 de agosto de 2014. Foi realizada simulação de sensores capacitivos de umidade para aplicações em sistemas de controle de irrigação. Os sensores utilizados foram os sensores interdigitados de uma de dupla face. Foi analisado o comportamento da capacitância em dois meios: ar e água. Os resultados das simulações concordaram para o caso do ar, apresentando desvios experimentais menores que 10%. Para o caso do sensor imerso em água, os resultados foram discrepantes. O sensor de dupla face apresentou uma variação maior da capacitância pela mudança da constante dielétrica nos diferentes meios, em relação àquele de uma face, se mostrando portanto mais sensível a variações de umidade.

**Palavras-chave:** Estágio Supervisionado, Sensores capacitivos, Sensores de umidade, Irrigação inteligente.

## ABSTRACT

This paper reports the Supervised Internship activities of Téo Rogério Nóbrega Borja de Melo, in the firm Spectrum Electronic Circuits LTDA., during the period of 26th May of 2014 to 29th August of 2014. Simulation of capacitive humidity sensors was performed for applications in irrigation systems. The sensors used were interdigitated sensors of one and double face. It was analyzed the capacitance behavior in two media: air and water. The simulation results agreed for the case of air, presenting experimental deviations smaller than 10%. In the case of the sensors immersed in water, the results were discrepant. The double face sensor showed higher capacitance variation by the change of the dielectric constant in different media, in relation to that of one face, being therefore more sensitive to changes in humidity.

**Keywords:** Supervised Internship, Capacitive Sensors, Humidity sensors, Smart irrigation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> Alguns tipos de sensores capacitivos.....	3
<b>Figura 2:</b> Circuito utilizado em sensores capacitivos. ....	4
<b>Figura 3:</b> Sistema de irrigação convencional. ....	5
<b>Figura 4:</b> Sistema de irrigação por gotejamento.....	5
<b>Figura 5:</b> Sensor de umidade resistivo Octopus. ....	6
<b>Figura 6:</b> Sensor capacitivo interdigitado de face única. ....	9
<b>Figura 7:</b> Parâmetros geométricos do sensor. ....	10
<b>Figura 8:</b> Volume de cálculo para simulação. ....	11
<b>Figura 9:</b> Malha tetraedral para implementação do método dos elementos finitos. ....	12
<b>Figura 10:</b> refinamento da malha nas regiões entre as trilhas que são de maior interesse. ....	12
<b>Figura 11:</b> Trilhas aterradas. ....	13
<b>Figura 12:</b> Trilhas mantidas a um potencial de 1 V.....	13
<b>Figura 13:</b> Configuração do potencial eletrostático no plano longitudinal. ....	14
<b>Figura 14:</b> Potencial entre as trilhas varia fortemente, estando o campo elétrico quase todo concentrado nessa região. ....	14
<b>Figura 15:</b> Configuração do potencial eletrostático no plano transversal. ....	15
<b>Figura 16:</b> Vista ampliada do potencial próximo ao substrato dielétrico. ....	15
<b>Figura 17:</b> Potencial elétrico para o sensor imerso em água. ....	16
<b>Figura 18:</b> Trilhas alimentadas com um potencial de 1 V. ....	17
<b>Figura 19:</b> Trilhas aterradas. ....	17
<b>Figura 20:</b> Potencial elétrico para o sensor de dupla face imerso no ar. ....	18
<b>Figura 21:</b> Potencial elétrico para o sensor de dupla face imerso em água. ....	18
<b>Figura 22:</b> Sensor capacitivo interdigitado de uma face. O sensor de dupla face é praticamente idêntico, apresentando apenas uma trilha adicional simetricamente oposta ao plano longitudinal.....	19
<b>Figura 23:</b> Medidor universal de resistência, indutância e capacitância RCL U1731B.20	
<b>Figura 24:</b> Montagem experimental para a medição da capacitância do sensor imerso em ar.....	20
<b>Figura 25:</b> Montagem experimental para a medição da capacitância do sensor imerso em água. ....	21

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1:** Valores da capacitância para o sensor interdigitado de uma face. .... 21

**Tabela 2:** Valores da capacitância para o sensor interdigitado de dupla face. .... 22

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	1
2	A Empresa.....	2
3	Sensores Capacitivos .....	3
3.1	Aplicação a Sistemas de Controle de Irrigação .....	4
3.2	Objetivo da Empresa.....	6
4	Simulação do Sensor Capacitivo e Testes Experimentais .....	8
4.1	Sensor Interdigitado de Face Única .....	9
4.2	Sensor Interdigitado de Dupla Face.....	16
4.3	Comparação com Medidas Experimentais .....	19
5	Conclusão.....	23
	Bibliografia.....	24

# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como intuito descrever as atividades realizadas no âmbito profissional durante o Estágio Supervisionado, como parte indispensável para a formação acadêmica do Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

O Estágio Supervisionado é considerado uma disciplina obrigatória, fazendo parte da estrutura curricular do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, que no seu entendimento como instituição de ensino superior, reconhece o estágio como conciliador entre prática e teoria com vistas à formação do futuro engenheiro eletricitista.

O estágio foi realizado durante o período de 26 de maio de 2014 a 29 de agosto de 2014, na empresa Spectrum Circuitos Eletrônicos LTDA., com carga horária de 180 horas e atendendo os requisitos previstos na Resolução N° 01/2012 do Colegiado do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica e em consonância com a Lei do Estágio (Lei N° 11.788/2008). As atividades do estágio dentro da empresa consistiram na realização de simulações numéricas de sensores capacitivos de umidade para aplicações em sistemas de controle de irrigação.

Este relatório está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 apresentamos a empresa concedente; No Capítulo 3 destacamos os princípios de funcionamento de sensores capacitivos e como podem ser aplicados em sistemas de irrigação; No Capítulo 4 descrevemos as simulações dos sensores realizadas com o software COMSOL Multiphysics®, e ainda, a comparação com os resultados das medidas experimentais; O Capítulo 5 é reservado para nossas considerações finais.

## 2 A EMPRESA

A empresa Spectrum Circuitos Eletrônicos LTDA está situada na Rua Emiliano Rosendo Silva, 115, Sala 42, no bairro Bodocongó, na cidade de Campina Grande, Paraíba. A empresa conta com uma equipe técnica constituída por físicos, engenheiros eletricitas, consultores técnicos, projetistas e técnicos em eletrônica, além de uma equipe administrativa atuando em conjunto para excelência dos serviços prestados.

Desde a sua concepção o núcleo de projeto da empresa vem atuando na área de projetos de sensores, sistemas de sensoriamento remoto, sistemas microcontrolados, interface de circuitos, além de fabricação de placas de circuito impresso. Durante este tempo, a empresa tem ganhado investimentos de instituições governamentais como a Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ), bem como obtenção de fundos por meio do projeto TECNOVA, projeto da Financiadora de Estudos e Projeto (FINEP) que visa criar condições financeiras favoráveis e apoiar a pesquisa e inovação.

A empresa concedente oferece serviços de projeto e manufatura de placas de circuito impresso em pequena e larga escala. A empresa ainda atua com soluções para projetos eletrônicos analógicos e digitais como:

- Desenvolvimento de esquemáticos;
- Simulações de circuitos eletrônicos;
- Suporte a escolas de nível médio e técnico;
- Projetos eletrônicos customizados;
- Suporte a hobistas.

### 3 SENSORES CAPACITIVOS

Como primeira atividade do estágio, realizamos uma revisão bibliográfica a respeito dos sensores capacitivos, buscando entender seus princípios de funcionamento, suas principais características e aplicações.

Um sensor ou transdutor capacitivo é um capacitor que exibe uma variação do valor nominal de sua capacitância em função de uma grandeza não elétrica, seja por meio de mudanças na sua geometria, ou por mudança das características do material dielétrico [1]. Sensores capacitivos permitem medir com precisão um grande número de grandezas físicas, possibilitando seu uso em uma grande variedade de aplicações, a exemplo de medidores de pressão, aceleração, fluxo de gases ou líquidos, força, deslocamento, dentre outros. Na Figura 1 são mostrados esquematicamente de maneira simplificada alguns tipos de sensores capacitivos comumente encontrados, usados para detectar deslocamentos, medir umidade e para uso em microfones, respectivamente.

