



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E
ELETRÔNICA

Sensor baseado em cavidade ressonante com aplicação em medição do percentual de gordura do leite

Monografia submetida ao curso de
Engenharia Eletrônica da Universidade
Federal de Santa Catarina como parte dos
requisitos para a aprovação na disciplina
EEL7806 - Projeto Final TCC

Celso Martines Leite

Orientador: Prof. Fernando Rangel de Sousa, PhD.

Florianópolis, 3 de julho de 2017.

CELSO MARTINES LEITE

**SENSOR BASEADO EM
CAVIDADE RESSONANTE COM
APLICAÇÃO EM MEDIÇÃO DO
PERCENTUAL DE GORDURA
DO LEITE**

Monografia submetida ao curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para aprovação da disciplina EEL7806 - Projeto Final TCC.
Orientador: Prof. Fernando Rangel de Sousa, Ph.D.

**FLORIANÓPOLIS
2017**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Leite, Celso Martines

Sensor baseado em cavidade ressonante com
aplicação em medição do percentual de gordura do
leite / Celso Martines Leite ; orientador, Fernando
Rangel de Sousa, 2017.

61 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Eletrônica,
Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

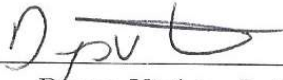
1. Engenharia Eletrônica. 2. Sensor micro-ondas.
3. Cavidade ressonante. 4. Qualidade do leite. 5.
Teor de gordura. I. Sousa, Fernando Rangel de. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Eletrônica. III. Título.

Celso Martines Leite

**SENSOR BASEADO EM CAVIDADE RESSONANTE
COM APLICAÇÃO EM MEDIÇÃO DO
PERCENTUAL DE GORDURA DO LEITE**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina EEL7806 - Projeto Final TCC e aprovada em sua forma final pelo Curso de Engenharia Eletrônica.

Florianópolis, 03/07/2017.




Djones Vinícius Lettnin, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Fernando Rangel de Sousa, Dr.
Orientador



Fabian Leonardo Cabrera Riaño, Dr.



Maicon Deivid Pereira, MSc.

RESUMO

Este documento apresenta os detalhes do projeto de um sensor baseado em cavidade ressonante. O sensor desenvolvido tem como propósito medir o percentual de gordura do leite, com possível aplicação na indústria de laticínios. A cavidade ressonante foi projetada considerando a permissividade do leite, usando ar para preencher o vão entre a cavidade e o duto PVC. Neste documento são discutidos pontos importantes no projeto do sensor, incluindo simulações e uma prova de conceito ao final. Este trabalho propõe um fluxo de projeto para que possa ser replicado e para auxiliar no desenvolvimento de outros sensores baseados na mesma tecnologia.

Palavras-chave: sensor micro-ondas. cavidade ressonante. qualidade do leite. teor de gordura no leite.

ABSTRACT

This document presents the details on the design of a microwave resonant cavity based sensor. The sensor developed has the purpose of measuring the percentage of milk fat, with possible application in the dairy industry. The resonant cavity was designed considering the permittivity of milk, using air to fill the cavity. This paper discusses important points in sensor design, including simulations and a proof of concept at the end. This work suggests a project flow so that this project can be replicated and to assist in the development of other sensors based on the same technology.

Keywords: microwave sensor. resonant cavity. milk quality. milk fat content.

Lista de Figuras

2.1	Cavidade retangular (lado esquerdo) e cavidade cilíndrica (lado direito)	6
2.2	Ordem das ressonâncias de uma cavidade cilíndrica em função do raio a e do comprimento d . Adaptado de Nyfors et al. (2000).	9
2.3	Cavidade com acoplamento ponta de prova (a) e ponta loop (b).	11
2.4	Variação da parte real da permissividade elétrica de um material que exhibe os três tipos de polarização com a frequência do campo elétrico alternado. Adaptado de Callister e Rethwisch (2011).	14
3.1	Linhas de campo elétrico E e campo magnético H de uma cavidade cilíndrica para o modo TM_{010} . Adaptado de Hill (2009).	26

-
- 3.2 Cavidade simples preenchida apenas por ar e acoplada através de pontas loop simulada no ambiente do software Keysight EMPro. 31
- 3.3 Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade preenchida apenas por ar. 32
- 3.4 Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e ar no duto. 32
- 3.5 Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e água no duto. 33
- 3.6 Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do comprimento. 34
- 3.7 Cavidade com a amostra posicionada no eixo do comprimento (a) e com a amostra posicionada no eixo do raio (b). 36
- 3.8 Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência variando o eixo da amostra colocada em uma cavidade cilíndrica. 37
- 3.9 Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do raio, utilizando acoplamento do tipo ponta loop. 37

3.10	Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do raio, utilizando acoplamento do tipo ponta de prova.	38
3.11	Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com seu tamanho otimizado, com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do raio, utilizando acoplamento do tipo ponta de prova.	39
3.12	Cavidade ótima simulada no ambiente do software Keysight EMPro.	41
3.13	Fluxograma de projeto sugerido para o desenvolvimento de um sensor baseado em cavidade ressonante.	42
4.1	Medição da cavidade utilizando um analisador de rede.	44
4.2	Tampa da cavidade com o acoplamento tipo ponta de prova.	45
4.3	Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com ar.	46
4.4	Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com água.	47
4.5	Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com leite desnatado (0%), semidesnatado (1%) e integral (3%).	48

