

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CASSIANO CÉSAR FÜHR

**PROJETO DE UM SENSOR DE UMIDADE DE GRÃOS ATRAVÉS DA
PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE EM MICROONDAS**

Porto Alegre

2019

CASSIANO CÉSAR FÜHR

**PROJETO DE UM SENSOR DE UMIDADE DE GRÃOS ATRAVÉS DA
PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE EM MICROONDAS**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Pr. Dr. Giovani Bulla

Porto Alegre
2019

CASSIANO CÉSAR FÜHR

**PROJETO DE UM SENSOR DE UMIDADE DE GRÃOS ATRAVÉS DA
PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE RESSONANTE EM MICROONDAS**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação, do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela banca examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Giovani Bulla.
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles
Doutor pela University of London - Londres, Inglaterra.

Prof. Dr. Ivan Müller
Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, junho de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais por me darem total liberdade nas minhas decisões durante todos esses anos de graduação. Este projeto representa o esforço despendido durante os longos sete anos dedicados à ciência acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Eng. Giovani Bulla pelo tempo e esforço compartilhados na orientação deste trabalho.

Agradeço também ao meu pai, Volnei Führ, e a minha mãe, Janete Führ, por acreditarem no desenvolvimento desse projeto, financiarem os gastos e me fornecerem total apoio no percorrer da graduação.

RESUMO

A determinação correta do teor de umidade em grãos é um fator importante na produção, armazenamento e comercialização de diversos tipos de grãos e sementes. No presente trabalho, um sensor para a determinação do teor de umidade em soja é proposto. Para tanto, o método de perturbação da cavidade ressonante por variação do dielétrico é utilizado. O desenvolvimento do sensor foi realizando um fluxo de projeto com levantamento de hipóteses e suas validações, juntamente com o auxílio do software CST Studio, onde foram definidas as dimensões da cavidade, método de acoplamento, tamanho e posicionamento da amostra. A cavidade foi posteriormente fabricada no formato cilíndrica, fechada em ambas as extremidades, alimentada com uma antena posicionada na lateral da cavidade, modo de ressonância TE_{111} e com frequência de ressonância em torno de 2450MHz para uma amostra com 17% de umidade. Para comprovar as simulações foram realizados testes práticos, a quantidade de nove amostras de soja pré-limpos, com variação de umidade entre 6,02% e 22,2% de umidade em base seca foram utilizadas. A medição do parâmetro S_{11} foi realizada através de um analisador de espectro. Para cada amostra de grãos foi medida a frequência de ressonância e assim ter-se uma curva de calibração linear entre frequência de ressonância e teor de umidade em base seca. A curva de calibração obteve $R^2=0,989$, o que mostra que o sensor de cavidade ressonante é um método viável para medição de umidade em grãos.

Palavras chaves: Cavidade Ressonante, TE111, 2,45 GHz, Umidade em Grãos, Soja.

ABSTRACT

The correct determination of moisture content in grains is an important factor in the production, storage and commercialization of different types of grain and seeds. In this present work, a soybean moisture content sensor is proposed. For this purpose, the resonant cavity perturbation by variation of dielectric method is used. The development of the sensor is using a project flow with hypothesis and its validations, along with the aid of the software CST Studio, where the dimensions of the cavity, coupling method, size and positioning of the sample were defined. The cavity was later manufactured in cylindrical form, closed at both ends, fed with an antenna positioned at the side of the cavity, resonance mode TE₁₁₁ and with resonant frequency at around 2450MHz for a sample with 17% of moisture content. To verify the simulations were performed practical tests with the amount of nine pre-cleaned soybean bulk samples, with moisture variation between 6.02% and 22.2% moisture on dry basis were used. The measurement of parameter S₁₁ was performed through a spectrum analyzer. For each bulk grains sample, the resonance frequency was measured to obtain a linear calibration curve between resonance frequency and dry basis moisture content. The calibration curve obtained $R^2 = 0.989$, which shows that the resonant cavity sensor is a viable method for grain moisture measurement.

Keywords: Cavity Resonator, TE₁₁₁, 2.45 GHz, Grain Moisture Content, Soybean.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens do sensor microondas ressonante para aquametria	16
Tabela 2 – Desvantagens do sensor microondas ressonante para aquametria.....	17
Tabela 3 - Valores de μ_{nm}	23
Tabela 4 - Valores de μ'_{nm}	24
Tabela 5 – Razão entre a frequência do modo sobre a menor frequência para cada relação de raio a e comprimento h para uma cavidade circular.....	24
Tabela 6 - Frequências de ressonâncias para cavidade preenchida com ar.	40
Tabela 7 - Amostras e suas respectivas umidades.	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resposta ao campo eletromagnético de um líquido hipotético como uma função da frequência, mostrando o significado físico das várias regiões do espectro.	19
Figura 2 - Amostra de grãos pode ser considerada como uma mistura de ar, água e matéria seca	20
Figura 3 – Modelo de cavidade cilíndrica	22
Figura 4 – Distribuição dos modos ressonantes de uma cavidade cilíndrica.	25
Figura 5 - As mais frequentes configurações de acoplamento do sinal à cavidade (a) Sonda, (b) “Loop”, (c) Fenda elétrica, (d) Fenda magnética	26
Figura 6 - Curva de ressonância com detalhe do fator de qualidade medido em -3dB do pico.	28
Figura 7 – Curva de ressonância mostrando a dependência do conteúdo de umidade.....	29
Figura 8 – Esquema de funcionamento do sensor de umidade e densidade com perturbação da cavidade ressonante por variação do dielétrico.	31
Figura 9 - Modelo de permissividade complexa para sementes de soja. Umidade em base úmida e frequência para as frequências de 2000, 2500 e 3000MHz, respectivamente, curvas azul, vermelho e amarelo.	34
Figura 10 - Distribuição de campo eletromagnético dentro de uma cavidade ressonante cilíndrica projetada para ressonar no modo TE ₁₁₁	36
Figura 11 - Distribuição dos modos com detalhe da razão escolhida do modo TE ₁₁₁	37
Figura 12 - Representação da cavidade ressonante, em corte da vista superior, com o recipiente contendo a amostra de grãos ao centro.	38
Figura 13 - Distribuição do campo elétrico em uma cavidade ressonante cilíndrica, modo TE ₁₁₁ com detalhe da posição do ponto máximo do campo elétrico.	38
Figura 14 – Vistas em corte da cavidade ressonante com a distribuição e orientação do campo elétrico para o modo TE ₁₁₁ na simulação por EigenMode.	40
Figura 15 - Projeto 3D final da cavidade ressonante no CST.	41
Figura 16 - Parâmetro S ₁₁ para a cavidade ressonante com amostras de grãos entre 8% e 26% de umidade.....	42
Figura 17 - Fluxograma sugerido para desenvolvimento de sensor baseado em cavidade ressonante.	44
Figura 18 - Cavidade cilíndrica sem a tampa e destaque para o acoplamento.	45

Figura 19 - Cavidade ressonante acoplada ao analisador de espectro e com a amostra inserida em seu interior.	46
Figura 20 - Amostras de grãos preparadas.	47
Figura 21 - Resultados da cavidade ressonante para as nove amostras, parâmetro de reflexão S11 versus frequência.	48
Figura 22 - Resultados e simulações para quatro amostras escolhidas. Simulação são as curvas tracejadas e os resultados experimentais estão como linhas contínuas.	49
Figura 23 - Frequência de ressonância dos dados experimentais com regressão linear.	50
Figura 24 - Cavidade ressonante acoplada ao analisador de espectro. Vista superior.	55
Figura 25 - Cavidade ressonante acoplada ao analisador de espectro. Vista lateral.	55

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical radio bands</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MUT	<i>Material Under Test</i> (Material sob teste)
TE	Transversal elétrico
TM	Transversal magnético
TEM	Transversal eletromagnético
VIM	Vocabulário Internacional de Medidas

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	TERMINOLOGIA.....	13
1.2.	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	13
1.3.	SENSORES DE UMIDADE DE GRÃOS	14
1.3.1.	AQUAMETRIA POR RESSONÂNCIA.....	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1.	PERMISSIVIDADE E POLARIZAÇÃO	18
2.2.	PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS GRÃOS	19
2.2.1.	Dependência da temperatura.....	20
2.2.2.	Dependência da densidade.....	21
2.3.	CAVIDADE RESSONANTE	21
2.3.1.	Distribuição dos modos TM e TE.....	23
2.3.2.	Métodos de acoplamento	25
2.4.	PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE POR VARIAÇÃO DO DIELÉTRICO	27
3.	PROJETO DO SENSOR	31
3.1.	MEDIDOR DE UMIDADE DE GRÃO.....	31
3.2.	MODELO DE PERMISSIVIDADE.....	32
3.3.	PROJETO DA CAVIDADE.....	34
3.3.1.	Definição do modo de excitação e dimensões da cavidade.....	35
3.3.2.	Definição do tipo de acoplamento	38
3.4.	SIMULAÇÃO	39
3.4.1.	Simulação por <i>EigenMode</i>	39
3.4.2.	Simulação por <i>Frequency Domain Solver</i>	40
3.5.	FLUXO DO PROJETO	42
4.	EXPERIMENTO	45
4.1.	CAVIDADE UTILIZADA.....	45
4.2.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	46
4.3.	RESULTADOS	48
5.	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	ANEXO A: IMAGENS DO EXPERIMENTO	55

1. INTRODUÇÃO

1.1. TERMINOLOGIA

Grão: Este termo indica várias categorias de produtos agrícolas. Inclui sementes pequenas, duras e secas com ou sem cascas, que são colhidas para consumo humano ou animal. Neste documento, grão significa uma parte dos produtos agrícolas usados como amostra a ser medida com um medidor de umidade ou um método de referência. Arroz, trigo, cevada, milho, sementes oleaginosas e leguminosas são exemplos típicos de grãos. Ainda, aqui neste documento cereal e semente são consideradas sinônimos de grão.

Umidade: O teor ou conteúdo de umidade em um material sólido ou líquido pode ser medido em base seca ou base úmida. Base úmida é a relação da massa de água e substâncias aquosas à massa total da amostra. Base seca é a relação da massa de água e substâncias aquosas à massa de matéria seca da amostra. Neste documento é definido teor de umidade a medida feita em base úmida, obtido por
$$Umidade(\%) = \frac{massa\ de\ água}{massa\ total} \cdot 100.$$

Calibração: Segundo o item 2.39 do VIM (vocabulário internacional de medidas), Calibração é a “Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação”. Em outras palavras, a calibração é o conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados no processo de medição e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

1.2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O Brasil é conhecidamente um enorme produtor de grãos e exportador de alimentos no cenário mundial. Segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola – LSPA, do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), a safra 2018 é de 229,3 milhões de

toneladas de cereais leguminosas e oleaginosas, 4,7% menor do que total obtido em 2017, ano que o Brasil bateu recorde na produção de grãos.

Com toda essa produção e comercialização de cereais é muito importante determinar corretamente o percentual de água no interior das sementes, em virtude que, a grandeza básica de comercialização de grãos é massa, ou mais especificadamente, saca de 60kg (sessenta quilogramas). Para cada tipo de grão há máximos de umidade definidos como padrão para comercialização, para a soja o percentual máximo recomendado é de 14% (catorze por cento) (MAPA, 2007). Portanto, na hora da comercialização do produto, percentuais de umidade superiores causarão descontos proporcionais a fim de corrigir a massa de água presente nos grãos.

Além do aspecto financeiro, o teor de umidade é considerado o fator mais importante para a manutenção da qualidade física, fisiológica e sanitária das sementes. Através do conhecimento dessa característica pode se identificar problemas que venham a ocorrer no armazenamento, e assim escolher procedimentos, por exemplo a secagem artificial, que solucionam tais inconvenientes (MARCOS FILHO et al., 1987).

Sumariamente, todos esses pontos apresentados, destacam a enorme importância na determinação da umidade de sementes em três principais utilidades:

- Escolha do momento certo para colheita;
- Qualidade no armazenamento e secagem;
- Comercialização de cereais.

1.3.SENSORES DE UMIDADE DE GRÃOS

Na medição de umidade de grãos os métodos são divididos em duas categorias: diretos e indiretos. Segundo Puzzi (2009), os métodos diretos determinam o teor de umidade pela remoção do conteúdo de água. Enquadram-se nesta categoria os métodos de estufa, destilação, infravermelhos e Karl Fisher. Os métodos indiretos utilizam as propriedades elétricas dos grãos, capacitância ou resistência, para a determinação do teor de umidade (PUZZI, 2009).

No Brasil, o método oficial para determinação de umidade é o de estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, estabelecido pelo Ministério da Agricultura (BRASIL, 2009). Suprindo uma demanda da classe que comercializa e exporta grãos, após 1º de outubro de 2017, o INMETRO (2013) regulamenta os medidores de umidade utilizados em transações comerciais, seja eles fabricados no país ou importados. A portaria trata de regulamentar os medidores de umidade

de grãos de leitura direta em amostras estáticas para efeitos de comercialização de feijão, arroz, café, milho e soja, grãos de maior relevância econômica. Nacionalmente encontra-se apenas um medidor de umidade de grãos regulamentado, modelo G1000, marca Gehaka (INMETRO / DIMEL, 2017). Tal medidor utiliza o princípio de medição capacitivo com uma resolução de 0,1% ou 0,01% (selecionável), valor de divisão de 0,1% e intervalo de medição de 10% a 16% para arroz com casca, café verde, feijão e soja, ainda, intervalo de medição de 12% a 18% para milho.