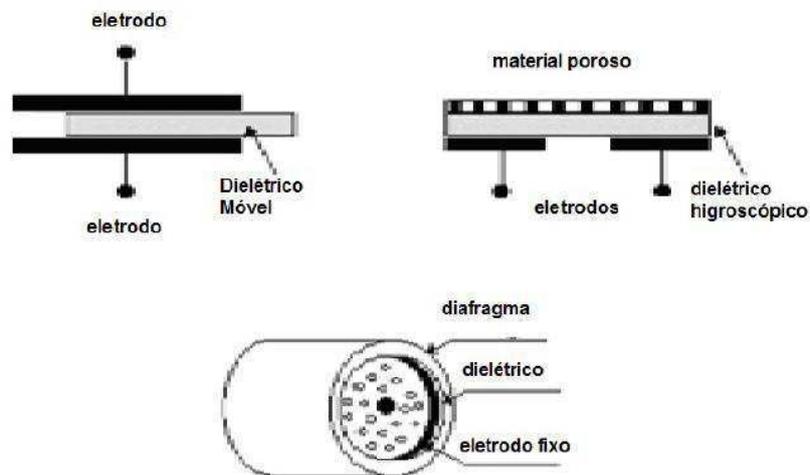


Figura 1: Alguns tipos de sensores capacitivos.

Sensores capacitivos de umidade são importantes em inúmeras aplicações onde se deseje conhecer ou controlar a umidade de ambientes, a exemplo de: medição de umidade na atmosfera para o estudo do clima; controle da umidade em locais fechados onde sua presença excessiva ou abaixo do normal pode causar danos, como em peças de museus ou documentos de bibliotecas; medição de umidade do solo para uso em sistemas de controle de irrigação de culturas agrícolas de alta eficiência.

O princípio de detecção desses sensores está relacionado à possibilidade de variações do dielétrico, a detecção podendo ser efetuada por meio da medição da carga acumulada, por meio da aplicação de uma tensão constante, ou pela variação da frequência de ressonância de um circuito oscilador, do qual o sensor capacitivo é parte integrante [1] [2]. Na Figura 2 é ilustrado o esquema de um circuito comumente usado em sensores interdigitados, os quais são os mais utilizados para medição de umidade.

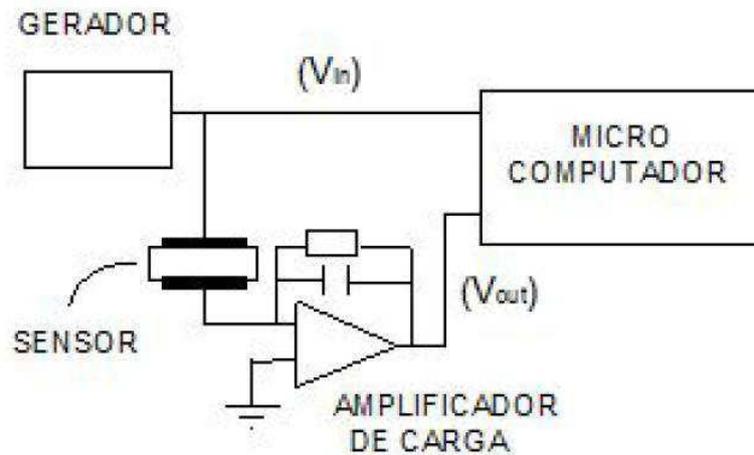


Figura 2: Circuito utilizado em sensores capacitivos.

### 3.1 APLICAÇÃO A SISTEMAS DE CONTROLE DE IRRIGAÇÃO

O uso de um sistema de irrigação em culturas agrícolas eleva a quantidade e a qualidade da produção das culturas, proporcionando um rendimento estável e permitindo o cultivo do solo em períodos de seca, uma vez que torna a produção independente da ocorrência natural de chuvas [3] [4]. Principalmente em regiões secas, como a região Nordeste do Brasil, sistemas de irrigação podem ser vistos como um importante instrumento desencadeador de desenvolvimento sócio-econômico, principalmente pela possibilidade da utilização dos solos durante todo o ano, obtendo-se, em alguns casos, duas a três colheitas por ano; o conseqüente aumento da produtividade provoca a geração de emprego e renda, e ainda, a maior estabilidade da colheita estimula a permanência dos agricultores na terra, mitigando o problema do êxodo rural. Além disso, áreas de irrigação podem exercer efeito catalítico em relação

às atividades econômicas e aos serviços de apoio governamental, abrindo perspectivas para a adoção de enfoques de desenvolvimento integrado, ensejando a implantação de complexos agroindustriais e serviços conexos, especificamente para a produção de alimentos e produtos de exportação [5].

A irrigação de culturas por meio da técnica de gotejamento é uma tecnologia que usa menos água e menos fertilizantes e, além disso, promove o aumento da produção agrícola em relação aos sistemas convencionais. Ao contrário destes, que fazem molhar toda a planta e o seu entorno, a irrigação por gotejamento coloca água diretamente na região da raiz das plantas, utilizando um sistema de tubos, válvulas e gotejadoras. Desta forma, não há desperdício de água, já que as plantas recebem apenas o necessário para que se desenvolvam.



Figura 3: Sistema de irrigação convencional.



Figura 4: Sistema de irrigação por gotejamento.

O emprego de um sensor de umidade é fundamental para a implementação desse sistema, dado que é necessário que se saiba a quantidade de água retida no solo, de modo a acionar o irrigador quando essa quantidade cair abaixo de determinado valor, ou interrompê-lo quando a água estiver em excesso. Neste caso pode ser usado um sensor de umidade capacitivo devido ao fato de a constante dielétrica do solo, no qual o capacitor estará imerso, variar em função da quantidade de água presente, resultando em uma relação de proporcionalidade entre a capacitância e a umidade do solo.

### 3.2 OBJETIVO DA EMPRESA

A necessidade da empresa era desenvolver um protótipo, que posteriormente pudesse ser evoluído a um produto comercial de um sistema de controle de irrigação por gotejamento, no qual fosse possível acionar os dispositivos gotejadores remotamente (sem fio) por equipamentos que medissem constantemente o nível de umidade do solo. O sensor de umidade inicialmente usado foi o sensor resistivo Octopus, o qual funciona por meio do aumento da condutividade elétrica do solo com o aumento da quantidade de água retida. Este sensor é apresentado na Figura 5.

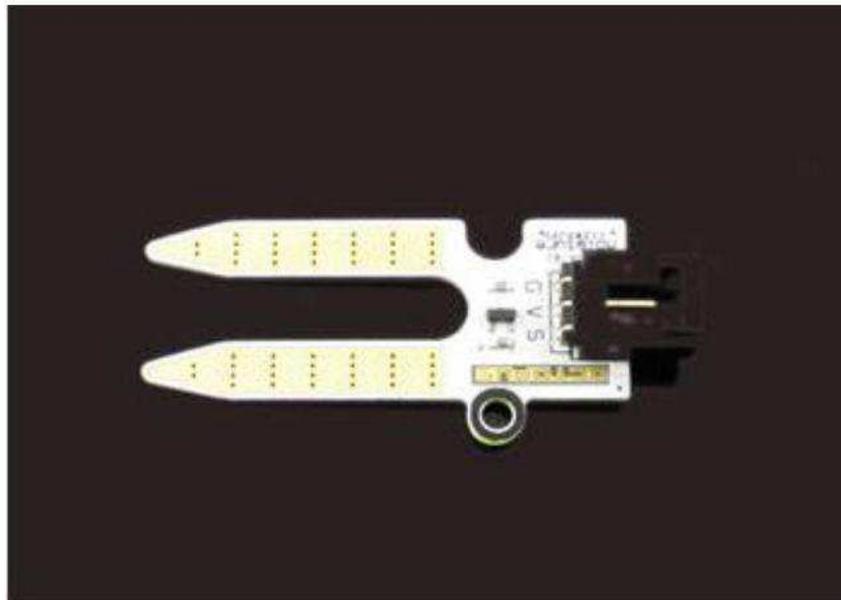


Figura 5: Sensor de umidade resistivo Octopus.

Este sensor tem a vantagem de ser de baixo custo, porém apresenta pouca precisão em suas medidas, dificultando seu uso em aplicações que necessitem de

medições mais confiáveis. O próprio fabricante o recomenda apenas para aplicações residenciais como urbanização e plantas domésticas [6]. Isto levou a empresa Spectrum a analisar a possibilidade do uso de sensores capacitivos disponíveis no mercado, tais como [7], [8] e [9], porém os altos preços inviabilizavam o projeto. Por este motivo, a empresa resolveu desenvolver um sensor capacitivo de umidade próprio, com vistas à melhoria da precisão das medidas em relação ao sensor resistivo e de custo inferior em relação ao dos sensores capacitivos disponíveis no mercado atualmente.