4.6	Resultados de medição e simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com ar.	49
4.7	Resultados de medição e simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com água.	49
4.8	Resultados de medição e simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com leite desnatado (0%), semidesnatado (1%) e integral (3%).	50
4.9	Correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite.	52

Lista de Tabelas

2.1	Valores para p_{nm}	8
2.2	Valores para p'_{nm}	8
2.3	Comparação das principais tecnologias para caracterização do leite	20
3.1	Comparação dos resultados obtidos simulando a cavidade com o duto PVC e leite no eixo do raio.	40
4.1	Comparação entre as simulações e as medições.	51
4.2	Análise de correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite.	53
4.3	Comparação das principais tecnologias para caracterização do leite	54

Lista de Siglas

FEM *Finite Element Method*

NIRS *Near-Infrared Spectroscopy*

PLL *Phase-Locked Loop*

SOLT *Short-Open-Load-Thru*

VNA *Vector Network Analyzer*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos Gerais	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Organização do Trabalho	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Conceitos básicos	5
2.1.1	Cavidade ressonante	5
2.1.2	Acoplamento	10
2.1.3	Permissividade e polarização	13
2.2	Revisão do estado da arte	15
2.2.1	Leite: características, produção e consumo	15
2.2.2	Métodos para medição de gordura e ca- racterização do leite	16

3	Metodologia	21
3.1	Problema	21
3.2	Escolha do modelo de permissividade efetiva . .	23
3.3	Definição da geometria da cavidade	24
3.4	Definição do modo de operação	25
3.5	Estimativa do tamanho da cavidade	26
3.6	Definição do preenchimento do vão da cavidade	27
3.7	Definição da posição da amostra	28
3.8	Definição do tipo de acoplamento	30
3.9	Simulação da cavidade ressonante	30
3.10	Ajustes	34
3.11	Fluxo de projeto	40
4	Resultados	43
4.1	Cavidade utilizada	43
4.2	Resultados obtidos	46
4.2.1	Simulações	46
4.2.2	Medições	48
5	Conclusão	55

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Motivação

Segundo Alves (2006), “A melhoria da qualidade do leite no Brasil tem sido impulsionada pela crescente demanda por produtos de melhor qualidade pelos estabelecimentos de laticínios e, principalmente, pelos consumidores”. Brito (1998) afirma que a qualidade do leite é definida por parâmetros de composição química, características físico-químicas e higiene. A qualidade da composição do leite é determinada pela presença e os teores de proteína, gordura, lactose, sais minerais e vitaminas. Tendo em vista essa maior demanda por produtos de melhor qualidade e que “as características do leite têm influência significativa no rendimento de produtos lácteos, de modo que a composição do leite é de grande importância para a indústria de laticínios” (VIOTTO; CU-

NHA, 2006), este trabalho visa desenvolver um sensor para a medição do percentual de gordura no leite. Esse sensor tem aplicação em diferentes etapas da produção e processamento do leite, podendo ser utilizado durante a coleta e transporte do leite, análise laboratorial do leite, bem como na etapa de beneficiamento, como por exemplo, no processo de padronização.

Uma aplicação que se beneficiaria com este sensor seria a análise dos níveis de gordura no leite durante a coleta e o transporte, não apenas como uma forma de avaliar a qualidade do leite, mas também como uma forma de prevenir fraudes. Com casos de adulteração do leite o consumo do leite diminui e a confiança do consumidor fica abalada, podendo afetar até mesmo as exportações (CUNHA, 2007) e afetando também os produtores de leite devido aos laticínios que são fechados acusados de adulteração (MILKPOINT, 2014). Mesmo com a fiscalização atual, para o Ministério Público Estadual (MPE), “a falta de fiscalização nos transportadores é um dos pontos que mais facilitam a adulteração” (MILKPOINT, 2013).

Na aplicação voltada ao processo de padronização nas fábricas de laticínios, o sensor pode ser utilizado para implementação de um sistema automático de controle do percentual de gordura do leite, a fim de aumentar a eficiência do processo. A necessidade de maiores níveis de automação na indústria de laticínios é percebida através de incentivos feitos pelo governo, como por exemplo a lei nº 7.608, de 27 de dezembro de 2001 (GROSSO, 2001) e nos investimentos em empresas com soluções para a indústria de laticínios (EMBRAPA, 2016).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Projetar um sensor com base na tecnologia de cavidades ressonantes capaz de medir o percentual de gordura no leite de modo não-invasivo e não-destrutivo.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo principal, alguns objetivos específicos são requeridos:

- Revisar os principais conceitos teóricos necessários para o entendimento e desenvolvimento do projeto;
- Revisar o estado dos processos relacionados ao tema, publicados até o momento, visando contextualizar o cenário atual e, ao final, discutir e comparar com os resultados obtidos;
- Determinar os parâmetros do sensor em desenvolvimento, de modo a medir o percentual de gordura no leite;
- Escolher o melhor acoplamento para o sensor;
- Simular o sensor projetado, de forma a comparar com as previsões teóricas;
- Montar uma prova de conceito;

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está subdividido da seguinte forma: no primeiro capítulo apresenta-se a motivação por trás deste projeto, assim como os objetivos geral e específicos. No capítulo 2 é feita uma revisão teórica sobre os conceitos utilizados neste projeto e uma revisão da literatura estado da arte. O terceiro capítulo é sobre a metodologia utilizada, detalhando as decisões tomadas ao longo deste trabalho. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com este trabalho, enquanto no capítulo 5 estes resultados são comentados e comparados com os resultados previstos. Por fim, o capítulo 6 apresenta as considerações finais e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo introduz conceitos essenciais para a compreensão e o desenvolvimento do trabalho. A primeira parte revisa os tópicos sobre cavidade ressonante, acoplamentos ponta de prova e ponta loop, além de permissividade e polarização. Adicionalmente, a segunda parte é uma revisão da literatura voltada ao leite (mais especificamente suas características, produção e consumo) e aos métodos para medição de gordura e caracterização do leite.