1.3.1. AQUAMETRIA POR RESSONÂNCIA

Determinação do conteúdo de umidade, mais precisamente a quantificação da fração de água líquida em sólidos ou líquidos, é conhecida por aquametria (NAYLON, 2011). Aquametria há muito tempo foi estudada nas frequências de microondas. O pioneiro nesse trabalho, Andrzej Krazewsky (1977) já estudava a relação do conteúdo de umidade em trigo com as interferências que uma micro-onda sofre ao atravessar uma amostra. Além disso, Krazewsky possui centenas de trabalhos publicados onde investiga aquametria por ressonância em produtos alimentares e agrícolas. Recentemente, Kaaze (2010) traz uma ampla pesquisa sobre sensores ressonantes em microondas em diversos materiais com múltiplas configurações e circuitos. Inúmeros autores têm publicado centenas de trabalhos listando as vantagens de sensores microondas ressonantes, Naylon (2011) elabora uma síntese das vantagens de aplicar o sensor em aquametria.

A Tabela 1 reúne as vantagens com sua descrição aplicada à medição de umidade de grãos. Igualmente, o autor cita as desvantagens de usar o sensor microondas ressonante em aquametria. A Tabela 2 reúne as desvantagens aplicadas à medição de umidade de grãos.

Tabela 1 – Vantagens do sensor microondas ressonante para aquametria

Vantagem	Descrição
Alto contraste	A água tem a permissividade elétrica ao menos 10 vezes maior que matéria orgânica seca. Esta superioridade indica que a presença de água pode ser identificada com um nível de precisão mesmo com múltiplas composições da matéria seca.
Não destrutivo	Ao contrário dos métodos onde a massa de água é retirada por aquecimento, aquametria por ressonância não afeta a qualidade da amostra medida.
Sem contato	Visto que apenas o campo elétrico do sensor deve alcançar a amostra, não é necessário o operador entrar em contato com o material sob teste. Tal característica é ideal para sensores em linhas de produção.
Menos sensível a condutividade iônica	Visto que a condutividade iônica é fortemente dependente da temperatura e da composição, ela tende influenciar em baixas frequências. Como o efeito da condutibilidade iônica é inversamente proporcional a frequência, em microondas a sua interferência é muito menos significativa, particularmente em comparação com a água, resultando numa enorme robustez.
Pode ser independente da densidade	Várias maneiras foram criadas para tornar as medições de umidade de microondas independentes da densidade da amostra, o que dá aos sensores de microondas uma grande vantagem sobre os métodos de aquametria baseados em densidade quando tal fator da amostra não pode ser garantido.

Fonte: adaptado de Naylor (2011, p. 20)

Tabela 2 – Desvantagens do sensor microondas ressonante para aquametria

Desvantagem	Descrição
Alto custo dos componentes	Componentes de alta frequência (cabos, conectores, amplificadores, etc.) são mais caros que componentes de rádio frequência. Embora certas bandas de frequência usadas para comunicação possuam um valor inferior devido à sua produção em massa, ainda assim são mais caras que o equivalente em baixa frequência.
Dimensões elevadas do equipamento	Muitos equipamentos miniaturizados dependem de sistemas e instrumentos de bancadas para alcançar uma precisão desejada. Cavidades ressonantes não podem ser arbitrariamente pequenas pois isso diminuirá o fator de qualidade, visto que, tal característica é dependente da área superficial, ou ainda, cavidade muito pequena possui uma elevada frequência de ressonância.
Baixa especificação	Por causa que a permissividade de um material “seco” é inicialmente desconhecida e geralmente apresentam respostas não lineares com misturas de água, o conteúdo de umidade é inerentemente impreciso. O método mais utilizado para prover uma leitura precisa é caracterizar o sensor com misturas de material-água, comparar com algum método de referência, e assim obter uma curva de calibração.
Sensível à temperatura	Com água, o coeficiente de temperatura da permissividade é relativamente grande na faixa microondas. Entretanto, um preciso controle da temperatura em experimentos de aquametria é particularmente importante. Geralmente é difícil determinar a temperatura exata de uma amostra dentro do sensor microondas ressonante, e a diferença de temperatura entre amostra e o interior da cavidade é inevitável. Então, até a introdução da amostra dentro da cavidade pode alterar a sua temperatura e resultar em uma fonte de erro experimental.
Sensível à variação do meio ambiente	Tal quanto a temperatura, uma variedade de variáveis do ambiente, como, umidade do ar, pressão de contato, presença de outros materiais na amostra (contaminantes, ar, etc.) podem ter um efeito significativo ambos na amostra e no próprio ressonador. Isto geralmente implica em sensores adicionais para compensação de tal variável ou processos especiais tornam-se necessários para minimizar influências externas.

Fonte: adaptado de Naylor (2011, p. 22-23)

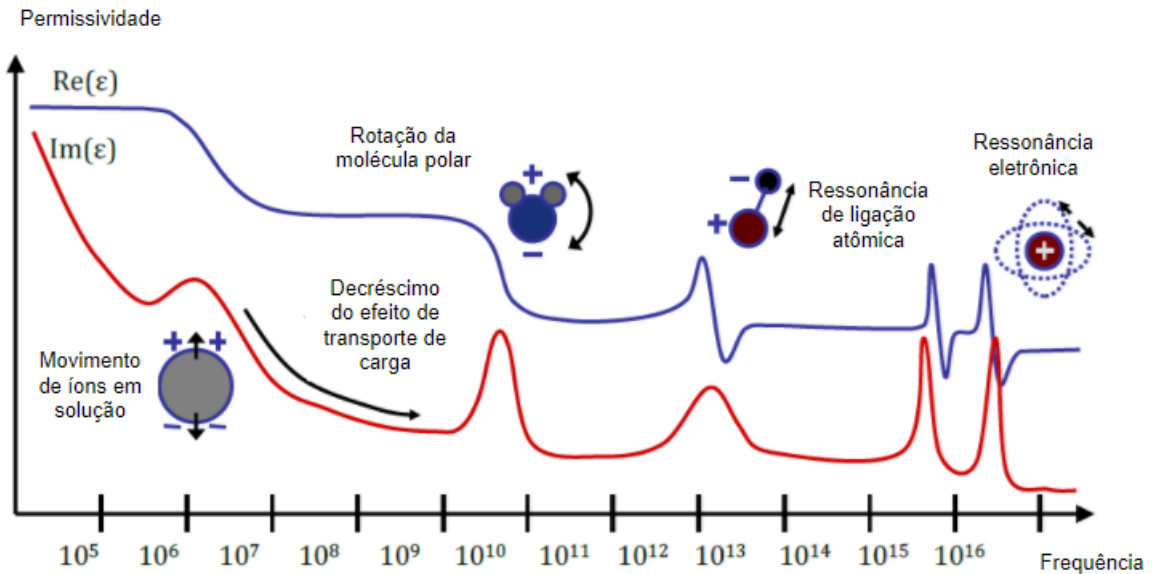
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PERMISSIVIDADE E POLARIZAÇÃO

A característica elétrica de cada material depende de suas propriedades dielétricas. A permissividade de um material descreve a interação deste material com um campo elétrico e pode variar com a frequência, temperatura, orientação, composição da mistura, pressão e a estrutura molecular do material (AGILENT, 2006). Sendo um valor complexo, sua parte real é uma medida de quanta energia de um campo elétrico externo é armazenada em um certo material e sua parte imaginária representa o quão dissipativo este material é na presença de um campo elétrico externo. Segundo Callister e Rethwisch (2011), a polarização pode ser entendida como o alinhamento de momentos de dipolo molecular, induzido ou permanente quando um campo elétrico externo é aplicado. Existem três tipos de polarização: eletrônica, iônica e orientacional. A polarização eletrônica ocorre devido ao deslocamento do centro da nuvem de elétrons, carregada negativamente, em relação ao núcleo positivo de um átomo pelo campo elétrico. O segundo tipo ocorre apenas em materiais que são iônicos, resultando da presença de um campo deslocando cátions em uma direção e ânions na direção oposta, o que dá origem a um momento de dipolo. A polarização orientacional ocorre apenas em substâncias que possuem momento de dipolo permanente, resultando do alinhamento dos momentos de dipolo permanente à direção do campo aplicado. A polarização total será a soma da contribuição de cada um dos três tipos de polarização (CALLISTER; RETHWISCH, 2011).

No caso de um material dielétrico sob efeito de um campo elétrico alternado, com cada mudança na direção do campo, os dipolos irão tentar se realinhar com o campo, processo que requer um certo tempo. O tempo mínimo necessário para o dipolo se reorientar é chamado de 'tempo de relaxação' e este tempo varia com o tipo de polarização, dependendo da facilidade com que cada tipo de dipolo é capaz de se realinhar. Caso a frequência com que o campo alterna for maior que a frequência de relaxação, recíproco do tempo de relaxação, o dipolo deixa de acompanhar as mudanças de direção do campo, e assim, deixa de contribuir para a constante dielétrica do material. Dessa forma, quando um mecanismo de polarização deixa de atuar, ocorre uma diminuição na constante dielétrica (permissividade relativa), como ilustrado na Figura 1. (CALLISTER; RETHWISCH, 2011).

Figura 1 - Resposta ao campo eletromagnético de um líquido hipotético como uma função da frequência, mostrando o significado físico das várias regiões do espectro.



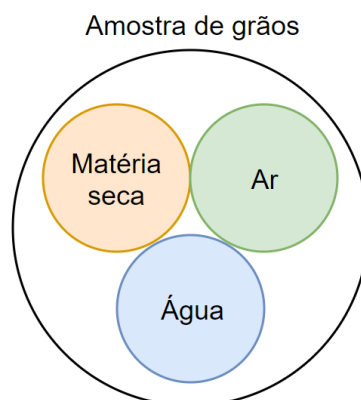
Fonte: adaptado de NAYLON, 2011.

2.2. PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS GRÃOS

Um conhecimento melhor das propriedades dielétricas dos produtos agrícolas e as técnicas de medidas das suas propriedades é cada vez mais necessário, afim de permitir o desenvolvimento de ferramentas de detecção melhoradas, seja para o controle e automação de processos agrícolas como alimentares. O interesse histórico pelas propriedades dielétricas dos materiais foi associado com o projeto de equipamentos tendo o objetivo de encontrar suas componentes dielétricas, como constante dielétrica e fator de perda. No entanto, essas propriedades são uma ferramenta intermediária para entender, explicar e conectar de maneira empírica certas propriedades físico-químicos de algum material dado, por exemplo a umidade de grãos, objetivo desse trabalho.

Em materiais higroscópicos como produtos agrícolas e alimentos, a quantidade de água nesses materiais é geralmente o fator dominante na permissividade resultante. Uma amostra granular pode ser apresentada como uma mistura de matéria seca, ar e água, representado na Figura 2.

Figura 2 - Amostra de grãos pode ser considerada como uma mistura de ar, água e matéria seca



No estudo da umidade em matérias biológicas é considerado que a água está contida em uma das três formas abaixo:

- (1) Água de cristalização: moléculas de água que compõe uma parte das moléculas da base do material. A água é extremamente necessária para manter a estrutura da base molecular.
- (2) Água absorvida: moléculas de água que se ligam à superfície da molécula base. Elas têm um papel importante na proteção das moléculas base.
- (3) Água livre: Água contida em um nível de estrutura macroscópica. Esta forma de água pode causar deterioração por bactéria.

Quando a umidade da amostra é baixa, a predominância da água está na forma de água absorvida. O comportamento da água absorvida em materiais biológicos ainda não é muito bem entendido e o melhor método é um experimento empírico da dependência das propriedades dielétricas com essas características físicas. A água nas formas (1) ou (2) congela muito abaixo de 0°C e é difícil de remover ela utilizando processo de aquecimento. Assim, quando se diz amostra seca de grãos, significa uma amostra de grãos sem água livre.

As propriedades dielétricas dependem também da frequência do campo elétrico aplicada, a temperatura do material, além da densidade e estrutura do material. Em materiais ou partículas granulares, a densidade granular da mistura ar-partícula é outro fator que influencia as propriedades dielétricas (NELSON, 1991).

2.2.1. Dependência da temperatura

A natureza da dependência da temperatura na permissividade elétrica é em função do fenômeno de relaxamento sobre certas condições e frequência da onda eletromagnética. De

acordo com o aumento da temperatura, o tempo de relaxamento diminui, e o pico em ε'' ilustrado na Figura 1 se desloca para frequências maiores. Então, em uma região de dispersão, a permissividade irá aumentar com o aumento da temperatura. Ao passo que ε'' pode igualmente aumentar ou diminuir, dependendo se a frequência de operação é maior ou menor que a frequência de relaxamento. Em frequências abaixo da região de dispersão, a permissividade diminui com o aumento da temperatura. Funções de distribuição podem ser úteis em expressar a dependência da temperatura das propriedades dielétricas, no entanto, esta relação entre frequência e temperatura da maioria dos materiais é complicada e talvez o melhor seja determinar a permissividade na frequência e condições de temperatura de interesse e operação do sensor (NELSON, 1991).

2.2.2. Dependência da densidade

A densidade de uma amostra de grãos é computada pela razão entre a massa total pelo seu volume. Em seu trabalho, TRABELSI et al (2001), estudaram a relação da densidade da amostra com a permissividade elétrica, baseado na interação de ondas eletromagnéticas com materiais ou partículas granulares, precisamente, amostras de trigo, aveia, soja e milho foram analisadas. Os autores identificaram que características físicas como tamanho e geometria do grão, e até certo ponto a composição influenciam na interação entre onda eletromagnética para uma dada frequência e temperatura.