## 4 SIMULAÇÃO DO SENSOR CAPACITIVO E TESTES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo descrevemos as etapas e os resultados da simulação numérica dos sensores de umidade capacitivos, realizada utilizando o software COMSOL Multiphysics® versão 4.3a, o qual é baseado no método dos elementos finitos. Procuramos avaliar a variação da capacitância provocada pela mudança da constante dielétrica do meio no qual o sensor está imerso. Para avaliar essa variação, realizamos a simulação do sensor imerso no ar, e em seguida, imerso em água.

Embora as condições de funcionamento do sensor sejam diferentes na prática – pois ele estará enterrado no solo úmido e não na água ou no ar – a simulação dará informação sobre a variação da capacitância em função da quantidade de água, que é a grandeza relevante que estará variando na situação real, sendo desnecessário incluir no modelo características como o tipo de solo, pois tais características se manterão essencialmente constantes quando da utilização real do sensor. Em outras palavras, a variação da quantidade de água é que irá determinar a mudança na constante dielétrica do meio e, conseqüentemente, da capacitância, fazendo o sensor funcionar.

Uma característica interessante que espera-se que o sensor possua é que pequenas mudanças na constante dielétrica do meio provoquem variações significativas de capacitância, pois desse modo, o sensor será capaz de indicar variações pequenas de umidade, sendo portanto mais sensível e mais preciso na sua medição. Esta sensibilidade é presumivelmente dependente da geometria do capacitor. Nós realizamos a simulação com duas geometrias do sensor interdigitado, de face única e de dupla face.

O software calcula a capacitância por meio da energia eletrostática total contida numa região do espaço determinada convenientemente. Dados dois condutores submetidos a uma diferença de potencial  $V$ , pode-se mostrar que a capacitância  $C$  associada ao sistema está relacionada com a sua energia  $W$  por [10],

$$W = \frac{1}{2} CV^2. \quad (1)$$

A energia eletrostática  $W$  contida em um volume  $V$  do espaço onde há um campo elétrico  $\mathbf{E}$ , é dada por [11],

$$W = \frac{1}{2} \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{D} d^3x, \quad (2)$$

onde  $\mathbf{D}$  é o deslocamento elétrico, e  $d^3x$  é o elemento de volume. Portanto, uma vez que se tenha determinado os campos sobre uma região do espaço, podemos calcular a energia eletrostática contida nessa região, e por meio da equação (1), determinar a capacitância do sistema.

#### 4.1 SENSOR INTERDIGITADO DE FACE ÚNICA

A geometria do sensor capacitivo interdigitado é mostrada na Figura 6.

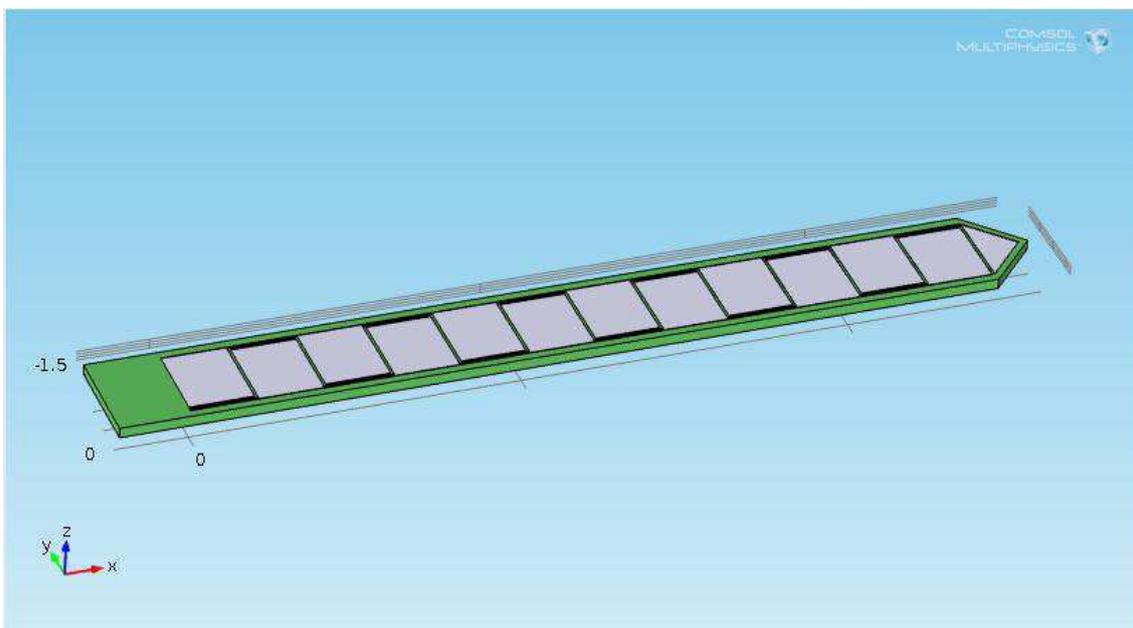


Figura 6: Sensor capacitivo interdigitado de face única.

A região de cor verde representa o substrato dielétrico FR4, cuja permissividade elétrica relativa varia tipicamente numa faixa de 4,2 a 4,9, dependendo da composição

específica e do modo de fabricação [12]; adotamos então um valor de 4,5. As áreas em cinza representam as trilhas de cobre que constituem as partes condutoras do capacitor. Os parâmetros geométricos são ilustrados na Figura 7, na qual as medidas nos eixos estão em milímetros.

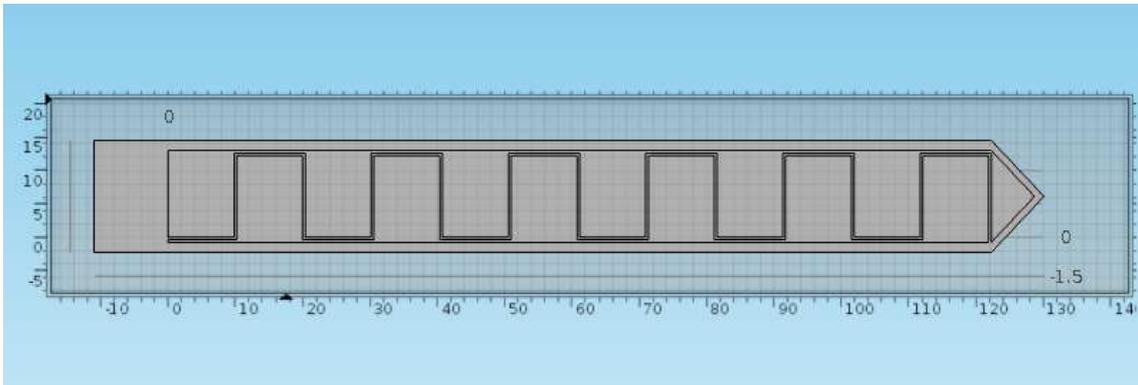


Figura 7: Parâmetros geométricos do sensor.

As medidas que a Figura 7 não mostra são a espessura do substrato dielétrico, de 1,6 mm e a espessura da trilha de cobre, de 0,2 mm. A distância entre as trilhas é de 0,4 mm.

Para a realização da simulação delimitamos uma região do espaço, sobre a qual o cálculo das grandezas pôde ser efetuado. Isto é necessário na realização de uma simulação numérica, pois, obviamente, não é possível calcular as grandezas físicas em um computador digital com memória finita, se estas se estendem sobre todo o espaço. A escolha do tamanho dessa região deve ser um compromisso entre a precisão do cálculo dos campos e o esforço computacional exigido. Por um lado, é bom que a região seja pequena, pois assim requer-se menor esforço computacional. Por outro lado, no caso específico do campo eletromagnético, isto pode levar a uma distorção na forma das linhas de campo, produzindo um resultado que não condiz com a realidade. Levando isto em consideração, juntamente com a forma geométrica do sensor, escolhemos um volume em forma de paralelepípedo, conforme mostrado na Figura 8.