2.1 Conceitos básicos

2.1.1 Cavidade ressonante

As cavidades ressonantes são estruturas metálicas que armazenam energia na forma de campos eletromagnéticos. Podem

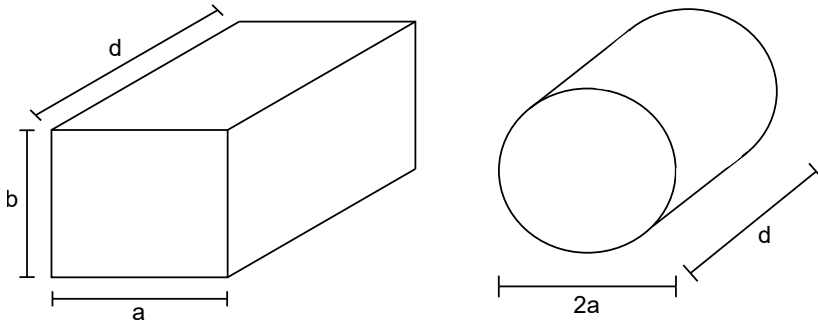


Figura 2.1: Cavidade retangular (lado esquerdo) e cavidade cilíndrica (lado direito)

ser construídas a partir de guias de ondas em que suas extremidades são fechadas com paredes metálicas. Essa energia pode ser armazenada ou retirada da cavidade através de acoplamentos, que podem ser pequenas fendas ou sondas. Enquanto energia eletromagnética é armazenada dentro da cavidade, potência é dissipada nas paredes metálicas e no material dielétrico preenchendo a cavidade (POZAR, 2009).

As cavidades ressonantes são comumente encontradas nas formas retangular e cilíndrica, como representado na Figura 2.1.

O fenômeno da ressonância ocorre em uma cavidade se o campo de excitação está em fase com as componentes refletidas, formando um padrão de onda estacionária através de interferências construtivas e destrutivas (NYFORS et al., 2000). A frequência de ressonância pode ser entendida como a frequência em que a energia elétrica é totalmente convertida em energia magnética, e vice-versa, sendo o fator mais importante em um ressonador (CHEN et al., 2004). Para cavidades retangulares, a frequência de ressonância é definida como:

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}, \quad (2.1)$$

em que c é a velocidade de propagação da luz no vácuo, μ_r é a permeabilidade relativa, ϵ_r é a permissividade relativa e a , b e d são parâmetros referentes ao tamanho da cavidade retangular, como apresentado na Figura 2.1.

Esta relação é válida para os modos TE_{mnl} e TM_{mnl} . O modo TE_{mnl} se refere ao caso em que o campo elétrico é perpendicular à direção de propagação, enquanto o modo TM_{mnl} se refere ao caso em que o campo magnético é perpendicular à direção de propagação. Os índices m , n e l , por sua vez, indicam o número de variações no padrão de onda estacionaria nos eixos x , y e z , respectivamente.

Para cavidades cilíndricas de raio a e comprimento d , a frequência de ressonância para o modo TE_{mnl} é dada por:

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}, \quad (2.2)$$

enquanto para o modo TM_{mnl} a frequência de ressonância é dada pela equação 2.3 (POZAR, 2009):

$$f_{mnl} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}, \quad (2.3)$$

em que p_{nm} representa o m -ésimo zero da função de Bessel de n -ésima ordem e p'_{nm} representa o m -ésimo zero da primeira derivada da função de Bessel de n -ésima ordem. Alguns valores para p_{nm} e p'_{nm} são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Tabela 2.1: Valores para p_{nm}

	n		
m	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 2.2: Valores para p'_{nm}

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

No caso de uma cavidade cilíndrica, Nyfors et al. (2000) relacionam a ordem das ressonâncias com o raio a e o comprimento d da cavidade ressonante, como visto na Figura 2.2.