A densidade aparente, massa específica, peso hectolitro e densidade granular são sinônimos, em inglês, *bulk density*. É a razão entre a massa e o volume de uma amostra de grãos. O método de referência utilizado é preencher um recipiente de 500cm³ com os grãos e após obter a massa dessa amostra. É geralmente expressa em g/cm³, ou ainda kg/cm³ e especificamente para peso hectolitro, kg/hl. A densidade está claramente relacionada com a umidade. Quanto mais umidade, mais água presente nos grãos e assim mais pesada a amostra se torna.

2.3. CAVIDADE RESSONANTE

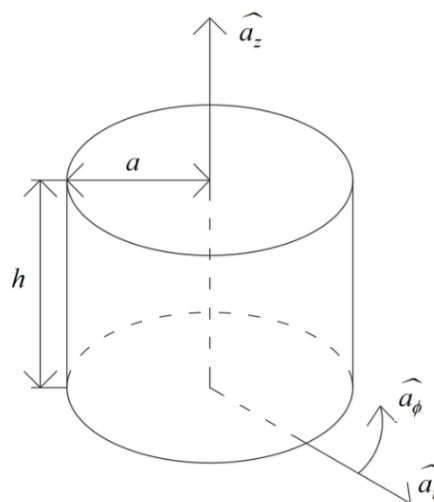
Cavidades ressonantes consistem em um mecanismo onde um trecho de guia de onda, possui geralmente, ambas extremidades fechadas por um material condutor. Esse trecho finito

de guia de onda, através de um circuito externo é então devidamente excitado com alguma forma de acoplamento, o que será discutido na seção 2.3.2.

A condição de ressonância ocorre se o campo da fonte de excitação está em fase com as componentes refletidas. Consequentemente, irá ocorrer interferência entre os campos, construtivamente e destrutivamente, originando assim, o padrão de onda estacionária. Uma onda estacionária com um campo forte surgirá, armazenando assim uma grande quantidade de energia. O equilíbrio é alcançado quando a energia dissipada no ressonador (no metal ou dielétrico, por radiação, ou fuga pelo acoplamento) é igual a energia de excitação. Na ressonância, a energia altera entre o campo elétrico e magnético, os quais contém a mesma quantia de energia. (NYFORS, 2000, p. 23).

Cavidades ressonantes possuem diversas formas geométricas e entre as mais comuns se destacam as cavidades ressonantes retangulares e as cavidades ressonantes cilíndricas. De acordo com Balanis (2012), as cavidades cilíndricas possuem um fator de qualidade superior (em algumas unidades percentuais) às geometrias retangulares. Segundo o autor, isto se deve ao fato da geometria cilíndrica não possuir cantos afiados e arestas. No âmbito de confecção de um sensor de cavidade ressonante, a cavidade cilíndrica leva vantagem por possuir uma fabricação mais fácil em relação a cavidade retangular. Com base nesses aspectos é definido que o sensor será uma cavidade cilíndrica como representado na Figura 3.

Figura 3 – Modelo de cavidade cilíndrica



A análise de cavidades ressonantes é feita utilizando-se as equações de Maxwell escritas no sistema de coordenadas adequado à forma geométrica da cavidade, então é imposto as condições de contorno que as paredes da cavidade implicam. No caso ideal, em que as paredes são condutoras perfeitas, sabemos que a componente tangencial do vetor campo elétrico da

onda deve se anular nesta superfície. Cada configuração espacial de campo que satisfaz as condições de contorno caracteriza um modo de excitação possível na cavidade ressonante.

Existem dois modos possíveis em guias de ondas metálicos e cavidades ressonantes:

- Modos TE (ou tipo H): ocorrem quando a única componente longitudinal é a do campo magnético, estando todo o campo elétrico no plano transversal à propagação. Supondo propagação na direção “z”, teremos, neste caso, $H_z \neq 0$ e $E_z = 0$.
- Modos TM (ou tipo E): neste caso, tem-se $E_z \neq 0$ e $H_z = 0$.

2.3.1. Distribuição dos modos TM e TE

Cavidades ressonantes apresentam vários modos de ressonância que dependem de sua geometria e modo de excitação. As frequências de ressonância para uma cavidade cilíndrica são deduzidas por Pozar (1998), as Equações (1) e (2), para os modos TM e TE, respectivamente.

$$f_{TM, nmp} = \frac{c}{2\pi a \sqrt{\epsilon'_r}} \sqrt{\mu_{nm}^2 + (p\pi a/h)^2} \quad (1)$$

$$f_{TE, nmp} = \frac{c}{2\pi a \sqrt{\epsilon'_r}} \sqrt{\mu'_{nm}{}^2 + (p\pi a/h)^2} \quad (2)$$

Em que μ_{nm} é m^a raiz da função de Bessel de primeira ordem, enquanto μ'_{nm} é m^a raiz da derivada da função de Bessel, a letra c representa a velocidade da luz. Os valores das raízes de Bessel e da derivada de Bessel são encontrados na Tabela 3 e na Tabela 4. Vale destacar que para o modo TE, o índice inteiro p deve ser estritamente positivo pois um valor nulo produz soluções triviais, Rydholm (2015).

Tabela 3 - Valores de μ_{nm} .

$m \setminus n$	0	1	2
1	2,41	3,83	5,13
2	5,52	7,02	8,42
3	8,65	10,17	11,62

Tabela 4 - Valores de μ'_{nm} .

$m \setminus n$	0	1	2
1	3,83	1,84	3,05
2	7,02	5,33	6,71
3	10,17	8,54	9,97

As equações das frequências foram ajustadas para ficarem em função da relação a/h , ou seja, raio sobre altura da cavidade. Esta relação é usada para obter os modos dominantes em uma cavidade, que segundo Diniz (1973), é o modo que corresponde à frequência de ressonância mais baixa. A Tabela 5 apresenta os valores da razão entre a frequência dos 7 modos primeiros modos sobre a frequência do modo dominante para algumas relações de geometria, mais especificadamente, a razão entre altura e raio da cavidade cilíndrica.

Da Tabela 5 pode se concluir que, em uma cavidade cilíndrica, o modo TM_{010} é o modo dominante onde a cavidade apresenta a relação $h/a \leq 2$, enquanto que o modo TE_{111} é o modo dominante para a condição $h/a \geq 2$. É importante assinalar a existência de modos com configurações de campos diferentes, mas mesma frequência de ressonância. Estes modos são conhecidos como modo degenerados. Como exemplo, em cavidades cilíndricas pode se citar os modos TM_{111} e TE_{011} , Diniz (1973).

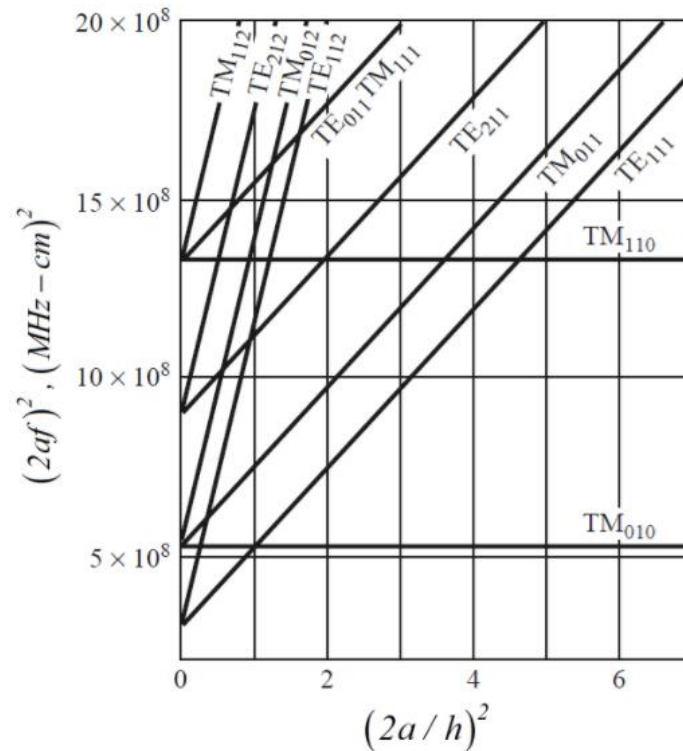
Tabela 5 – Razão entre a frequência do modo sobre a menor frequência para cada relação de raio a e comprimento h para uma cavidade circular.

h/a	TM_{010}	TE_{111}	TM_{110}	TM_{111} TE_{011}	TE_{112}	TM_{020}
0	1,00	∞	1,59	∞	∞	2,29
0,5	1,00	2,72	1,59	3,06	5,27	2,29
1,0	1,00	1,50	1,59	2,05	2,72	2,29
2,0	1,00	1,00	1,59	1,72	1,50	2,29
3,0	1,13	1,00	1,80	1,87	1,32	2,60
4,0	1,20	1,00	1,91	1,96	1,20	3,00
∞	1,31	1,00	2,08	2,08	1,00	3,00

Fonte: adaptado de Diniz (1973).

Destacando, na denominação dos modos, o primeiro índice subscrito é o número do modo azimutal, ele é zero para modos simétricos em sua circunferência. O segundo índice é número do modo radial. O terceiro índice é o número de modo longitudinal. A Figura 4 apresenta a distribuição dos principais modos ressonantes utilizados nas cavidades cilíndricas.

Figura 4 – Distribuição dos modos ressonantes de uma cavidade cilíndrica.



Fonte: adaptado de Pozar, 1998.

2.3.2. Métodos de acoplamento

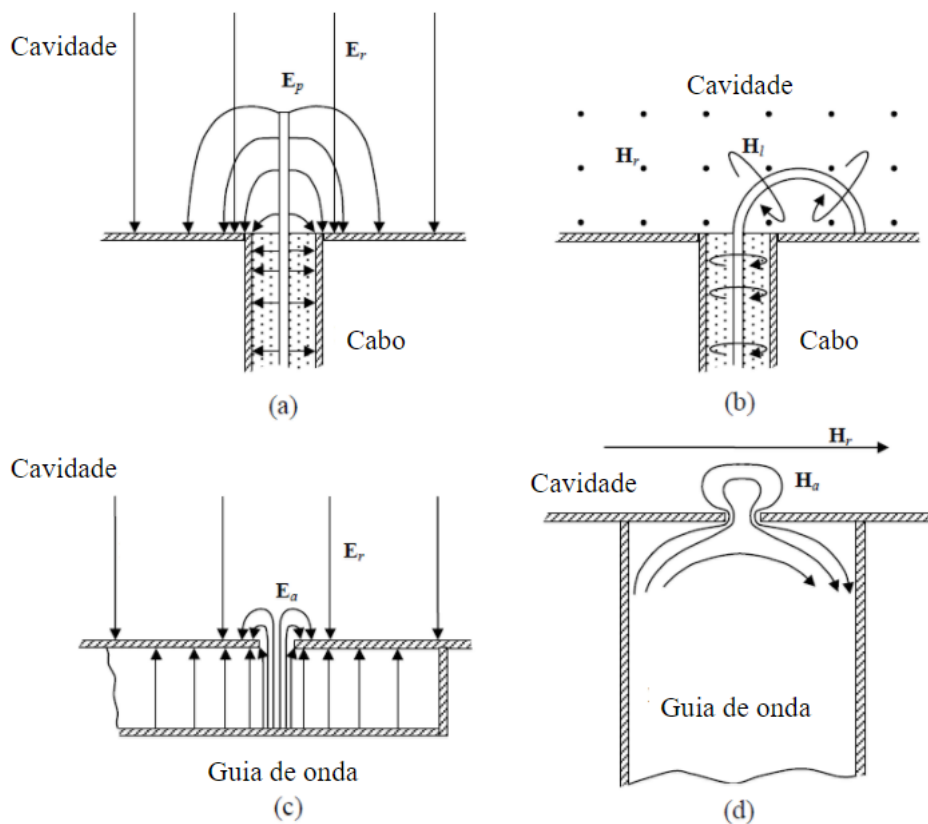
Para ser possível realizar medidas, a cavidade ressonante deve ser acoplada à circuitos eletrônicos externos através de acopladores. Os diversos métodos de acoplamento são utilizados para transferir energia da linha de transmissão à cavidade ressonante. Se o método de medida do coeficiente de reflexão é usado, apenas um acoplador é necessário, e dois no caso de medida do coeficiente de transmissão. As escolhas do método de acoplamento são, no entanto, as mesmas para ambos métodos de medida. A Figura 5 mostra os principais métodos de acoplamento utilizados para extrair medidas de cavidades ressonantes. Um dispositivo de acoplamento gera um campo eletromagnético que, em muitos casos, pode ser modelado aproximadamente por um momento de dipolo elétrico ou magnético, que acopla o campo correspondente do modo de ressonância.

Acoplamento por sonda

O acoplamento por sonda é formado por estender o cabo coaxial com uma pequena distância dentro da cavidade ressonante. O comprimento dessa sonda é pequeno comparado ao comprimento de onda. A corrente na sonda é pequena, mas a tensão cria um campo elétrico

entre a sonda e a parede adjacente do ressonador. Este campo elétrico radia energia dentro da cavidade como uma pequena antena monopolo. A sonda acopla o campo elétrico que é perpendicular à parede onde a sonda se localiza. O acoplamento é mais forte quanto mais próximo de um campo máximo em que a sonda está localizada. O acoplamento a modos indesejados pode ser evitado pela localização de pelo menos uma das sondas em um local, onde o campo elétrico de tal modo é zero, Li (2010).

Figura 5 - As mais frequentes configurações de acoplamento do sinal à cavidade
(a) Sonda, (b) “Loop”, (c) Fenda elétrica, (d) Fenda magnética



Fonte: adaptado de Nyfors, 2000.