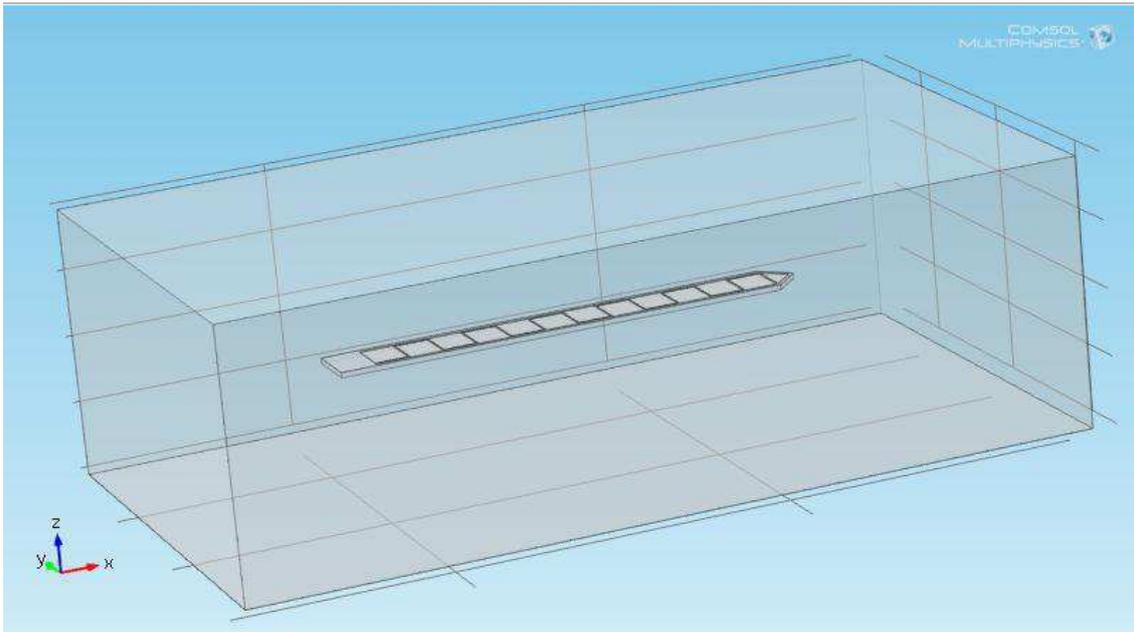


Figura 8: Volume de cálculo para simulação.

O material que preenche o volume de cálculo nessa simulação foi o ar, cuja permissividade relativa é aproximadamente unitária. A condição de contorno utilizada sobre a superfície limitante da região de cálculo foi a condição *default* do programa

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (3)$$

em que  $\mathbf{n}$  é o vetor normal à superfície e  $\mathbf{D}$  é o vetor deslocamento elétrico. Esta equação representa a ausência de cargas sobre esta superfície. A condição de contorno utilizada nas interfaces entre diferentes meios foi,

$$\mathbf{n} \cdot (\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0. \quad (4)$$

Esta equação representa a continuidade da componente normal do vetor deslocamento elétrico na superfície de interface entre os dois meios, quando da ausência de cargas sobre esta superfície [13].

Sobre a região de cálculo geramos uma malha constituída de tetraedros de tamanhos variados. Subdividimos portanto a região em pequenas porções, possibilitando a implementação do método dos elementos finitos, utilizado internamente pelo COMSOL.

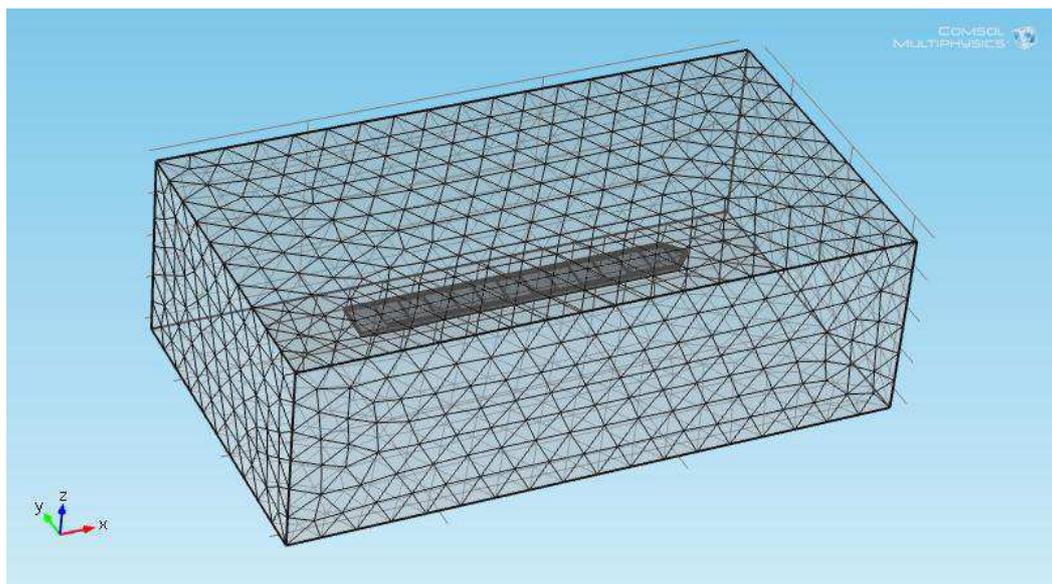


Figura 9: Malha tetraedral para implementação do método dos elementos finitos.

Construímos a malha de tal maneira que as regiões de maior interesse possuíssem um número maior de tetraedros, aumentando assim a precisão dos resultados, como mostrado na Figura 10.

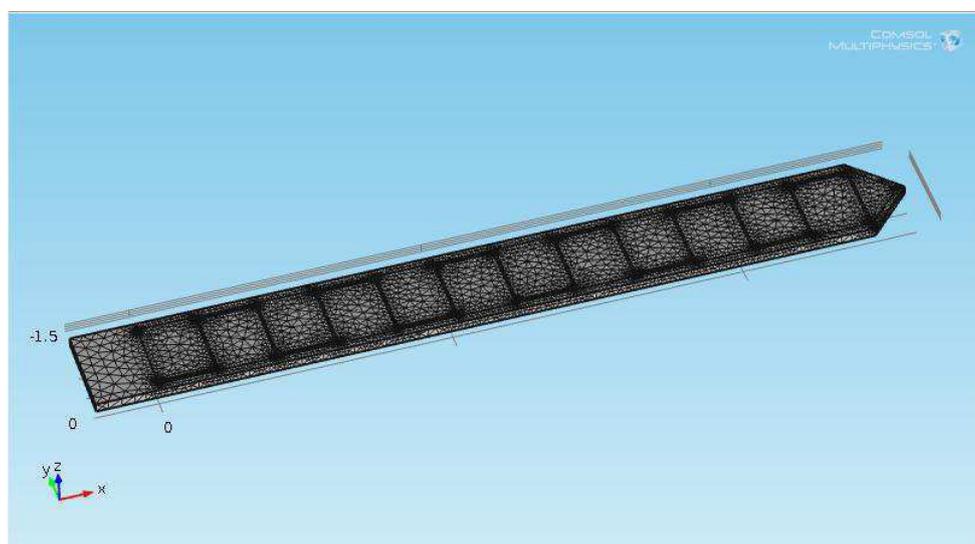


Figura 10: refinamento da malha nas regiões entre as trilhas que são de maior interesse.

As condições de contorno nas superfícies das trilhas do capacitor foram postas da seguinte forma: as trilhas destacadas em roxo na Figura 11 foram aterradas, enquanto as trilhas realçadas na Figura 12 foram mantidas a um potencial fixo de 1 V.

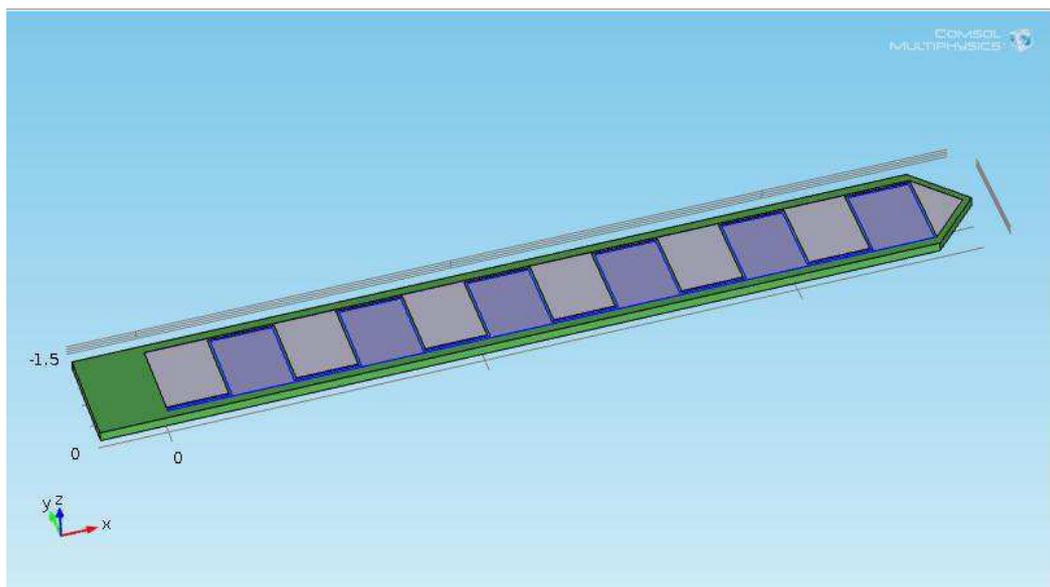


Figura 11: Trilhas aterradas.