Para o caso em que a cavidade ressonante é preenchida com outro material dielétrico que não seja o ar, a frequência de ressonância da cavidade diminuirá porque a permissividade dos demais materiais é sempre maior do que a permissividade do ar. A permissividade do material dielétrico e a frequência de ressonância da cavidade estão relacionadas da seguinte forma:

$$Re\{\sqrt{\epsilon_r}\} = \frac{f_{r0}}{f_r}, \quad (2.4)$$

em que f_{r0} é a frequência de ressonância da cavidade preen-

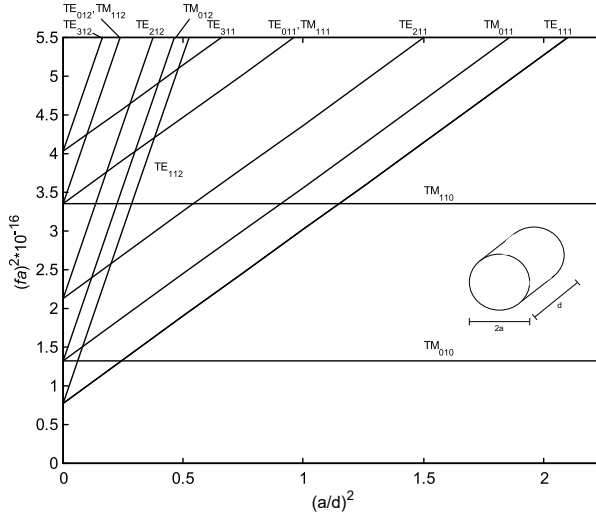


Figura 2.2: Ordem das ressonâncias de uma cavidade cilíndrica em função do raio a e do comprimento d . Adaptado de Nyfors et al. (2000).

chida com ar, f_r é a frequência de ressonância da cavidade preenchida com material dielétrico e $Re\{\sqrt{\epsilon_r}\}$ é a parte real da permissividade (NYFORS et al., 2000).

Uma outra característica do fenômeno da ressonância é o fator de qualidade. Segundo Nyfors et al. (2000), o fator de qualidade indica o quão rápido a energia armazenada é dissipada, podendo ser definida como:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Energia armazenada na cavidade}}{\text{Energia dissipada em um ciclo}}. \quad (2.5)$$

Considerando a dissipação de energia causada pela parede da cavidade e as perdas devido ao meio dielétrico na cavidade, Chen et al. (2004) mostra que o fator de qualidade

é dado por:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{Q_{0c}} + \frac{1}{Q_{0d}}}, \quad (2.6)$$

onde Q_{0c} e Q_{0d} são os fatores de qualidade considerando apenas perdas devido ao condutor e ao material dielétrico, respectivamente. O mesmo autor também demonstra que Q_{0d} pode ser definido como:

$$Q_{0d} = \frac{1}{\tan\gamma} = \frac{\epsilon'_r}{\epsilon''_r}, \quad (2.7)$$

em que $\tan\gamma$ é a tangente de perdas do material dielétrico, ϵ'_r é a parte real da permissividade e ϵ''_r é a parte imaginária da permissividade.

2.1.2 Acoplamento

O acoplamento da cavidade ressonante é necessário para que o campo na cavidade seja excitado. É através do acoplamento que a fonte fornecerá energia ao ressonador, processo este conhecido como 'excitação' (CHEN et al., 2004). Os principais tipos de acoplamento utilizado em cavidades são ponta de prova, ponta loop ou uma pequena abertura na cavidade. Independentemente do método utilizado para fazer medições com a cavidade, as opções de acoplamento são as mesmas, com a diferença de que para o método do coeficiente de reflexão é utilizado apenas um dispositivo de acoplamento e para o método do coeficiente de transmissão são utilizados dois dispositivos de acoplamento (NYFORS et al., 2000).

Um dispositivo de acoplamento gera um campo eletromagnético que acopla ao campo correspondente ao modo de ressonância. Este campo gerado é comumente modelado, de

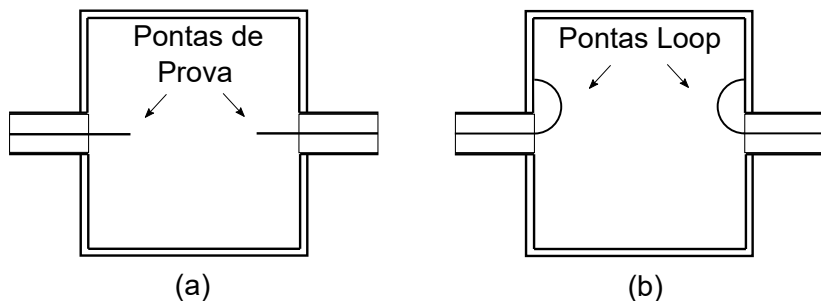


Figura 2.3: Cavidade com acoplamento ponta de prova (a) e ponta loop (b).

forma aproximada, como um momento de dipolo elétrico ou magnético, sendo o campo excitado diretamente proporcional ao momento de dipolo (NYFORS et al., 2000).

Para este trabalho, os tipos de dispositivos de acoplamento de maior interesse são a ponta de prova (Figura 2.3a) e a ponta loop (Figura 2.3b).

O acoplamento ponta de prova é feito a partir do próprio cabo de alimentação. O condutor central do cabo coaxial é estendido uma pequena distância para dentro da cavidade ressonante, formando a ponta de prova. O comprimento da ponta de prova é pequeno se comparado ao comprimento de onda e sua impedância de entrada pode ser considerada próxima à de um circuito aberto. Embora a corrente na ponta de prova seja pequena, a tensão gera um campo elétrico entre a ponta de prova e a parede adjacente da cavidade, irradiando energia na cavidade como uma pequena antena monopolo (NYFORS et al., 2000).

O acoplamento ponta loop é feito de modo similar à ponta de prova. O condutor central do cabo coaxial é estendido uma pequena distância para dentro da cavidade ressonante,

mas neste caso a extensão do condutor é curvada e então conectada com a parede metálica da cavidade. O tamanho do loop é bem menor que o comprimento de onda. Isso faz com que a tensão seja próxima de zero, mas que a corrente seja grande, irradiando como um dipolo magnético tangencial à parede (NYFORS et al., 2000).