Acoplamento por “loop”

O acoplamento por *loop* é formado por estender o cabo coaxial com uma certa distância, realizar uma curva e soldar na parede da cavidade, o centro do laço está localizado a meio caminho entre as paredes superior e inferior da cavidade. O tamanho da curva é pequeno em comparação com o comprimento de onda, portanto a tensão é quase nula, embora, a corrente é grande e a impedância de entrada é quase equivalente à de um curto-circuito. A corrente gera um campo magnético que irradia como um dipolo magnético tangencial à parede. O momento dipolar é proporcional à área do loop. A radiação acopla o campo magnético de algum modo

de ressonância que é tangencial à parede e perpendicular ao plano do laço. Portanto, a orientação do loop também é importante, Li (2010).

Acoplamento por fenda

Fendas de acoplamentos, também chamadas de íris ou abertura, são colocadas em guias de onda que servem como linha de transmissão para alimentar a cavidade ressonante. Dependendo da localização da abertura na guia de onda, o campo magnético tangencial ou o campo elétrico normal irão passar pela abertura e alimentar a cavidade. A força do acoplamento é dependente do raio de abertura dessa fenda, e naturalmente de sua localização com respeito ao modo de ressonância e direção do campo elétrico ou magnético, Li (2010).

2.4. PERTURBAÇÃO DA CAVIDADE POR VARIAÇÃO DO DIELÉTRICO

Há dois parâmetros que são importantes para descrever um ressonador: a frequência de ressonância e o fator de qualidade. O último é geralmente referido como fator Q ou apenas Q. A Equação (3) contém a definição do fator de qualidade. Um alto fator de qualidade indica uma alta precisão do ressonador com uma estreita banda de frequência.

$$Q = \omega_0 \frac{W}{P_L} \quad (3)$$

Onde ω_0 é a frequência de ressonância angular, W é o total de energia eletromagnética armazenada na cavidade, e P_L é média da energia dissipada por unidade de tempo

. Assim, o fator Q é uma medida das perdas de energia do ressonador, Pozar (1998).

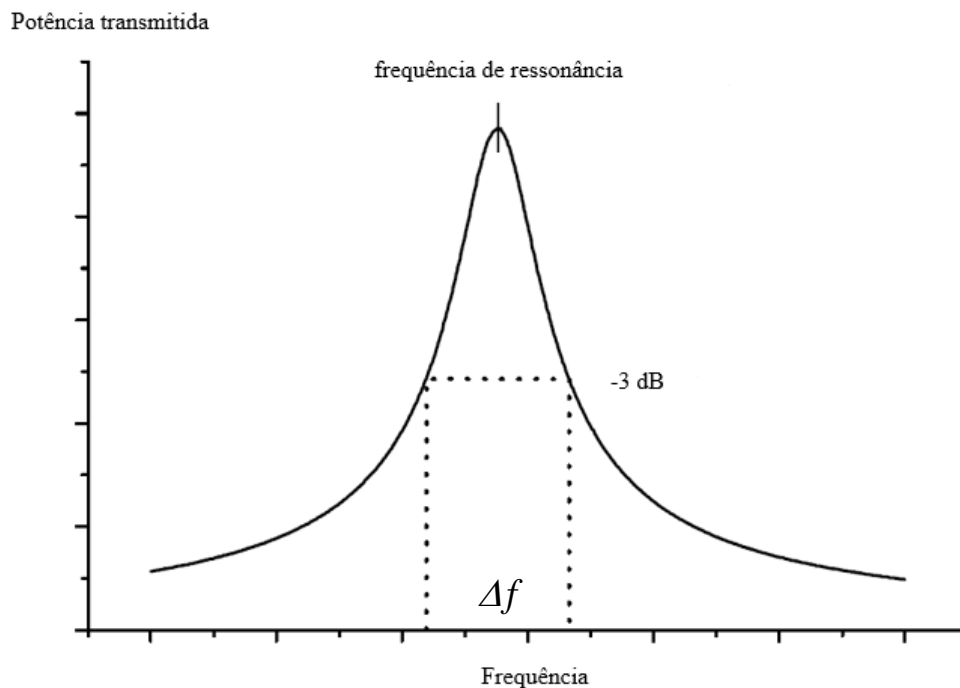
As contribuições para o cálculo do fator de qualidade partem das suas componentes, ou seja, as perdas são uma soma entre as perdas por condução nas paredes da cavidade com as perdas do material dielétrico que preenche a cavidade. Fica claro assim que introduzir um material com perdas diminui o Q do ressonador. Na prática, o ressonador tem que ser conectado à um circuito externo que produzirá um efeito de diminuir o fator de qualidade do sistema. Então, o fator de qualidade agora chamado de fator de qualidade carregado, Q_L , pode ser decomposto entre o fator de qualidade à vazio, Q_0 , com o fator de qualidade externo, Q_E , demonstrado na Equação (4).

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_O} + \frac{1}{Q_E} \quad (4)$$

Para poder medir o fator de qualidade é necessário realizar uma varredura em frequência na banda de ressonância. O fator de qualidade para certo modo é obtido da largura do correspondente pico. Mais precisamente, conforme demonstrado na Figura 6, é medido a largura de frequência (Δf) onde a amplitude da onda é 3 dB menor que o máximo da frequência central, e então, a frequência de ressonância é dividida por tal valor, matematicamente descrito na Equação (5) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde f_0 é a frequência de ressonância, Pozar (1998).

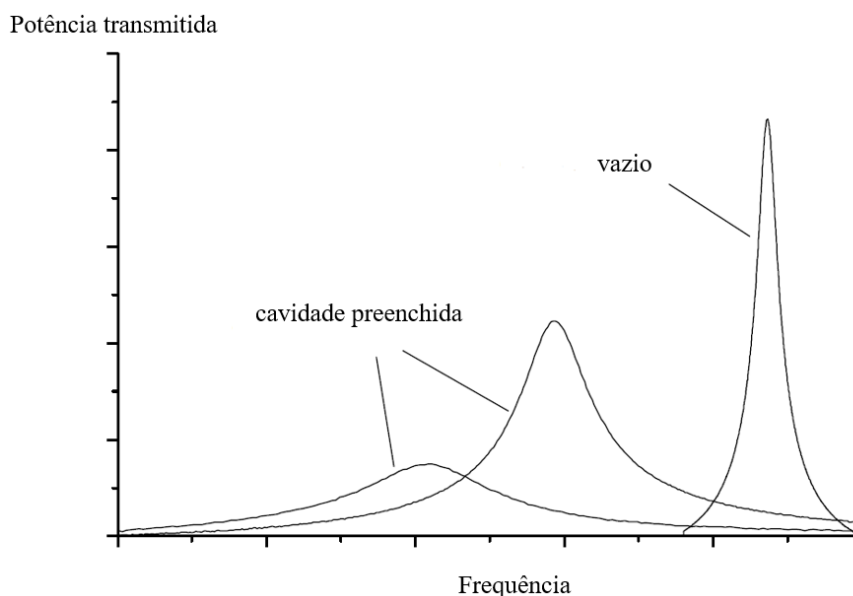
$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (5)$$

Figura 6 - Curva de ressonância com detalhe do fator de qualidade medido em -3dB do pico.



Quando um material dielétrico é colocado dentro da cavidade ressonante as características da curva de ressonância são modificadas de duas formas. Primeiro, a frequência de ressonância diminui devido ao decréscimo do comprimento de onda dentro do material sob

Figura 7 – Curva de ressonância mostrando a dependência do conteúdo de umidade



teste. Segunda forma, a metade da largura de banda da curva de ressonância aumenta devido às perdas da energia de microondas dentro do material. Assim, conforme o conteúdo de umidade aumenta, a curva de ressonância move para frequências mais baixas e a amplitude diminui, Kocsis (2008). A Figura 7 apresenta essas definições apresentadas.

Um aspecto do fator Q que é importante em muitos circuitos é o amortecimento. Existem três regimes principais que podem ser considerados ao se referir ao amortecimento e ao fator Q .

Sub-amortecido ($Q > 1/2$): Um sistema sub-amortecido é aquele em que o fator Q é maior que a metade. Aqueles sistemas onde o fator Q é apenas um pouco mais da metade podem oscilar uma ou duas vezes quando um impulso é aplicado antes que a oscilação caia. À medida que o fator de qualidade aumenta, as quedas de amortecimento e as oscilações serão mantidas por mais tempo. Em um sistema teórico onde o fator Q é infinito, a oscilação seria mantida indefinidamente sem a necessidade de adicionar qualquer outro estímulo.

Sobre-amortecido ($Q < 1/2$): Um sistema com amortecimento excessivo tem um fator Q menor que $1/2$. Neste tipo de sistema, as perdas são altas e o sistema não acumula energia. Em vez disso, o sistema decairá exponencialmente, aproximando-se assintoticamente do valor do estado estacionário após a aplicação de um impulso. À medida que o fator Q ou fator de qualidade é reduzido, os sistemas respondem mais lentamente a um impulso.

Criticamente amortecido ($Q = 1/2$): O sistema criticamente amortecido tem um fator Q de 0,5 e como um sistema com amortecimento excessivo, a saída não oscila e não ultrapassa sua saída de estado estável. O sistema converge ao estado estacionário no tempo mais rápido sem qualquer oscilação.

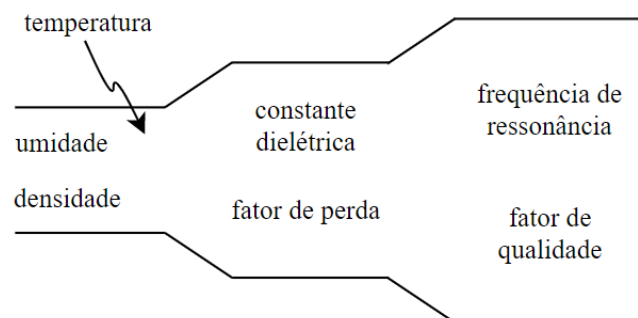
3. PROJETO DO SENSOR

Para a confecção de uma cavidade ressonante afim de mensurar o teor de umidade dos grãos, são utilizadas algumas técnicas e métodos específicos, descritas aqui neste capítulo. Primeiramente, a caracterização das propriedades dielétricas de materiais orgânicos e sua relação com a umidade foi bastante estudada anteriormente por diversos autores e está sintetizado na forma de um modelo de permissividade. Na sequência, para a determinação da geometria cilíndrica da cavidade leva-se em conta basicamente o processo fabril do sensor. Posteriormente, as dimensões da cavidade são definidas levando aspectos construtivos/comerciais e através da sua frequência de ressonância juntamente com o modo de ressonância, que adicionalmente, implica na definição do método de acoplamento. As dimensões são validadas por simulações no software CST Studio.

3.1. MEDIDOR DE UMIDADE DE GRÃO

O funcionamento do sensor consiste na detecção da variação da constante dielétrica pela variação da umidade dos grãos. Na Figura 8 pode-se observar o percurso da medida, a permissividade é modificada pela umidade, densidade e temperatura. A densidade granular está intrinsicamente ligada com a umidade, mas também com a geometria e tipo do grão, entretanto, há duas soluções para tal questão: realizar uma curva de calibração para cada variedade de grão ou realizar medida de dois parâmetros, como a frequência de ressonância e o fator de qualidade. A temperatura ilustrada representa um erro esperado que não será tratado nesse trabalho.

Figura 8 – Esquema de funcionamento do sensor de umidade e densidade com perturbação da cavidade ressonante por variação do dielétrico.



Durante as medições de umidade, ambos parâmetros mudam, frequência de ressonância e fator de qualidade. KOCSIS (2008) propõe uma técnica de medir dois parâmetros para

encontrar a umidade e a massa (ou densidade, caso o volume é conhecido) das amostras. O primeiro parâmetro é o deslocamento da frequência mostrado na Equação (6) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e o segundo parâmetro é a medida da metade da largura de banda mostrado na Equação (7).

$$A = f_{MUT} - f_0 \quad (6)$$

onde f_{MUT} é a frequência de ressonância da cavidade quando há amostra dentro da cavidade e f_0 é a frequência de ressonância da cavidade vazia.

$$B = w_{MUT} - w_0 \quad (7)$$

onde w_{MUT} é meia largura de banda quando há amostra dentro da cavidade e w_0 é meia largura de banda quando a cavidade está vazia.

Os parâmetros A e B são ambos dependentes da massa dos grãos. No entanto, o quociente de A e B é independente da massa. Ele apenas depende do conteúdo de umidade da amostra. Esse valor é adimensional e pode ser utilizado para calibrar o sensor. O parâmetro A ou B também podem ser utilizados para a calibração do sensor, embora, estas curvas serão dependentes da massa da amostra.

3.2. MODELO DE PERMISSIVIDADE

Primeiro aspecto em um projeto de um sensor à cavidade ressonante é ter um modelo da permissividade complexa do material que será analisado. A permissividade de vários tipos de grãos foi bastante estudada em várias faixas de frequência distintas. Nelson (1989), sintetizou vários desses trabalhos em um modelo geral de permissividade de grãos. As Equações (8) e (9) representam, respectivamente, a parte real e a parte imaginária da permissividade complexa desse modelo.

$$\varepsilon' = \left(1 + \frac{0.504M\rho}{\sqrt{M} + \log(f)} \right)^2 \quad (8)$$

$$\varepsilon'' = 0.146\rho^2 + 0.004615M^2\rho^2 \left(0.32\log(f) + \frac{1.743}{\log(f)} - 1 \right) \quad (9)$$

Onde M é a umidade dos grãos em % com variação entre 8 e 26%, f é a frequência em MHz com faixa entre 5 e 5000MHz e ρ que representa a densidade granular em g/cm^3 que não há faixa definida para o modelo. Observa-se que a permissividade dos grãos é modelada como uma função que depende da umidade, densidade granular e frequência. Nesse modelo exime-se a influência da temperatura, visto que sua influência é desprezível e pode ser compensada com um sensor de temperatura acoplado dentro da cavidade para posterior ajustes de calibração.