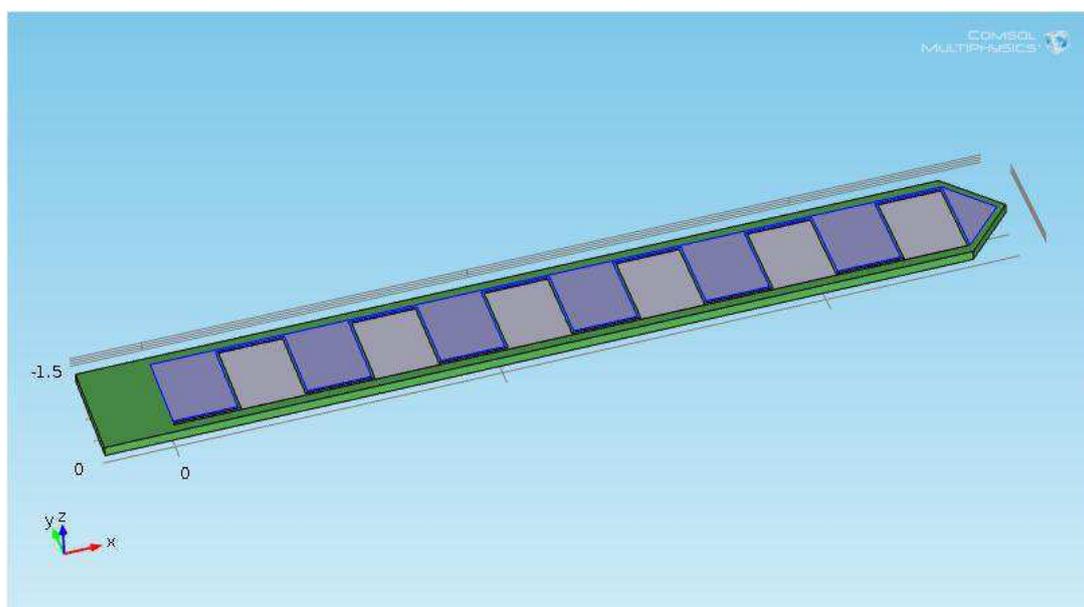


Figura 12: Trilhas mantidas a um potencial de 1 V.

O potencial eletrostático no plano longitudinal obtido com a simulação está mostrado na Figura 13.

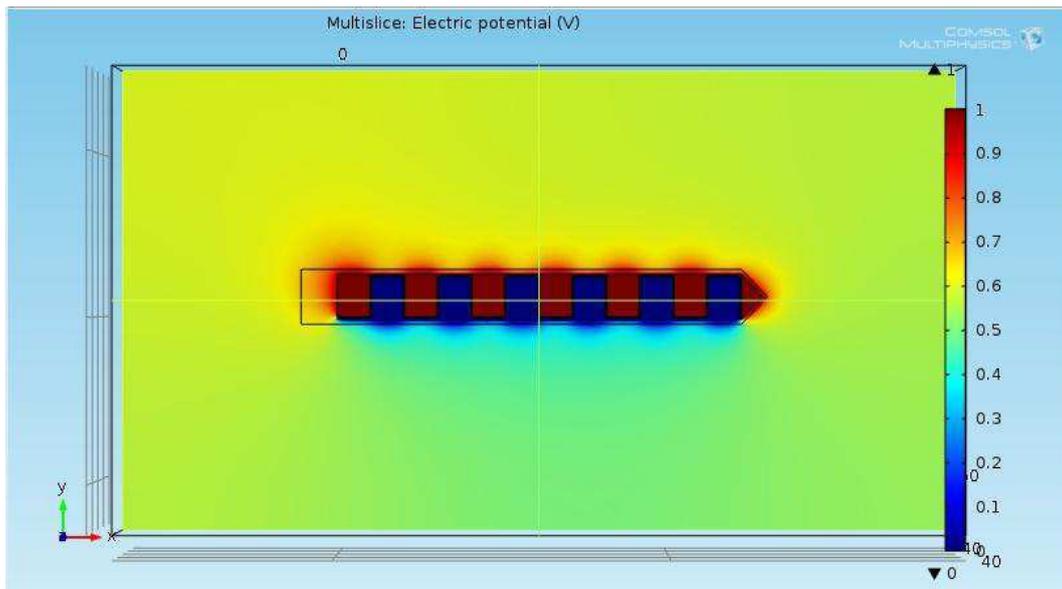


Figura 13: Configuração do potencial eletrostático no plano longitudinal.

Verificamos que ele varia muito pouco nas regiões afastadas das trilhas e varia fortemente na região entre as trilhas, indicando que o campo elétrico é intenso ali. Isto justifica o uso de uma malha mais refinada entre as trilhas, dado que o campo elétrico se concentra praticamente na sua totalidade nessa região.

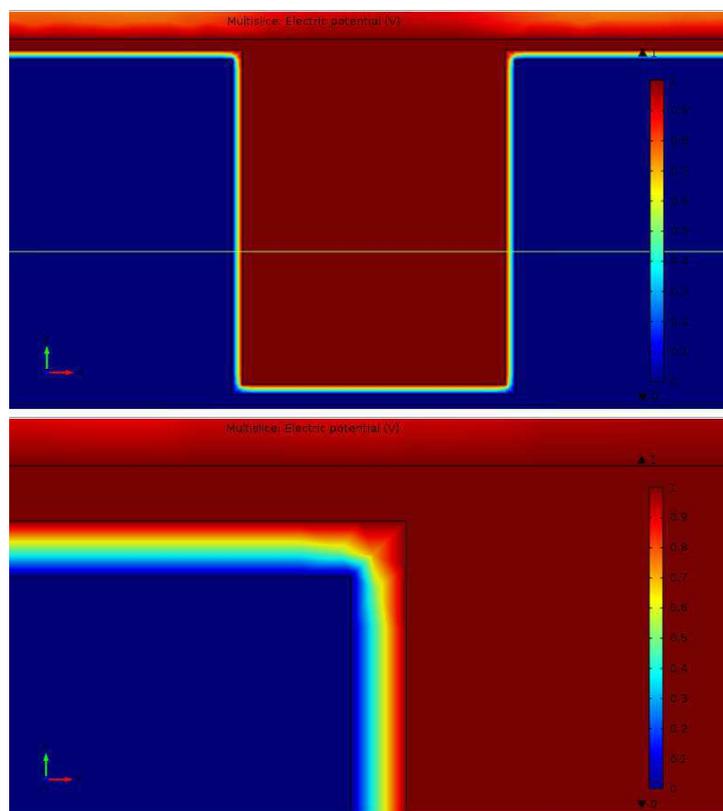


Figura 14: Potencial entre as trilhas varia fortemente, estando o campo elétrico quase todo concentrado nessa região.

As Figuras 15 e 16 mostram o comportamento do potencial no plano transversal.

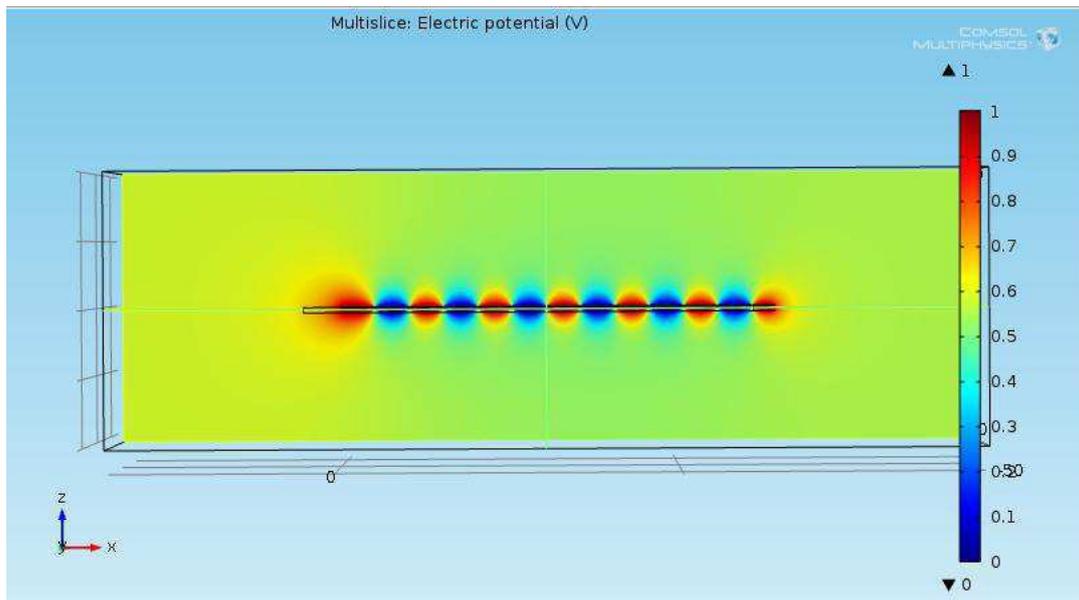


Figura 15: Configuração do potencial eletrostático no plano transversal.