Para escolher a posição onde fazer o acoplamento, primeiro deve-se considerar a configuração dos campos elétrico e magnético na parede interna da cavidade. Segundo Mehdizadeh (2015), a ponta de prova deve ser colocada em um ponto em que exista campo elétrico perpendicular, sendo que o comprimento da ponta de prova e a intensidade do campo elétrico presente determinam a força do acoplamento. No caso da ponta loop, o autor afirma que a área de superfície do loop deve ser colocada perpendicular ao campo magnético (maximizando o fluxo através do loop), sendo que a área do loop e a intensidade do campo magnético determinam a intensidade do acoplamento.

Para Nyfors et al. (2000), uma vantagem em utilizar a ponta de prova é sua facilidade em ser ajustada, bastando apenas regular o comprimento do condutor central do cabo coaxial dentro da cavidade. No caso da ponta loop, o autor afirma que uma pequena vantagem seria o fato de ser um pouco mais resistente do que apenas uma longa ou fina extensão do condutor central (como no caso da ponta de prova), entretanto com a desvantagem de ser mais difícil de ajustar o loop.

2.1.3 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, 2005). 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,

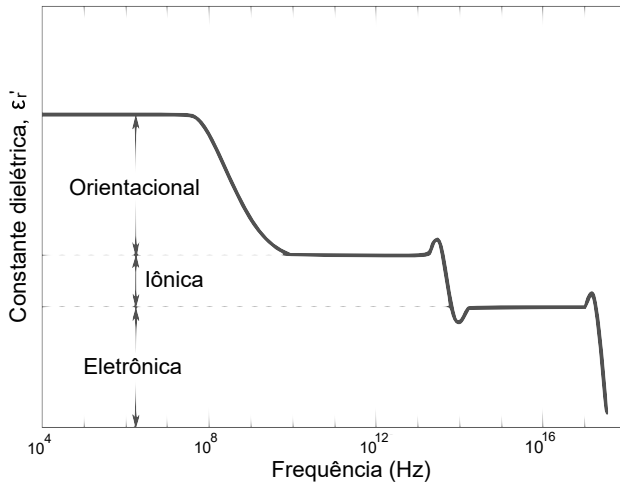


Figura 2.4: Variação da parte real da permissividade elétrica de um material que exibe os três tipos de polarização com a frequência do campo elétrico alternado. Adaptado de Callister e Rethwisch (2011).

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 2.4 (CALLISTER; RETHWISCH, 2011).

2.2 Revisão do estado da arte

2.2.1 Leite: características, produção e consumo

Segundo Muehlhoff et al. (2013), bilhões de pessoas ao redor do mundo consomem todos os dias leite e seus produtos derivados, sendo não apenas uma oportunidade de negócio para os produtores e a indústria de laticínios em geral, mas também uma fonte de nutrientes para a população mundial. Os autores comentam que o leite possui diversos nutrientes e contribui para suprir as necessidades de cálcio, magnésio, selênio, riboflavina, vitaminas B_5 e B_{12} do corpo, e que dessa forma, o aumento no consumo de laticínios e outros produtos de origem animal têm atuado como importantes fontes de nutrientes para uma grande parte dos países em desenvolvimento.

Sobre a composição do leite, Walstra et al. (2005) dizem que o conteúdo total de todas as substâncias, com exceção da água, é chamado de conteúdo de matéria seca e que há ainda a distinção entre o conteúdo de gordura e os sólidos que não sejam gordura. Ainda conforme os autores, a composição química do leite tem grande influência nos valores nutricionais, no sabor, no limite ao qual os micro-organismos podem crescer e nas reações químicas que podem acontecer no leite.

A produção mundial de leite aumentou em mais de 50% nas últimas 3 décadas, de 500 milhões de toneladas para 769 milhões de toneladas em 2013, sendo que a Índia é o maior produtor mundial de leite, com 18% da produção mundial, seguido pelos Estados Unidos da América, China, Paquistão e Brasil (FOOD; NATIONS, 2016).

Em específico sobre o Brasil, embora tenha sido um grande importador de laticínios no passado, hoje se tornou um dos

maiores produtores de leite de vaca do mundo, uma produção de 34.3 milhões de toneladas por ano, empregando quase um milhão de pessoas (WORLDATLAS, 2017).

Segundo Gerosa e Skoet (2012), o leite bovino domina a produção global de leite, representando 85% da produção global e pelo menos 80% da produção total em todas as regiões, com exceção do sul da Ásia, em que sua fatia é de 44%. Os autores também afirmam que o leite de búfala possui uma contribuição considerável a nível global, sendo responsável por 11% da produção mundial e 23% da produção em países em desenvolvimento.

2.2.2 Métodos para medição de gordura e caracterização do leite

Dentre os métodos relatados na literatura está a medição por meio de sensor de cavidade ressonante para a determinação de gordura e sólidos no leite bovino. Ávila et al. (2016) avaliam um sistema composto por um sensor de cavidade ressonante cilíndrica operando em torno de 200 MHz, um controlador e um circuito de aquisição e processamento de sinais baseado em PLL (malha de captura de fase). Segundo os autores, a frequência de ressonância do sensor de cavidade ressonante é inversamente proporcional a raiz quadrada da permissividade efetiva do leite fluindo dentro do sensor e isso pode ser observado com a diminuição da parte real da permissividade conforme a umidade do leite diminuía, aumentando a frequência de ressonância. Os autores concluem que o sistema avaliado permite a medição dos níveis de gordura e sólidos no leite de modo efetivo, com a vantagem de a geometria do sensor ser adequada para a operação em in-

dústrias.