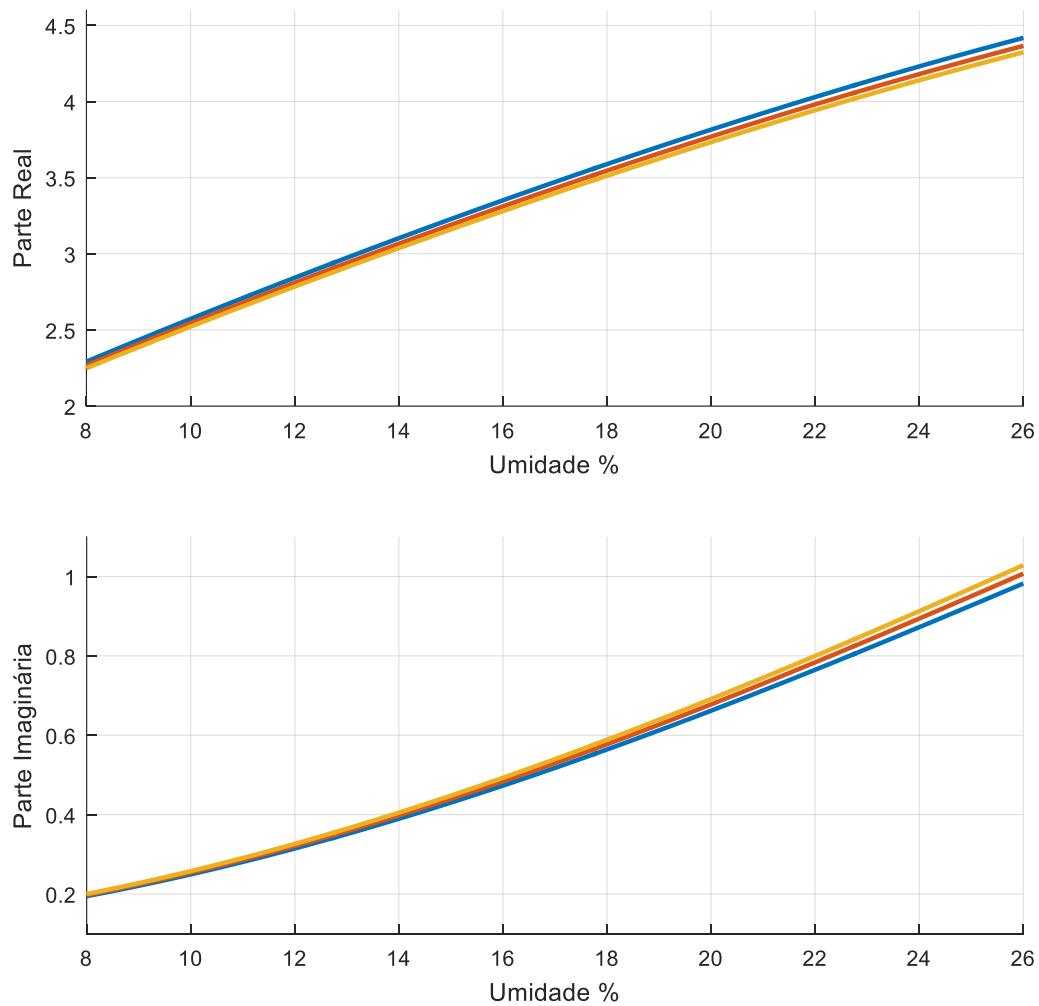
A densidade granular além de conter outros aspectos que influenciam em seu valor, pode ser também relacionada diretamente com a umidade. Ribeiro (2005), analisou várias propriedades físicas de sementes de soja que resultaram na relação de permissividade em função da umidade. A Equação (10) representa os resultados obtidos por Ribeiro.

$$\rho = -5.02 \cdot 10^{-5} M^2 - 0.00245M + 0.804 \quad (10)$$

Onde as variáveis são as mesmas já citadas para as Equações (8) e (9).

A Figura 9 mostra as Equações (8) e (9) com a Equação (10) usada para o cálculo da densidade granular, ou seja, a constante dielétrica e o fator de perda para a semente de soja entre 8 e 26% de umidade em base úmida, para as frequências de 2000, 2500 e 3000MHz. Da figura, observa-se que a permissividade complexa é influenciada pela variação da umidade e da frequência de excitação, que para essa faixa entre 2GHz e 3GHz, a amplitude da parte real e imaginária da permissividade não apresentam variações significativas.

Figura 9 - Modelo de permissividade complexa para sementes de soja. Umidade em base úmida e frequência para as frequências de 2000, 2500 e 3000MHz, respectivamente, curvas azul, vermelho e amarelo.



3.3. PROJETO DA CAVIDADE

O projeto do sensor foi executado de forma a validar hipóteses. A primeira hipótese consiste no modo de excitação TE₀₁₁ com acoplamento por fenda. Tal modo foi escolhido pelo alto fator de qualidade, que proporciona uma boa sensibilidade do sensor e ótima rejeição a imperfeições construtivas das paredes da cavidade ressonante. O método de acoplamento escolhido foi pela fenda por ser o adequado para acoplar o modo TE₀₁₁, e assim, não inserir nenhum material dentro da cavidade como a sonda e o loop fariam, entrando em contato com a amostra de grãos. É utilizado um guia de onda retangular alimentado por sonda em um ponta e na outra, a fenda acopla à cavidade ressonante.

A cavidade foi projetada usando a Equação (2), para o modo TE₀₁₁, com frequência de ressonância em torno de 2450MHz quando preenchida com uma constante dielétrica relativa de

3.43, que representa o valor médio da constante dielétrica para intervalo de umidade definido para o sensor (17%). Para essa cavidade, quando totalmente preenchida com ar (vazia), a frequência de ressonância é em volta de 4930MHz. Portanto, essa variação de frequência de ressonância, entre totalmente vazia e totalmente preenchida com grãos contendo 26% de umidade, é muito grande para um projeto de um sensor à cavidade ressonante que visa ser apto a utilizar eletrônica embarcada para instrumentação, não se limitando apenas testes de bancada. Assim, surge a necessidade de limitar a variação de frequência.

Para limitar a variação de frequência da cavidade precisa se reduzir a variação da constante dielétrica do material que se encontra dentro da cavidade. Para isso é reduzido o volume da amostra utilizando um recipiente cilíndrico de raio inferior ao da cavidade, de mesma altura e posicionado no centro da cavidade. Tal configuração é comumente utilizada para medições de fluxo das amostras, sendo nesses casos a “tampa” e o “fundo” da cavidade abertos para a tubulação passar. O projeto aqui é desenvolvido para cavidade fechada e amostra estática.

O recipiente interno é geralmente feito de algum polímero, ou seja, um material não magnético que possibilita a passagem das ondas do campo elétrico através da amostra. Para o recipiente, pode ser utilizada alguma tubulação comercial ou fabricação com impressão 3D.

Assim, é definido que o volume da amostra será inferior ao volume total da cavidade, isso resulta que dentro da cavidade terá uma combinação de ar + recipiente interno + amostra de grãos. Essa mistura tem uma constante dielétrica relativa resultante que pode ser calculada através de equações já conhecidas que relacionam a permissividade de dois componentes e suas frações de volumes respectivas.

A redução do volume da amostra possibilita trocar o método de acoplamento da cavidade. Pode-se trocar o acoplamento por guia de onda com fenda pelo acoplamento sonda ou loop pois terá espaço no vão entre a cavidade e o recipiente interno, facilitando enormemente a fabricação do sensor e possibilitando aquisição de dados de reflexão e transmissão, se no caso, for instalado duas sondas ou dois loops.

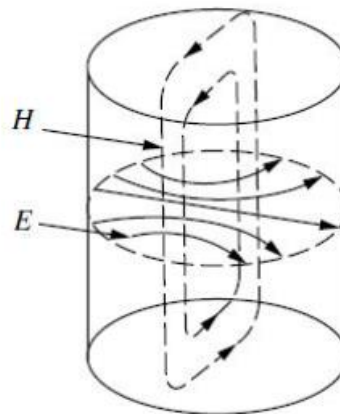
3.3.1. Definição do modo de excitação e dimensões da cavidade

Conforme não há mais a necessidade de utilizar acoplamento por fenda, surge a possibilidade de utilizar o modo TE_{111} acoplado por sonda. Tal configuração é utilizada em alguns trabalhos para medição de amostras dinâmicas com cavidade aberta. O modo TE_{111} não possui um fator de qualidade alto, embora, se escolhida uma razão entre o raio e a altura da

cavidade adequada, esse modo fica distante de outros modos evitando interferência. Tal questão é extremamente importante para a operação do sensor.

A distribuição do campo eletromagnético em uma cavidade cilíndrica para o modo TE_{111} é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição de campo eletromagnético dentro de uma cavidade ressonante cilíndrica projetada para ressonar no modo TE_{111} .



Fonte: Chen (2004)

De acordo com a Figura 11, em uma razão $(2a/h)^2$ abaixo de 1 o modo TE_{111} é o modo dominante. Assim, foi escolhida uma razão de 0,561 que resulta uma relação de altura igual 2,67 vezes o raio. Essa razão entre o raio, a , e a altura, h , foi determinada para ter uma boa distância do modo mais próximo, o modo TM_{010} .

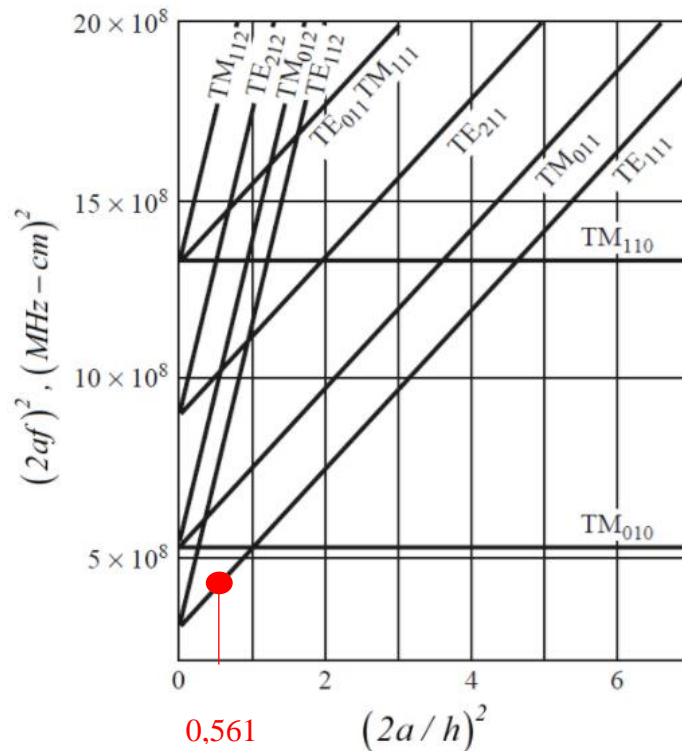
A frequência de ressonância quando a cavidade estiver vazia, ou seja, a maior frequência, é determinada em torno de 3000MHz, desta maneira, para o modo de excitação TE_{111} , a cavidade tem dimensões adequadas. Assim, da Equação (2), a Equação (11) mostra a frequência de ressonância da cavidade com dependência exclusiva da constante dielétrica relativa.

$$f_{TE,111} = \frac{3007}{\sqrt{\epsilon'_r}}, [MHz] \quad (11)$$

O raio da cavidade foi definido em 34,6mm, que corresponde à um cilindro de 3 polegadas de diâmetro e espessura de 3,5mm. A altura resulta em 93mm. Tem-se que, quando a cavidade está vazia (cheia de ar), a frequência de ressonância é 3007MHz. Quando a cavidade

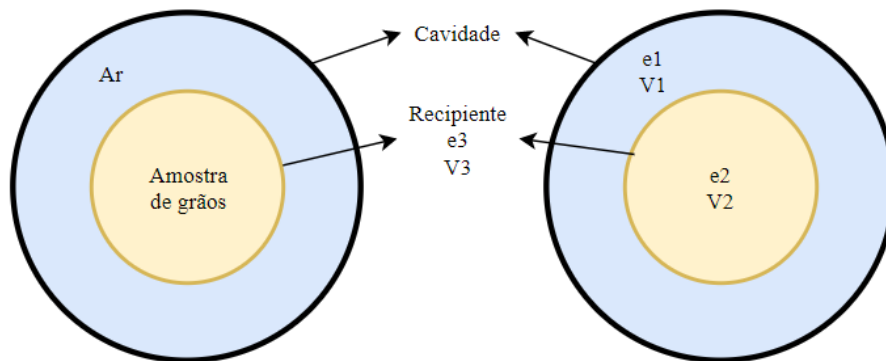
estiver preenchida de grãos com 26% de umidade, a constante dielétrica tem seu valor aproximado a 4,418 e a frequência de ressonância torna-se 1431MHz. Por outro lado, quando a cavidade estiver preenchida de grãos com 8% de umidade, a constante dielétrica tem seu valor aproximado a 2,249 e a frequência de ressonância torna-se 2005MHz. O sensor possui assim uma variação de aproximadamente 574MHz entre os limites de medição. Essa variação de frequência do sensor pode ser diminuída, visando reduzir os custos dos componentes de uma possível eletrônica embarcada, deste modo, como já foi citado anteriormente, é alcançado com a redução do volume da amostra. Esta redução do volume da amostra é também utilizada para deslocar a faixa de operação do sensor em torno de 2450MHz.