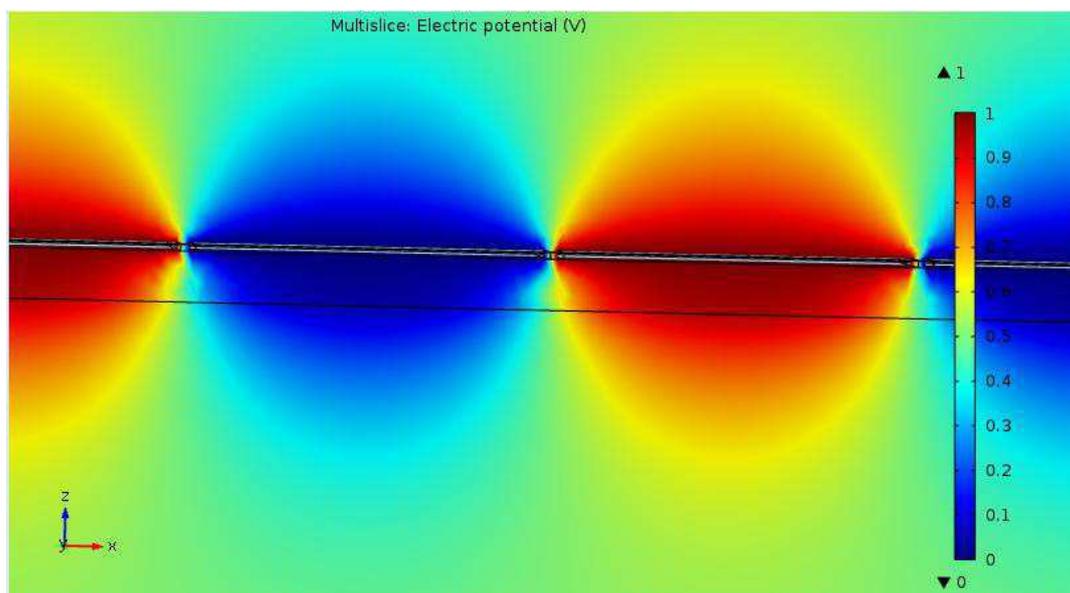


Figura 16: Vista ampliada do potencial próximo ao substrato dielétrico.

Além da forma dos potenciais, o COMSOL possibilita que se efetue diretamente o cálculo da capacitância. O valor obtido nesta simulação foi de 20,9 pF.

Posteriormente refizemos a simulação imergindo o sensor em água, a qual apresenta uma permissividade relativa de aproximadamente 80. O potencial elétrico é mostrado na Figura 17 a seguir.

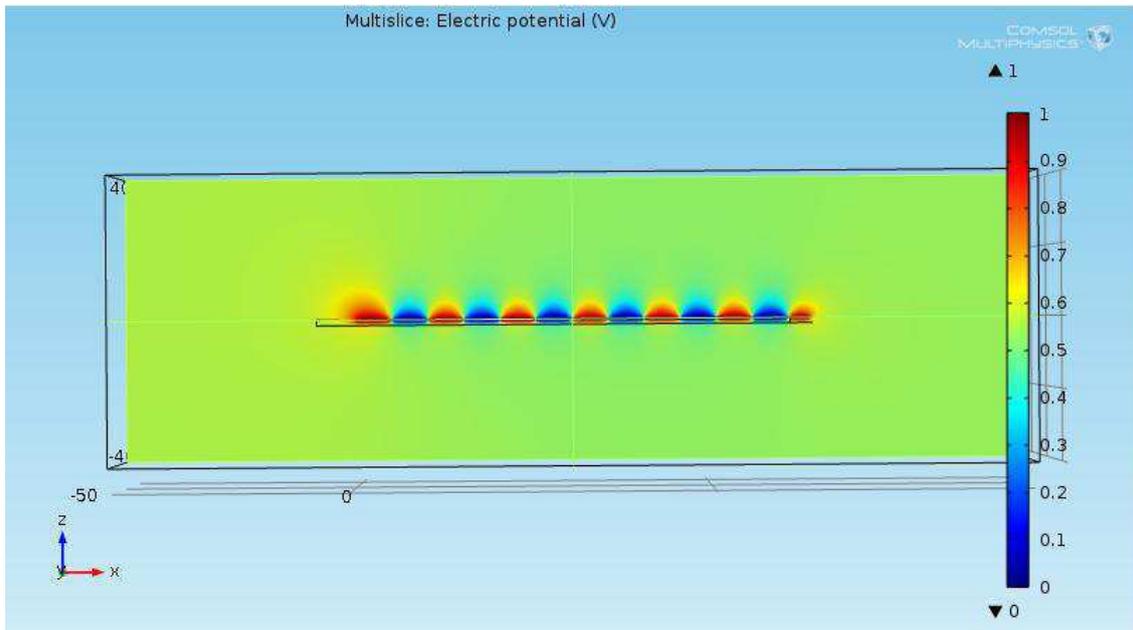


Figura 17: Potencial elétrico para o sensor imerso em água.

Podemos observar a modificação da configuração do potencial elétrico – e consequentemente do campo elétrico – em relação ao caso em que o meio era o ar, mostrado na Figura 15. Esta modificação na configuração do campo elétrico reflete a variação da constante dielétrica do meio, que resulta em um valor diferente de capacitância. Nesse caso, o valor da capacitância obtido foi 271,5 pF, o que significa um aumento de quase 13 vezes.

## 4.2 SENSOR INTERDIGITADO DE DUPLA FACE

O sensor interdigitado de dupla face apresenta a mesma geometria do de face única, porém com trilhas condutoras em ambas as faces, dispostas simetricamente em relação ao plano longitudinal. Se as trilhas simetricamente opostas forem alimentadas com a mesma tensão, o campo elétrico no interior do substrato dielétrico será fortemente atenuado. No caso de o sensor estar imerso em meio aquoso, é possível que pequenas quantidades de água se infiltrem no substrato, alterando suas características elétricas, podendo provocar erros na leitura do sensor. Entretanto, se o campo elétrico for pequeno, esses efeitos serão atenuados. Essa característica é vantajosa, pois faz com que o sensor seja mais robusto.

Procedemos com a simulação de forma análoga à do sensor de face única, usando as mesmas dimensões, materiais, volume de cálculo e condições de contorno. As

diferenças foram apenas a presença das trilhas adicionais na face oposta, e a respectiva alimentação: as trilhas mostradas na Figura 18 foram mantidas a uma tensão de 1V, e as trilhas restantes mostradas na Figura 19 foram aterradas (o substrato dielétrico foi feito transparente nestas Figuras para melhor visualização das trilhas nas duas faces).