Segundo Durante et al. (2016), considerando que a impedância varia de acordo com a frequência da corrente alternada de estímulo, o qual afeta a polarização das moléculas, vários materiais podem ser parametrizados ao relacionar essas mudanças aos componentes básicos de sua constituição, sendo possível obter informações sobre a composição e possível adulteração do leite bovino através de medições de impedância. Conforme os autores, para a caracterização das amostras foi adotada a frequência de 30 kHz, frequência em que o sensor apresentava 0,5% de incerteza e, de modo geral, o sistema mostrou sensibilidade de 1% para detectar adulteração no leite, em que, com as medições da impedância e pH, foi obtida uma precisão de 94,9%, classificando as amostras como “adulterado” e “não adulterado”.

O método por espectroscopia no infravermelho próximo (Near-Infrared Spectroscopy, NIRS) consegue detectar a presença de múltiplas substâncias numa amostra. Ribeiro et al. (2016) afirmam que isto ocorre porque a presença de substâncias altera como a amostra interage com a luz e que esta técnica pode ser aplicada para amostras em diferentes estados físicos, como sólido, líquido e gasoso, com a desvantagem de a calibração do equipamento necessitar de métodos mais sofisticados. Eles adicionaram diferentes quantidades de água às amostras de leite para testar o sistema a diferentes níveis de adulteração do leite e, realizando as medições em condições similares (25 °C e mesma temperatura e composição química do leite UHT), obtiveram um desvio padrão máximo de 2,59 para 8,26% de adição de água e a incerteza máxima para o equipamento na mesma configuração foi de $\pm 2,25\%$.

A viscosidade caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento. Segundo Venkateswaran et al. (2016), o dispositivo desenvolvido consegue medir a variação na viscosidade, registrando a posição da interface da amostra de leite adulterado e o fluido imiscível de referência no mesmo canal, com a desvantagem de necessitar do auxílio de um microscópio ótico (podendo ser substituído por um microscópio comercial pequeno) para medir as mudanças na largura ocupada. Os autores afirmam que para a adulteração com amido, a largura ocupada pelo leite adulterado no micro viscosímetro aumentou de $176,04 \mu m$ para $223,45 \mu m$, para a variação de 0,5% a 10% na adulteração, respectivamente.

Agranovich et al. (2016) utilizaram um sensor micro-ondas de umidade operando em 40 GHz para medir o “conteúdo úmido” e o total de sólidos no leite bovino a partir da absorção de um pulso eletromagnético que atravessou o leite. De acordo com os autores, o sensor de umidade funciona a partir do princípio de transmissão micro-ondas, em que a degradação da amplitude do sinal é medida após a onda atravessar um volume conhecido de amostra, e que na frequência de 40 GHz o sensor é sensível à presença de água e à intensidade do sinal chegando no detector diminui com o aumento no percentual de água na amostra. Eles afirmam que o dispositivo pode ser eficientemente usado para determinar a concentração dos principais constituintes do leite (para o caso do leite cru, é possível analisar o nível de gordura separadamente) e que o volume de partículas imersas em água influencia a absorção do sinal. Consequentemente, a correlação entre a força do sinal e o volume de proteínas e/ou gordura pode ser maior que a correlação com suas massas.

Joshi et al. (2015) usaram uma cavidade de onda EM de 2

portas com um *Vector Network Analyzer* (VNA) para a análise dos leites integral, desnatado e semidesnatado. Usando frequências de 10 MHz a 15 GHz, os autores mediram os valores de S_{11} (sinal refletido na entrada – porta 1) e S_{21} (sinal transmitido da entrada – porta 1 para a saída – porta 2), e as mudanças capturadas pelo sensor através do VNA representam as diferenças entre as amostras, podendo indicar uma composição diferente do leite (variação do conteúdo de gordura ou proteína), tendo sido obtido resultados ótimos em 2,03 GHz e 1,66 GHz para gordura e proteína, respectivamente.

O método de caracterização elétrica baseado em reflexão, em que as propriedades elétricas de um material são determinadas, segundo Malame, Bhuiya e Gupta (2014), é uma técnica simples, rápida e que pode ser realizada *in situ* e se refere ao uso de uma ponta de prova feita de um cabo coaxial, associado com analisadores de rede ou analisadores de impedância para determinar a constante dielétrica, fator de perdas e tangente de perdas de materiais, especialmente de alimentos líquidos. Ainda sobre os autores, no experimento foi observado que, com a adição de água a permissividade do leite aumenta, mas com a adição de açúcar a permissividade diminui e que, sobre o fator de perda, com a adição de água este fator primeiro diminui até a frequência chegar em aproximadamente 2 GHz, e então aumenta, enquanto com a adição de açúcar, o fator de perdas aumenta até 1 GHz, e então diminui.

Na Tabela 2.3 é feita uma comparação das principais tecnologias para caracterização do leite.