Figura 11 - Distribuição dos modos com detalhe da razão escolhida do modo TE111.



A Figura 12 mostra um corte da vista superior da cavidade ressonante, onde se observa a própria cavidade, o recipiente que contém a amostra e a amostra de grãos. Cada componente possuindo um volume e uma constante dielétrica correspondentes. Existem inúmeras equações que calculam a permissividade dielétrica resultante de meio distintos, também chamados de fases, no entanto, para esse trabalho a amostra de grãos possui uma permissividade complexa e assim, os resultados obtidos não seriam representativos da realidade da situação, desta maneira, a caracterização do sensor é obtida pela simulação em software, explicada na próxima sessão.

Figura 12 - Representação da cavidade ressonante, em corte da vista superior, com o recipiente contendo a amostra de grãos ao centro.

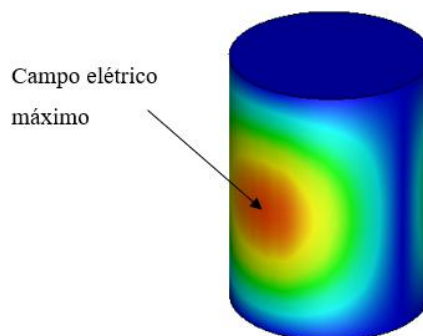


O raio do recipiente que contém a amostra deve ser de uma dimensão adequada para receber uma amostra de grãos representativa e permitir o acoplamento. Assim, o diâmetro do recipiente é definido em 32mm.

3.3.2. Definição do tipo de acoplamento

O modo TE₁₁₁ possui uma configuração de campo elétrico ilustrada pela Figura 13. Sua excitação é realizada por acoplamento do tipo sonda, e seu posicionamento é definido pelo campo elétrico máximo. No centro da parede lateral da cavidade é inserido o acoplamento. O acoplamento sonda apresenta um fácil ajuste, em que na prática, é geralmente utilizado um grande comprimento do acoplamento e ajusta-se cortando-o conforme necessário.

Figura 13 - Distribuição do campo elétrico em uma cavidade ressonante cilíndrica, modo TE₁₁₁ com detalhe da posição do ponto máximo do campo elétrico.



3.4. SIMULAÇÃO

Nesta seção são apresentados resultados de simulação que permitem validar o projeto da cavidade ressonante proposta neste trabalho. As simulações foram realizadas utilizando o software comercial de simulação de estruturas eletromagnéticas em alta frequência, CST STUDIO SUITE.

A utilização de uma ferramenta de simulação 3D de campos eletromagnéticos para projeto de componentes de alta frequência é uma opção muito interessante, pois juntamente com a teoria é possível desenvolver um produto até sua versão final sem a necessidade de criar protótipos e experimentos. Essa é uma grande vantagem, porque reduz significativamente o tempo de projeto e também os custos experimentais.

No projeto do medidor de umidade em grãos é utilizado o modo *EigenMode* para fazer a análise de campo eletromagnético e o *Frequency Domain Solver* para análise dos parâmetros S.

3.4.1. Simulação por *EigenMode*

O modo de solução *EigenMode* permite o desenvolvimento de projetos em 3D sem utilizar antenas de transmissão/recepção. Este modo de solução realiza o cálculo das ressonâncias da estrutura e também a configuração dos campos eletromagnéticos para as frequências ressonantes.

Para um projeto desenvolvido no CST com solução tipo *EigenMode*, o simulador irá encontrar as primeiras ressonâncias com frequência igual ou superior a 3000MHz. O resultado da simulação é apresentado pelo software em forma de tabela, com os valores das frequências ressonantes encontradas. É possível também gerar uma imagem com a configuração de campo elétrico e magnético da estrutura para cada frequência ressonante apresentada na tabela. A Figura 14 ilustra o campo elétrico do primeiro modo ressonante da cavidade, ou seja, o modo TE_{111} .

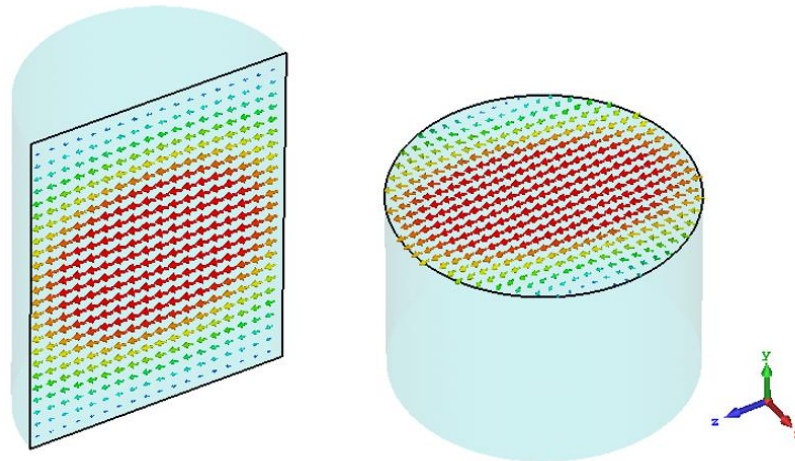
Para o projeto 3D apresentado na Figura 12, com dimensões de raio igual 49,2mm e altura igual 131.5mm, considerando-o preenchido com ar, tem-se as cinco primeiras ressonâncias apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Frequências de ressonâncias para cavidade preenchida com ar.

Modo	Frequência [MHz]
1	3006
2	3315
3	3685
4	4092
5	4503

Para cada ressonância da cavidade tem-se um modo de propagação. Por exemplo, para a cavidade desse projeto, a primeira ressonância corresponde ao modo TE₁₁₁, mostrado na Figura 12. A utilização do modo de solução *EigenMode* permitiu uma análise rápida e simples dos modos de propagação e frequências ressonantes, mas principalmente dos campos elétricos e magnéticos para cada modo. Uma grande vantagem da solução por *EigenMode* é o tempo de cálculo ser muito pequeno, fazendo com que a simulação demore apenas alguns minutos. Isso permite alterar as dimensões e/ou modos de propagação e fazer uma interpretação rápida. A análise dos campos é fundamental na escolha e posicionamento dos acoplamentos de excitação e/ou recuperação das ondas EM na cavidade ressonante.

Figura 14 – Vistas em corte da cavidade ressonante com a distribuição e orientação do campo elétrico para o modo TE₁₁₁ na simulação por *EigenMode*.



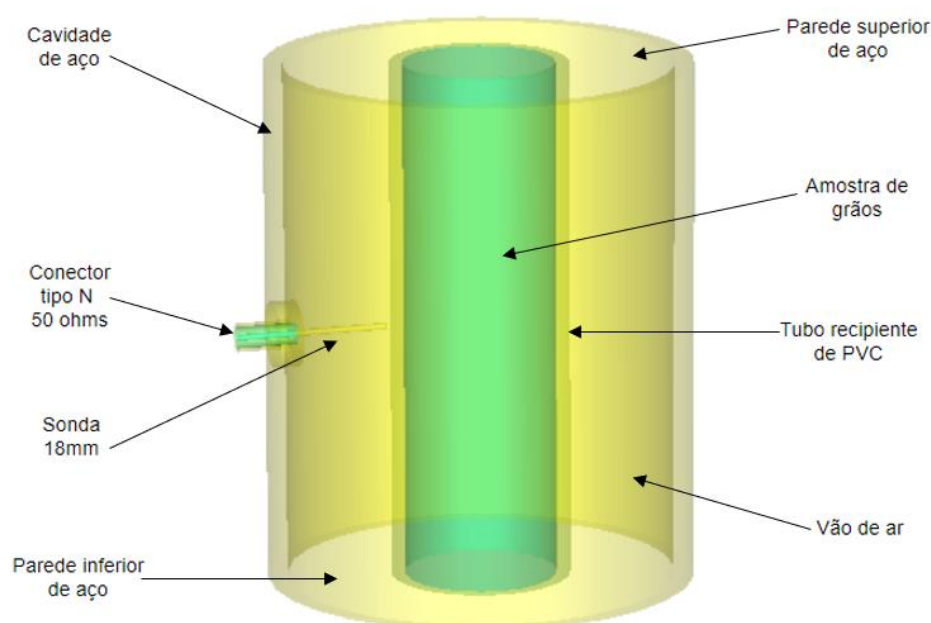
3.4.2. Simulação por *Frequency Domain Solver*

Solução de simulação por *Frequency Domain Solver* permite uma análise do comportamento da estrutura simulada em frequência. É definido apenas um acoplamento para excitação e recuperação do sinal. Assim toda a simulação é realizada fazendo uma varredura

(sweep) em frequência, e os resultados do S_{11} podem ser gerados em forma de gráfico para diferentes níveis de umidade do grão.

Para realizar um projeto, inicia-se desenvolvendo a estrutura em 3D, associando cada objeto do projeto a um material como, por exemplo, ar, amostra de grão, cobre, teflon, etc. A Figura 15 ilustra a base do projeto em três dimensões com cada objeto associado ao seu material.

Figura 15 - Projeto 3D final da cavidade ressonante no CST.

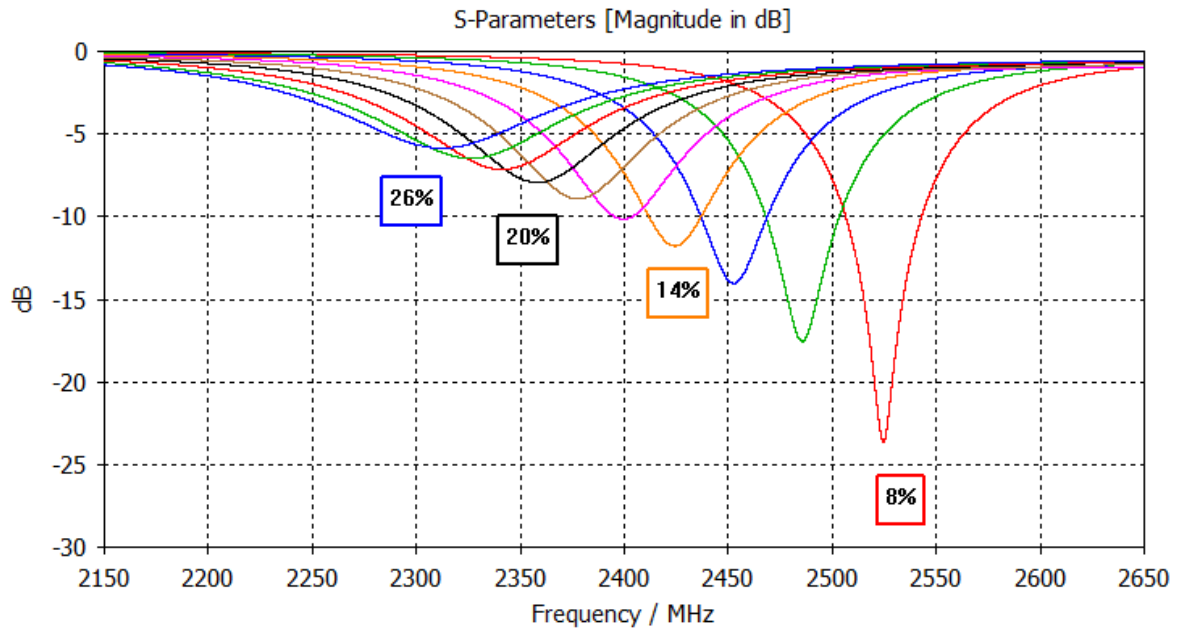


A excitação comumente utilizada pelo *Frequency Domain Solver* é a *Waveguide Port*, que é empregada para excitar guias de ondas, cabos coaxiais, etc, e tem como padrão uma potência de 1 Watt. O projeto do medidor de umidade de grãos utiliza uma antena (acoplamento) do tipo sonda. A qual é posicionada com base no campo elétrico máximo da cavidade. A *Waveguide Port* neste caso são círculos em duas dimensões que excitam a extremidade de um cabo coaxial. Em sua outra extremidade, o cabo coaxial forma o acoplamento tipo sonda que excita a cavidade ressonante, adentrando-a por 18mm. Este comprimento da sonda foi obtido como o comprimento que melhor acopla a cavidade com amostra com 8% de umidade.

O CST permite criar um material com a permissividade complexa em função da frequência conforme a necessidade do usuário. Foi criado assim um material que representa os grãos de acordo com as Equações (8) e (9). Dessa forma o material que representa os grãos ficou em função somente da umidade, conforme o teor de umidade durante a simulação era

modado, os valores da permissividade eram atualizados. Uma simulação variando a amostra de grãos entre 8% e 26% de umidade foi realizada, além da simulação em vazio, ou seja, apenas com ar dentro do tubo recipiente. Os resultados são apresentados na Figura 16. Para o tubo de PVC foi utilizado um material com constante dielétrica igual a 2,1.

Figura 16 - Parâmetro S11 para a cavidade ressonante com amostras de grãos entre 8% e 26% de umidade.



Observa-se na Figura 16 que conforme maior o teor de umidade nos grãos, menor é o S_{11} , menor é o fator de qualidade, e maior é o deslocamento da frequência de ressonância em direção a frequências menores. Resultados esses de acordo com o esperado e ilustrado na Figura 7.