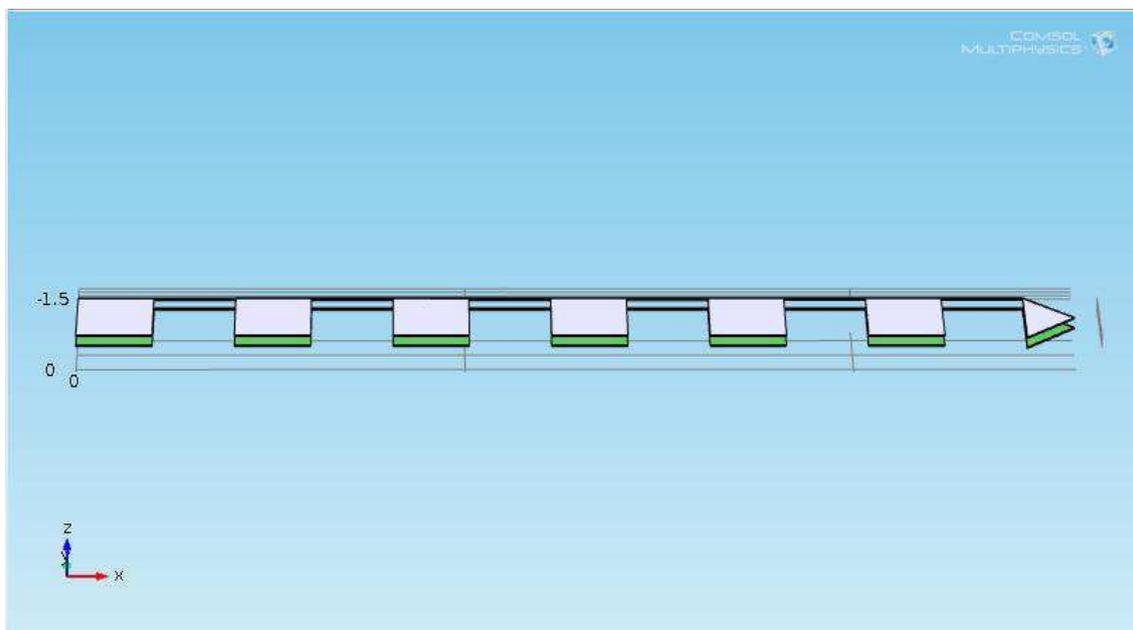


Figura 18: Trilhas alimentadas com um potencial de 1 V.

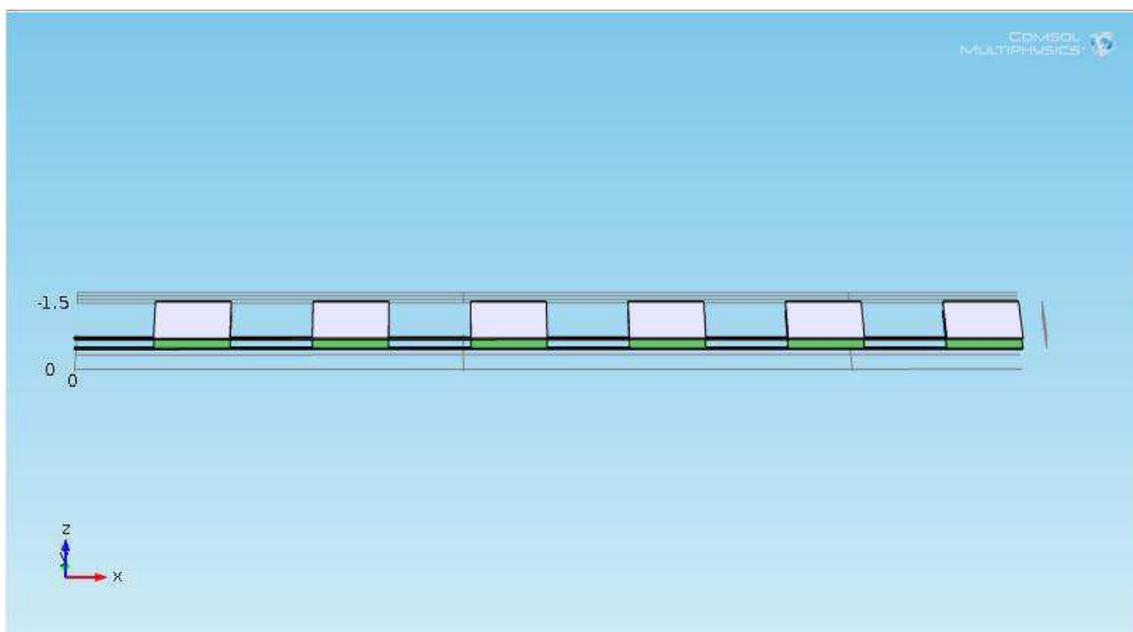


Figura 19: Trilhas aterradas.

O potencial obtido está mostrado na Figura 20. Para esta simulação, a capacitância calculada pelo software foi de 23,7 pF.

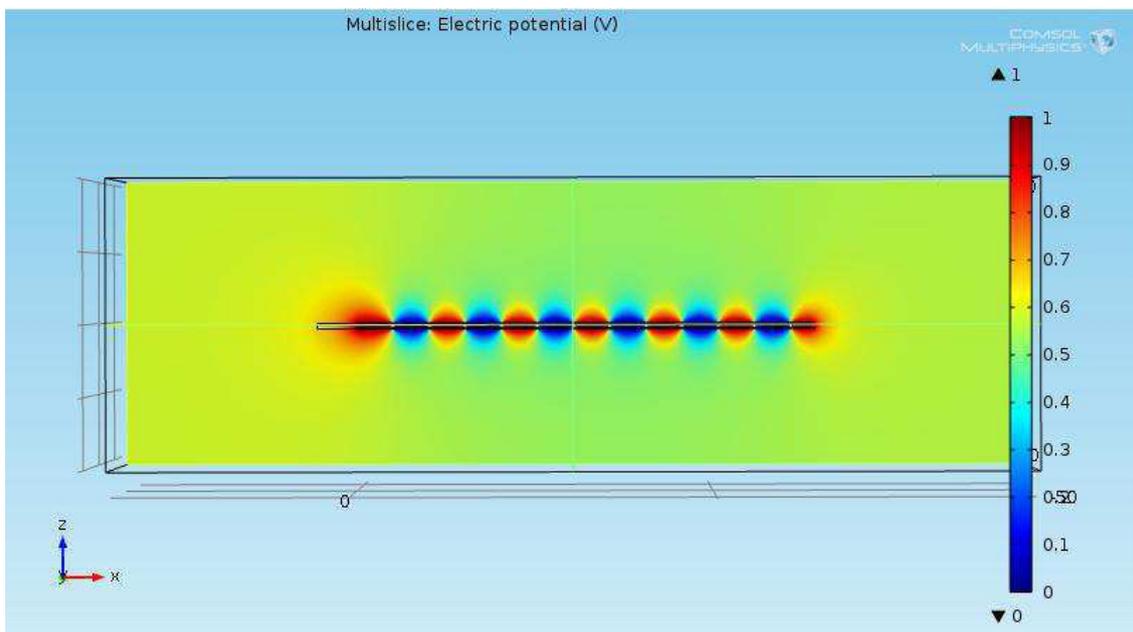


Figura 20: Potencial elétrico para o sensor de dupla face imerso no ar.

Mudando o meio para a água, obtivemos a seguinte configuração para o potencial.

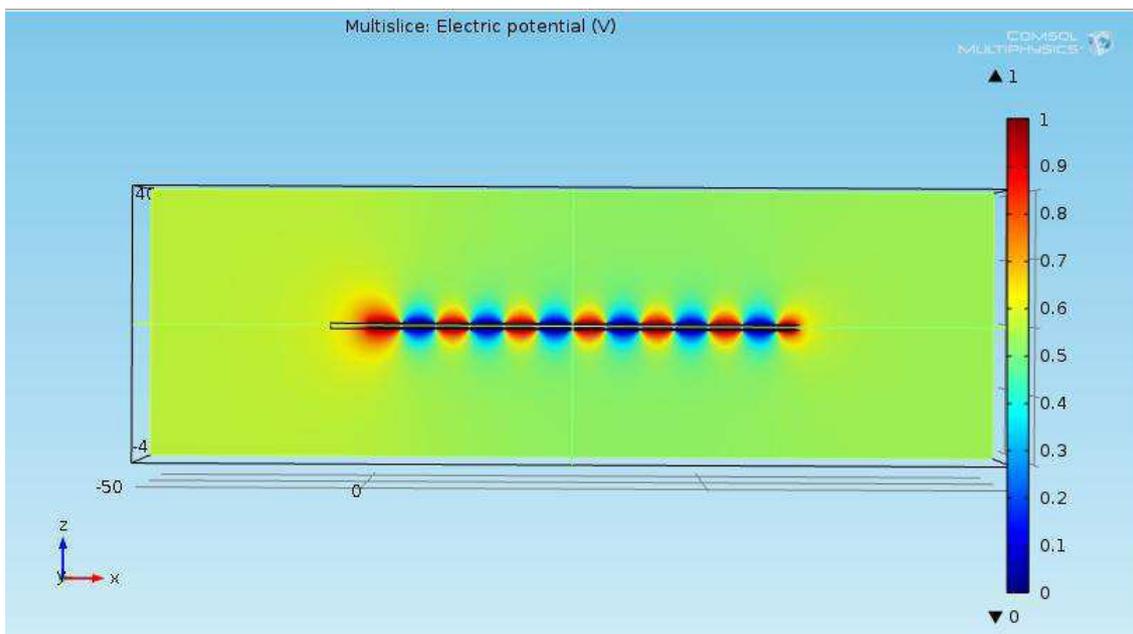


Figura 21: Potencial elétrico para o sensor de dupla face imerso em água.