Tabela 2.3: Comparação das principais tecnologias para caracterização do leite

Tecnologia	Aplicação	Principais características	Limitações
Sensor cavidade ressonante (Ávila et al., 2016)	Detecção do total de sólidos e gordura no leite	Sensitividade de [0,08 e 0,10]g/100g mV para total de sólidos e gordura, respectivamente	Uso de água no vão da cavidade
Sensor cavidade ressonante (Joshi et al., 2015)	Monitoramento da qualidade do leite	Distingue bem os tipos de leite; identifica leite estragado	Uso de amostras laboratoriais; Necessidade de VNA
Absorção micro-ondas (Agranovich et al., 2016)	Caracterização do leite	Adequado para o monitoramento do total de sólidos	Uso de amostras laboratoriais
Impedância elétrica (Durante et al., 2016)	Detecção de adulteração no leite	Teste para diferentes tipos de adulteração; circuito de baixo custo e baixa complexidade	Dificuldade em identificar o tipo de adulteração; uso de amostras laboratoriais
Espectroscopia NIR (Ribeiro et al., 2016)	Detecção de adulteração no leite	Teste de adulteração por adição de água; incerteza máxima de $\pm 2,25\%$	Aparelhagem complexa; uso de amostras laboratoriais

CAPÍTULO 3

Metodologia

Este capítulo tem como objetivo detalhar as etapas de projeto de uma cavidade a ser utilizada como sensor. Ao longo do projeto é utilizado o software de simulação eletromagnética Keysight EMPro para verificar se os resultados obtidos até então estão de acordo com o esperado. Ao final deste capítulo é apresentado um fluxo de projeto para que seja possível reproduzir este trabalho ou até mesmo desenvolver um sensor cavidade ressonante para outra aplicação.

3.1 Problema

O sensor a ser desenvolvido neste projeto tem como função medir o percentual de gordura no leite. Dessa forma era necessário entender melhor sobre as propriedades dielétricas do leite. Para tal, o trabalho desenvolvido por Zhu, Guo e Liang

(2015) foi utilizado como base para relacionar a permissividade do leite com a frequência, o percentual de gordura e a temperatura.

De acordo com Zhu, Guo e Liang (2015), a constante dielétrica e o fator de perdas (parte real e imaginária da permissividade, respectivamente) diminuem com o aumento da gordura no leite e estas mudanças podem ser representadas pelas equações 3.1 e 3.2:

$$\epsilon' = a_1 F + b_1, \quad (3.1)$$

$$\epsilon'' = a_2 F + b_2, \quad (3.2)$$

em que F representa o percentual de gordura ($0,06\% \leq F \leq 4,04\%$) e a_1 , a_2 , b_1 e b_2 são constantes de regressão definidas pelo autor e que variam para valores diferentes de temperatura e frequência.

A partir do trabalho de Zhu, Guo e Liang (2015) foi possível observar que a variação na gordura não altera consideravelmente a forma com que os valores da constante dielétrica e do fator de perdas variam, sendo aproximadamente linear. Foi observado também que o fator de perdas atinge um mínimo nas frequências entre 1 GHz e 2 GHz.

Um outro trabalho interessante utilizado nesta etapa relaciona a permissividade do leite com a temperatura, produzido por Zhu, Guo e Jia (2014). Os autores mostram que, considerando um valor fixo para a frequência e a gordura do leite, a constante dielétrica do leite diminui mais rapidamente do que o fator de perdas com o aumento da temperatura, o que implica em uma tangente de perdas maior para temperaturas mais altas. Isso implica em o sensor precisar

ser mais robusto a perdas do material dielétrico. Por esse motivo, e também devido a maior facilidade para trabalhar com o material a ser analisado, foi definido que o leite seria medido em temperatura próxima de 25 °C.

3.2 Escolha do modelo de permissividade efetiva

Entendendo melhor sobre as propriedades dielétricas do material a ser analisado, a próxima etapa consiste em determinar como será feita a estimativa da permissividade efetiva, considerando todos os materiais dentro da cavidade.

Sihvola (1999) em seu livro oferece algumas fórmulas para calcular a permissividade efetiva considerando mais de um material. Cada fórmula tem suas nuances (como o tipo de inclusão, por exemplo) e para este trabalho foi adotado o modelo assimétrico de Bruggeman. Este modelo determina a permissividade efetiva para a mistura de dois materiais da seguinte forma:

$$\frac{\epsilon_i - \epsilon_{eff}}{\epsilon_i - \epsilon_e} = (1 - V) \left(\frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_e} \right)^{1/3}, \quad (3.3)$$

em que ϵ_i é a permissividade do material sendo incluso, V é a fração de volume do material sendo incluso, ϵ_e é a permissividade do meio homogêneo e ϵ_{eff} permissividade efetiva da mistura (SIHVOLA, 1999).

Para a cavidade ressonante em desenvolvimento é possível separá-la em 3 partes, o vão entre a cavidade e o duto PVC por onde o leite fluirá, o duto PVC e o vão preenchido por leite. Dessa forma é necessário utilizar a fórmula de Bruggeman duas vezes, com a primeira vez considerando o

vão entre a cavidade e o duto com o duto PVC, e a segunda vez considerando o vão preenchido por leite com o valor efetivo referente aos dois outros materiais. Com isso obtém-se um valor de permissividade referente a todos os materiais, o qual pode ser utilizado para estimar a frequência de ressonância nos modos da cavidade.