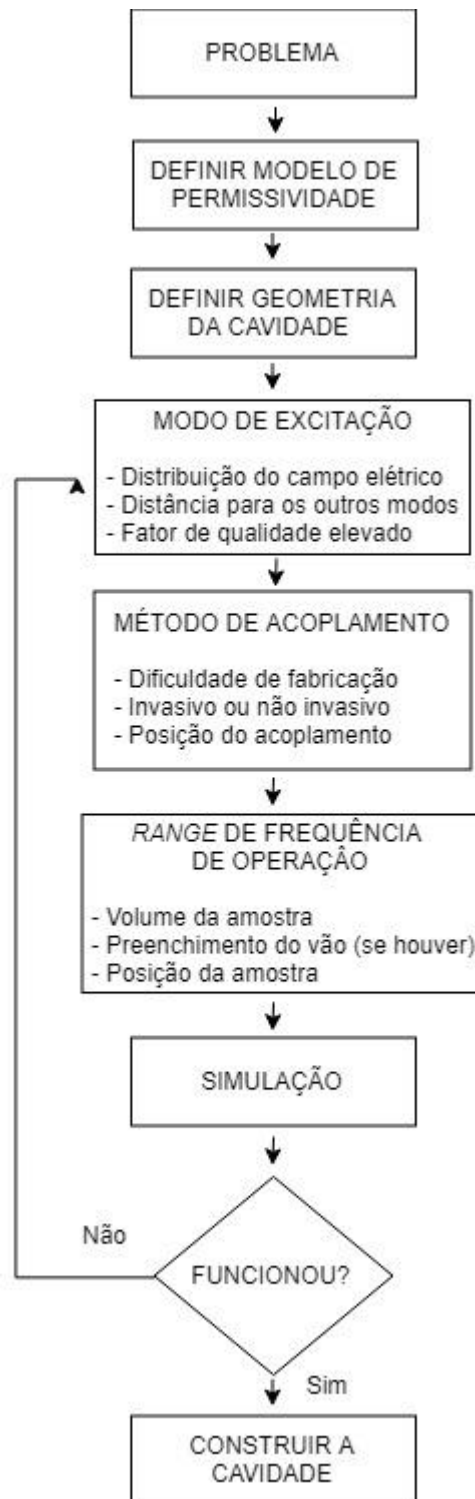
3.5. FLUXO DO PROJETO

Cada projeto de cavidade ressonante tem suas características. De forma geral, o fluxograma apresentado na Figura 17, sugere uma opção de desenvolvimento para um sensor baseado em cavidade ressonante. Tal fluxograma foi utilizado nesse trabalho. Vale destacar que algumas premissas precisam ser obtidas para sair da indecisão entre a definição do modo de excitação, método de acoplamento e *range* de frequência de operação do sensor. Todas as definições de parâmetros da cavidade estão intrinsicamente relacionadas. O desenvolvimento desse trabalho resume-se no seguinte desenvolvimento lógico:

- Geometria da cavidade: cilíndrica (opção do autor)
- Distribuição do campo elétrico: modo TE;
- Distância para os outros modos: modo TE_{111} ;
- Fator de qualidade elevado: modo TE_{011} ;
- Acoplamento do modo TE_{011} : guia de onda retangular com fenda na parede lateral da cavidade (difícil construção, não invasivo);
- Acoplamento do modo TE_{111} : sonda na parede lateral da cavidade (invasivo);
- Range de frequência aceitável: deve-se reduzir o volume da amostra (possibilita acoplamento invasivo);
- Preenchimento do vão: ar (opção do autor);
- Posição da amostra: centro da cavidade longitudinalmente.

Com esse fluxograma, comprovado por simulação, é definido assim, o modo de excitação TE_{111} com acoplamento por sonda. É priorizado a operação de um modo distante dos demais à um alto fator de qualidade, aliado à facilidade de acoplamento por sonda quando comparado pelo acoplamento de guia de onda retangular. Ainda, as dimensões da cavidade foram calculadas para suprirem os requisitos técnicos e, visando o baixo custo de construção, desse modo buscou-se o mesmo diâmetro da cavidade com diâmetros de tubulações encontradas comercialmente.

Figura 17 - Fluxograma sugerido para desenvolvimento de sensor baseado em cavidade ressonante.

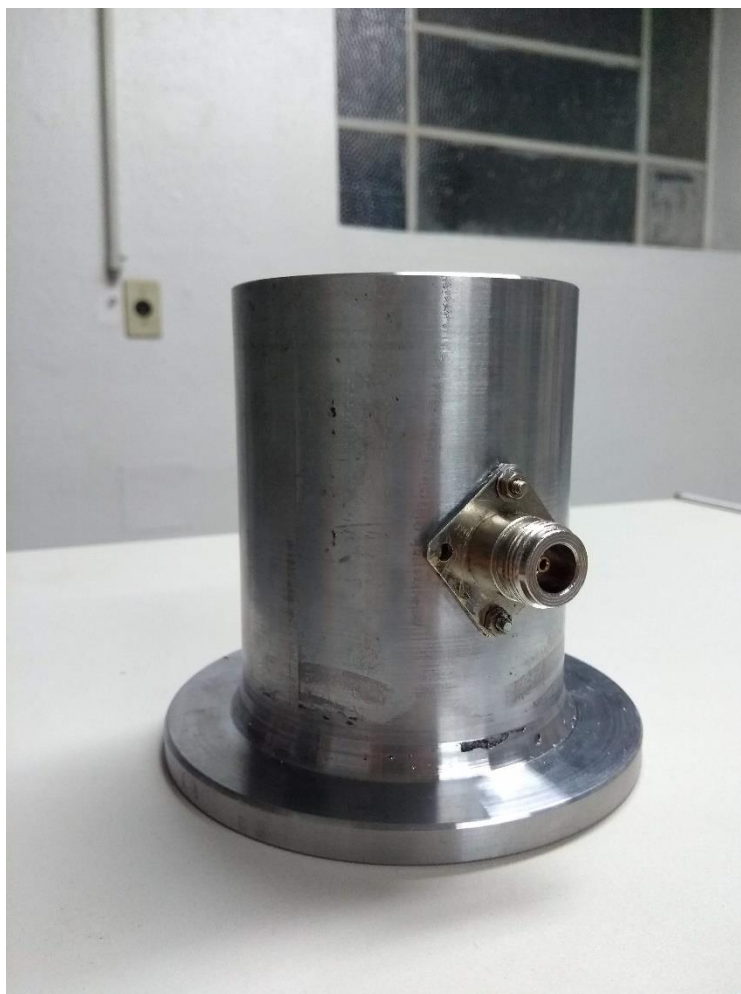


4. EXPERIMENTO

4.1. CAVIDADE UTILIZADA

Para provar o projeto da cavidade, a cavidade foi fabricada com um tubo redondo de aço galvanizado de 3 polegadas (76,2mm), com espessura de 3,5mm, que resulta um raio interno de 34,6mm. A altura da cavidade é 93mm. A parede inferior feita de aço, foi soldada na cavidade. A parede superior foi também feita de aço, embora móvel, como uma tampa que permite acesso ao interior da cavidade. Essa tampa tem uma saliência do diâmetro interno que permite um bom encaixe. O recipiente da amostra foi feito com um tubo redondo de PVC com 32mm de diâmetro externo e espessura da parede de 2,4mm. A Figura 18 mostra a cavidade desenvolvida.

Figura 18 - Cavidade cilíndrica sem a tampa e destaque para o acoplamento.



As medições foram realizadas com o auxílio de um analisador de espectro (Rohde & Schwarz FSH4). O analisador é capaz de medir o coeficiente de reflexão (S_{11}), executando uma variação em frequência. O acoplamento tipo sonda foi realizado com um conector tipo N de 50ohms parafusado na parede lateral da cavidade. A sonda passa a parede da cavidade através de um furo e nela é soldada um pedaço de fio de cobre com espessura 1,2mm. O comprimento da sonda foi ajustado experimentalmente, cortando-se pedaços pequenos até se obter o maior acoplamento para a amostra com 6% de umidade. A cavidade é conectada com um auxílio de um adaptador ao analisador de espectro conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 - Cavidade ressonante acoplada ao analisador de espectro e com a amostra inserida em seu interior.



4.2. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Foram preparadas amostras de soja variedade TMG 7062 IPRO, os grãos de soja tiveram sua umidade retirada em um forno à 80 graus durante cinco horas. Após isso, os grãos foram divididos em nove amostras e inseridas quantidades distintas de água em cada amostra. Através da aferição da massa da amostra seca, foi possível determinar a massa de água à ser inserida

nos grãos visando obter amostras com a maior variação de umidade. O processo de absorção de água pelo grão não é algo preciso e é impossível produzir amostras exatamente com o percentual de umidade desejado. Para as amostras com alto teor de umidade o ideal é a utilização de grãos recém colhidos e “meio” verdes, o que não foi possível obter para esse trabalho. A Figura 20 mostra as nove amostras preparadas.

Figura 20 - Amostras de grãos preparadas.



A obtenção do teor de umidade das amostras foi realizada na faculdade de agronomia da UFRGS, no departamento de fitossanidade. Foi utilizado o medidor *Steinlite SL95 moisture tester*, pois no momento desse trabalho, a estufa a ar (método padrão do inmetro) não estava disponível. A curva de calibração do determinador utilizado foi para a variedade soja com range de umidade 8-26%, com erro de 0,1%. Este medidor utiliza o método capacitivo para determinar a umidade dos grãos. A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos com esse determinador de umidade.

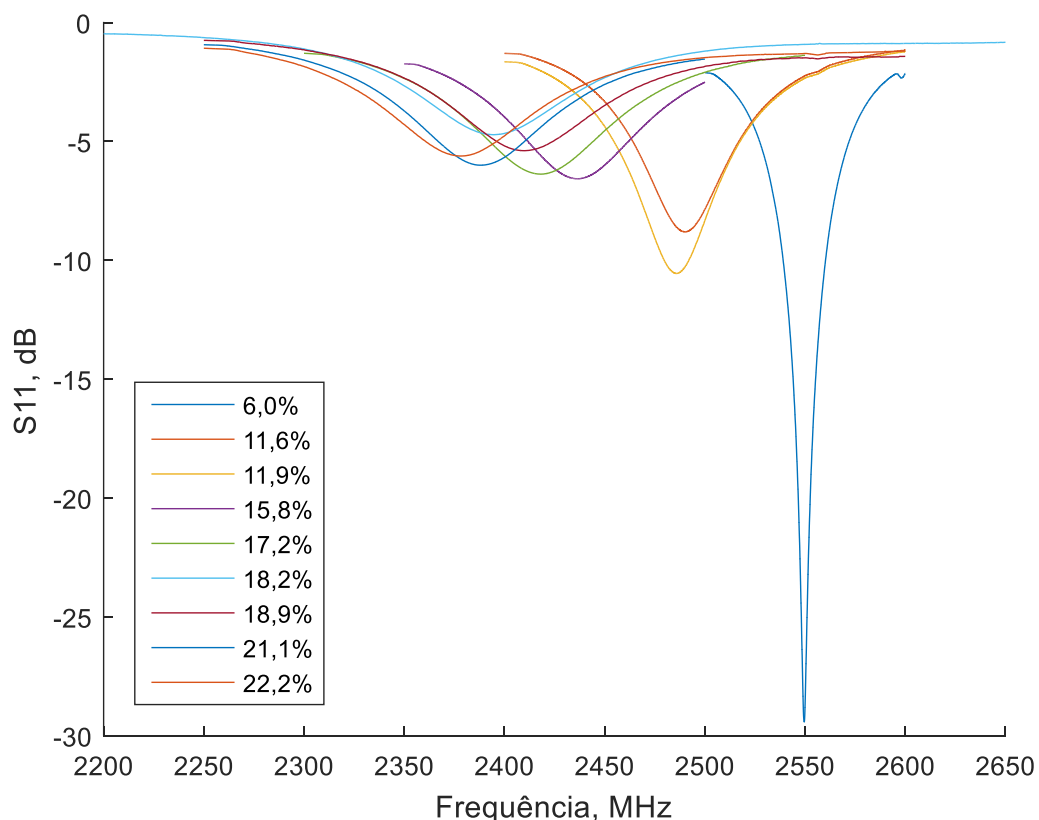
Tabela 7 - Amostras e suas respectivas umidades.