A capacitância neste caso foi de 518,6 pF, representando um aumento de mais de 15 vezes na capacitância em relação ao caso em que o sensor está imerso em ar. Comparativamente em relação ao sensor de uma face, notamos que o sensor de dupla face apresentou uma variação maior na capacitância em decorrência da mudança do meio de ar para água.

### 4.3 COMPARAÇÃO COM MEDIDAS EXPERIMENTAIS

As placas de circuito impresso dos sensores capacitivos interdigitados de uma e duas faces foram construídas na própria empresa usando os parâmetros geométricos tais como apresentados nas seções anteriores. Os sensores foram revestidos com um verniz impermeabilizante para evitar a infiltração de água no substrato dielétrico e a oxidação das trilhas de cobre.



Figura 22: Sensor capacitivo interdigitado de uma face. O sensor de dupla face é praticamente idêntico, apresentando apenas uma trilha adicional simetricamente oposta ao plano longitudinal.

Foram realizadas medidas das capacitâncias dos sensores tanto em condições ambientes (no ar), quanto imersos em água. Para a medição das capacitâncias foi utilizado um medidor RCL U1731B.

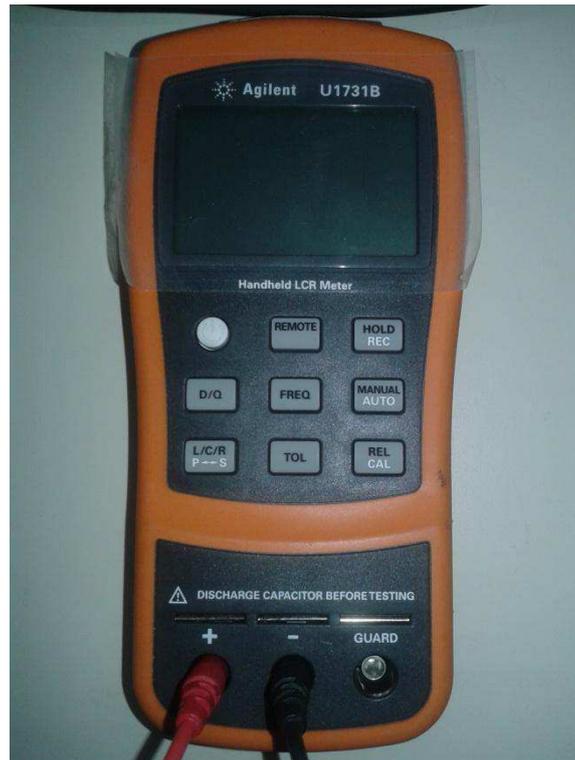


Figura 23: Medidor universal de resistência, indutância e capacitância RCL U1731B.

A montagem experimental, como mostrado nas Figuras 24 e 25, consistiu em conectar os terminais das placas dos sensores ao medidor RCL. No caso da imersão em água, teve-se que tomar o cuidado de suspender o sensor de modo a evitar que os seus terminais entrassem em contato com a água.



Figura 24: Montagem experimental para a medição da capacitância do sensor imerso em ar.



Figura 25: Montagem experimental para a medição da capacitância do sensor imerso em água.

Os resultados experimentais obtidos para o sensor interdigitado de uma face são mostrados na tabela 1, juntamente com os valores das simulações.

*Tabela 1: Valores da capacitância para o sensor interdigitado de uma face.*

	Ar	Água
<b>Simulação</b>	20,9 pF	271,5 pF
<b>Experimental</b>	22,5 pF	987,9 pF

A tabela 2 a seguir mostra os resultados referentes ao sensor de dupla face.

*Tabela 2: Valores da capacitância para o sensor interdigitado de dupla face.*

	<b>Ar</b>	<b>Água</b>
<b>Simulação</b>	23,7 pF	518,6 pF
<b>Experimental</b>	25,8 pF	1702,8 pF

Os valores experimentais da capacitância em seco estiveram em bom acordo com as simulações realizadas. Os erros percentuais foram de 7,65% e de 8,86%, para o sensor de uma e de duas faces, respectivamente. Entretanto, para os sensores imersos em água, os resultados foram discrepantes. Alguns fatores podem ter contribuído para estes resultados: em primeiro lugar, não incluímos o efeito do verniz impermeabilizante na simulação; depois, o valor da constante dielétrica da água, quando da realização do experimento, pode não ter sido 80 (como usado na simulação) devido a variações de temperatura, ou por outro motivo desconhecido. Entretanto, mesmo que de fato tivesse havido uma diferença nesta constante dielétrica, acreditamos que essa diferença não deva ser tão acentuada, a ponto de provocar um desvio tão grande no valor da capacitância; é possível ainda que tenha sido cometido algum equívoco durante o processo de simulação. Porém, a diferença entre a simulação em seco e em água é, essencialmente, o ajuste do valor da constante dielétrica do meio (ar ou água), todos os outros passos da simulação permanecendo semelhantes. O fato de a simulação em seco ter dado bons resultados, faz-nos pensar que a simulação com água também tenha sido realizada corretamente, haja vista que os passos do processo são bastante semelhantes.

Embora os resultados experimentais e das simulações tenham discordado nos valores absolutos, ambos os dados concordaram quanto ao comportamento qualitativo dos dois sensores no que diz respeito à variação da capacitância pela mudança do meio dielétrico. Ambos os resultados apontam que o sensor de dupla face apresenta uma variabilidade maior da capacitância em relação ao de única face, indicando que este sensor possui uma maior sensibilidade às mudanças da constante dielétrica e, conseqüentemente, de umidade. Portanto, ele deve ser capaz de fornecer medidas mais precisas da umidade.

## 5 CONCLUSÃO

O estágio supervisionado como parte da estrutura curricular cumpriu com a meta acadêmica de proporcionar desenvolvimento profissional ao concluinte da graduação, visto que a oportunidade de trabalhar em uma empresa, lidando diariamente com problemas do cotidiano profissional, é uma das formas mais eficientes de consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

Para o trabalho desenvolvido foram requeridas tarefas específicas que só puderam ser realizadas devido ao conhecimento adquirido em várias disciplinas ao longo do curso de graduação, dentre elas podemos destacar Eletrônica e, principalmente, Eletromagnetismo. A empresa por sua vez, teve um papel determinante, fornecendo todas as condições necessárias para que o trabalho fosse realizado com sucesso.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] GRIPP, A. B. **Desenvolvimento de Instrumentação para Aquisição de Dados com Sensores Capacitivos Interdigitados Nanométricos**. (Projeto Final de Curso) – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados, 2010.
- [2] LACERDA, A. S. **Estudo de um Sensor Capacitivo para Medição de Adulteração de Álcool em Combustível Interdigitados Nanométricos**. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- [3] ARAÚJO, O. **Avaliação Econômica e Social de Projetos de Irrigação: O caso do Nordeste Brasileiro**, Dissertação (Mestrado em Economia do Setor Público) Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- [4] <<http://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/trab3.pdf>>. Acesso em 06 de agosto de 2014.
- [5] HEINZE, B. C. L. B., **A Importância da Agricultura Irrigada para o Desenvolvimento da Região Nordeste do Brasil**, Dissertação (Mestrado em Gestão Sustentável) Fundação Getúlio Vargas, Brasília, 2002.
- [6] FONSECA, N. S. S. M. **Relatório de Estágio** (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- [7] GLUCK, et al., **Soil Moisture Sensor**, US Pat. 5.424.649, 13 jun. 1995.
- [8] GRANGE, et al., **Capacitive Humidity Detector With Nanoporous Hydrophilic Dielectric**, US Pat. 8.739.622 B2, 3 jun. 2014.
- [9] HONG, et al., **Capacitive Humidity Sensor and Manufacturing Method**, US Pat. 8.573.052 B2, 5 nov. 2013.
- [10] GRIFFITHS, D.J. **Introduction to Electrodynamics**, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [11] JACKSON, J. D. **Eletrodinâmica Clássica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 2003.
- [12] LEE, W. R.; EDGE, S. **EA Survey and Tutorial of Dielectric Materials Used in The Manufacture of Printed Circuit Boards**. Circuitree Magazine, 1999.
- [13] COMSOL Multiphysics User's Guide, versão 4.3a, 2012.