Amostra	Umidade (%)
1	6,0
2	11,6
3	11,9
4	15,8
5	17,2
6	18,2
7	18,5
8	21,1
9	22,2

4.3. RESULTADOS

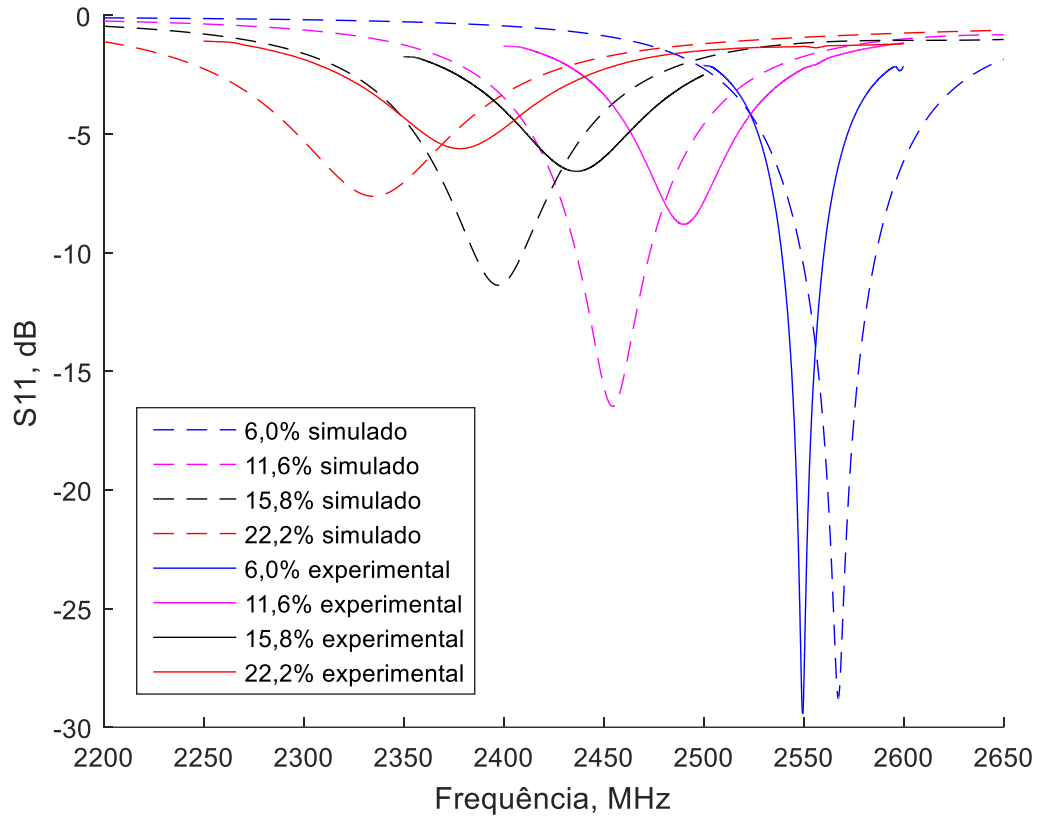
As medições foram realizadas com cada amostra sendo dividida em outras três sub amostras, então em cada uma dessas sub amostras foi medido o parâmetro de reflexão S_{11} duas vezes. Ou seja, para cada amostra há seis curvas S_{11} versus frequência. Procurando assim amenizar erros devidos às instabilidades do sensor e do acoplamento. O passo de frequência do analisador de espectro foi configurado em 10Hz para uma melhor precisão. Na Figura 21 é apresentado as curvas obtidas durante os experimentos.

Figura 21 - Resultados da cavidade ressonante para as nove amostras, parâmetro de reflexão S_{11} versus frequência.



Da Figura 21 se observa que o experimento não seguiu estritamente o comportamento observado na simulação, apresentado na Figura 16. Para umidades elevadas, as atenuações no S_{11} , se percebe não haver decréscimo. Na Figura 22 é apresentado curvas simuladas e experimentais para algumas amostras. Foram apresentadas apenas quatro pra melhor visualização dos dados. Nota-se que a simulação e o resultados do experimento divergem, embora mantém a mesma característica.

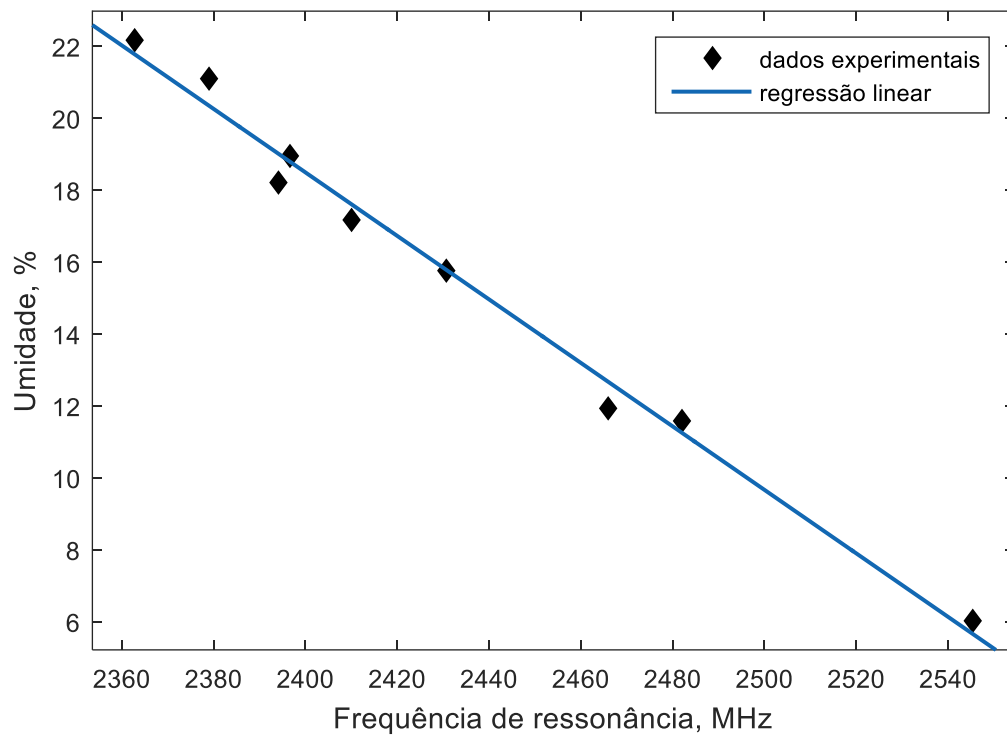
Figura 22 - Resultados e simulações para quatro amostras escolhidas. Simulação são as curvas tracejadas e os resultados experimentais estão como linhas contínuas.



Nas Figura 21 e Figura 22 foram mostradas as curvas S11 dos dados experimentais e pode se destacar que o comportamento do sensor corresponde ao comportamento simulado, no entanto, pode se notar que há divergência entre o fator de qualidade dos dados apresentados.

Os resultados obtidos com a medição indicam ser possível medir o teor de umidade em grãos, apresentando claramente uma distinção na frequência de ressonância para as nove amostras de grãos testadas com uma variação na frequência de ressonância de aproximadamente 11,32 MHz para cada 1% de umidade nos grãos. A regressão linear entre a frequência de ressonância e o teor de umidade é mostrada na Figura 23 e a equação da regressão linear é dada por $U(\%) = -0,08831 \times freq(MHz) + 230,4$ com $R^2 = 0,989$ (coeficiente de determinação).

Figura 23 - Frequência de ressonância dos dados experimentais com regressão linear.



Embora os resultados tenham sido satisfatórios para as amostras testadas, não é possível definir precisamente qual a sensibilidade do sensor. Devido ao fato de o método de calibração estufa não ter sido utilizado e sim um outro medidor de umidade de grãos.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o projeto de um sensor baseado em cavidade ressonante para medir o teor de umidade em grãos. Este tipo de sensor pode ser aplicado em medições laboratoriais ou em armazéns para controle da umidade dos cereais e sua comercialização. Este trabalho inclui o projeto da cavidade ressonante, em que é definido a geometria da cavidade, o modo e a frequência de operação, o tamanho da cavidade, o tamanho da amostra, o tipo de acoplamento e a posição do material em análise.

Durante o projeto da cavidade foi concentrado a atenção para que fosse fácil a confecção da cavidade e sem ter um custo elevado. Nisso procurou-se realizar o acoplamento por sonda, que possui menos complexidade quando comparado ao acoplamento por guia de onda. Conjuntamente com a necessidade de diminuir o volume da amostra, resultaram no modo escolhido TE_{111} .

Os resultados do experimento se mostraram fiéis à simulação. A cavidade construída em aço foi testada em laboratório com um analisador de espectro e o parâmetro S_{11} foi medido, com o qual é possível identificar frequência de ressonância e o fator de qualidade do sistema. As amostras de grãos tiveram seus teores de umidade determinados com a ajuda de um determinador de umidade digital (capacitivo), as amostras apresentaram uma variação entre 6,0% a 22,2%. Com a análise dos resultados de medição foi possível identificar a umidade dos grãos pela frequência de ressonância da cavidade e assim obter uma curva por regressão linear que caracteriza o sensor.

Para trabalhos futuros seria interessante realizar medições com amostras em maior quantidade e variedade, sendo caracterizadas em outros percentuais de umidade. Desta forma será possível identificar com precisão a sensibilidade do sensor, dado necessário para uma possível implementação deste tipo de sensor na indústria. Outra possibilidade seria levantar curvas de calibração com outros tipos de grãos, por exemplo, trigo, arroz e milho. Para assim obter um sensor que meça a umidade das principais culturas agrícolas do Brasil. Demais sugestões a serem desenvolvidas seria um estudo do impacto da temperatura da amostra no valor medido de umidade. Simular e fabricar as paredes superiores e inferiores com um furo passante do diâmetro do tubo de PVC, assim, podendo realizar medições dinâmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES, Basics of measuring the dielectric properties of materials. Application note. Estado Unidos da América. 2006. Agilent Technologies, Inc. 2005,2006 literature number 5989-2589.

BALANIS, C. A. Advanced engineering electromagnetics. Kendallville: John Wiley & Sons, 2012. 1018 p. ISBN 978-0-470-58948-9.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – Portaria N° 11, de 15/05/2007, publicada no D.O.U. em 16/05/2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes. Brasília. Mapa/ACS, 2009. 399 p. ISBN 978-85-99851-70-8

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Materials science and engineering. [S.l.]: John Wiley & Sons NY, 2011. v. 5.

CHEN, L. F. ONG, C. K. NEO, C. P. VARADAN, V. V. VARADAN, V. K. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd, England, 2004.

COLLIN, R.E. Foundations for Microwave Engineering. New York: McGraw-Hill, 1966. 589 p.

DINIZ, A. B. FREIRE, G. F. O. Ondas eletromagnéticas. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos editora S.A Universidade de São Paulo. 1973. 247 p.

HUMPHRIES JR, S. Resonant Cavities and Waveguides. In: HUMPHRIES JR, S. Principles of Charged Particle Acceleration. New York: John Wiley and Sons, 1986. cap. 12, p. 356-407. ISBN 0-471-87878-2.

INMETRO. Regulamento Técnico Metrológico – RTM. Portaria nº 402, de 15 de agosto de 2013. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002013.pdf>, acessado em 20/06/2018.

INMETRO / DIMEL. Portaria Inmetro /Dimel n.º 028, de 14 de fevereiro de 2017. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/pam/pdf/PAM006465.pdf>, acessado em 20/06/2018.

KAATZE, U. HÜBNER, C. Electromagnetic techniques for moisture content determination of materials. Measurement Science and Technology, vol. 21, no. 8, 2010. ISBN: 978-3-86395-260-0.

KNÖCHEL, R. DASCHNER, F. TAUTE, W. Resonant microwave sensors for instantaneous determination of moisture in foodstuffs. Elsevier Science Ltd: Food Control 12 (2001) 447-458. 2001.

KOCSIS, L. SCHLEMM, U. RICHTER, H. MELLMANN, J. FARKAS, I. On-line microwave measurement of the moisture content of wheat. Proceedings of the 17th World Congress. The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July 6-11, 2008.

KOCSIS, L. SCHLEMM, U. RICHTER, H. MELLMANN, J. FARKAS, I. On-line microwave measurement of the moisture content of wheat. Seoul: 17º World congress, The International Federation of Automatic Control. p. 632-635. 2008.

KRASWEWSKI, A. W. Microwave aquametry-needs and perspectives. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, vol. 39, no. 5, p. 828–835, 1991.

MARCOS FILHO, J. CICERO, S. M. SILVA, W. R. Avaliação da qualidade das sementes. Piracicaba: FEALQ, 1987. 230 p.

MELLENDEZ, R. T. MORALES, M. E. S, CERVANTES, J. L. CHÁVEZ, A. C. Dielectric Properties of Beans at Different Temperatures and Moisture Content in the Microwave Range, International Journal of Food 2015. Properties, DOI: 10.1080/10942912.2015.1038565.

NAYLON, J. Microwave resonant sensors. 2011.401 p. Tese (Doutorado). Cardiff University. Gothenburg, 2011.

NELSON, S. O. Dielectric properties of agricultural products, measurements and applications. IEEE transactions on electrical insulation, vol. 26, nº 5, 1991.

NYFORS, E. G. Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow. 2000. 181f. Dissertação (Doutorado). Helsinki University of Technology, Espoo, 2000.

POZAR, D.M. Microwave Engineering. John Wiley & Sons, 4 ed. 1998. 716 p. ISBN 978-0-470-63155-3.

PUZZI, D. Abastecimento e armazenagem de grãos. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603 p

RIBEIRO, D. M. CORRÊA, P. C. RODRIGUES, D. H. GONELI, A. L. D. Análise da variação das propriedades físicas dos grãos de soja durante o processo de secagem. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas, 25(3): 611-617, jul.-set. 2005

RYDHOLM, Tomas. Measurement of Complex Permittivity and Permeability Through a Cavity-Perturbation Method. 2015. Tese (Doutorado). Chalmers University of Technology. Gothenburg, 2015.

TRABELSI, S. KRASZEWSKY, A. W. NELSON, S. O. Microwave dielectric sensing of bulk density of granular materias. 2001. Measurement Science and Technology.

TRABELSI, S. NELSON, S. O. Nondestructive Sensing of Physical Properties of Granular Materials by Microwave Permittivity Measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 55, no. 3, june 2006. Pg 953-963.

LI, X. JIANG, Y. Design of a Cylindrical cavity resonator for measurements of electrical properties of dielectric materials. 2010. Tese (Doutorado). University of Gävle. 2010

ANEXO A: Imagens do experimento

Figura 24 - Cavidade ressonante acoplada ao analisador de espectro. Vista superior.



Figura 25 - Cavidade ressonante acoplada ao analisador de espectro. Vista lateral.