3.3 Definição da geometria da cavidade

Os diferentes formatos de cavidade irão diferir nas distribuições dos campos, no cálculo das frequências de ressonância e nos procedimentos para sua confecção. Os dois principais tipos de cavidades ressonantes são cavidades retangulares e cavidades cilíndricas.

Uma vantagem no uso da cavidade de formato cilíndrico está em seu fator de qualidade Q ser levemente maior. Como mostra Balanis (2012), considerando cavidades retangular e cilíndrica com a mesma relação altura-diâmetro, o fator de qualidade da cavidade cilíndrica é 8,26% maior que no caso da cavidade retangular. De acordo com o autor, isto é esperado devido ao fato de que a cavidade cilíndrica não possui tantos cantos afiados e arestas, fazendo com o que o volume e a área superficial sejam melhor utilizados pelos campos internos. Entretanto, é importante ter em mente que cavidades ressonantes geralmente possuem fator de qualidade bem elevados, fazendo com que essa vantagem relacionada ao fator de qualidade tenha seu impacto diminuído na escolha da geometria da cavidade.

Outro detalhe sobre o formato da cavidade está ligado a aplicação do sensor. Segundo Ávila et al. (2016), a geometria cilíndrica da cavidade é compatível com a tubulação

em instalações industriais (como no caso da padronização do leite, por exemplo), porém a aplicação do sensor raramente é o fator que determina a geometria a ser utilizada (outros fatores como modo de operação e tipo de acoplamento, por exemplo, podem influenciar na decisão).

Considerando as vantagens vistas e a aplicação deste projeto, para este projeto foi definido que a cavidade seria cilíndrica.

3.4 Definição do modo de operação

Para determinar a frequência de operação do sensor é necessário considerar principalmente o modo de operação, o tamanho da cavidade e a permissividade dos materiais dentro dela. Para relacionar o tamanho (no caso do sensor cilíndrico, raio e comprimento) ao modo de operação, Nyfors et al. (2000) utilizam a Figura 2.2.

A partir da Figura 2.2 podemos concluir que para cavidades mais curtas o modo dominante de operação é o TM_{010} , seguido então pelo modo TE_{111} (caso em que a razão raio por comprimento é baixa). Nyfors et al. (2000) também afirmam que para estas cavidades existe uma distância relativamente grande entre o modo dominante e o modo seguinte, podendo ser útil para casos em que o material a ser analisado apresenta perdas elevadas e pico de ressonância "baixo e amplo" (caso do leite, como veremos mais a frente). Esse fato faz com que diminuam as chances de os picos de ressonância serem confundidos, o que diminuiria a precisão do sensor.

Dessa forma, visando trabalhar com um sensor menor e operando no modo dominante (para evitar a influência de outros modos), foi definido que o sensor operaria no modo

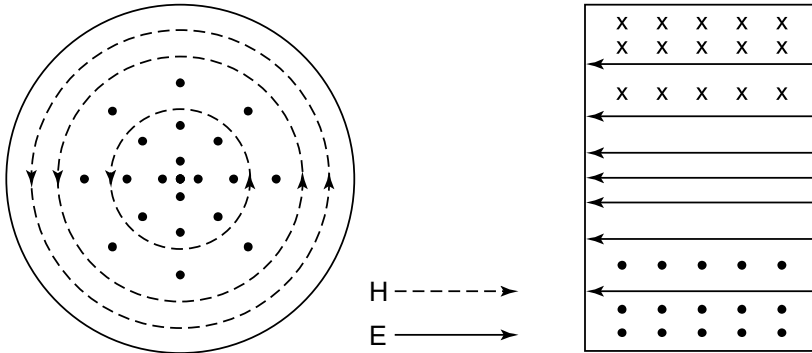


Figura 3.1: Linhas de campo elétrico E e campo magnético H de uma cavidade cilíndrica para o modo TM_{010} . Adaptado de Hill (2009).

TM_{010} . As linhas de campo elétrico e magnético para uma cavidade cilíndrica operando no modo TM_{010} são apresentados na Figura 3.1.

3.5 Estimativa do tamanho da cavidade

A frequência de operação do modo TM_{010} depende apenas do raio da cavidade, já que seu último índice é zero (o que elimina a dependência do comprimento da cavidade). Considerando uma cavidade cilíndrica preenchida com ar, o raio da cavidade para o qual a frequência de ressonância do modo TM_{010} ocorra em 2 GHz é o raio de 57,3 mm (menor valor para frequências entre 1 GHz e 2 GHz). Esse cálculo foi feito a partir da Equação 2.3 e é interessante para se ter uma ideia do tamanho que a cavidade terá, já que o material a ser analisado terá permissividade maior do que o ar, o que diminuirá a frequência de ressonância.

Desejando manter uma distância entre o modo TM_{010} e

o modo TE_{111} de pelo menos 10% da frequência de operação do modo dominante, temos que o comprimento da cavidade deve ser de 95 *mm* (valor obtido a partir da Equação 2.2). A distância ideal entre o modo dominante e o modo seguinte pode variar de acordo com as necessidades de cada projeto. É importante sempre lembrar que para modos de operação próximos há o risco de os picos de ressonância serem confundidos e que, em casos que o fator de qualidade é baixo, é necessária uma separação maior para que os picos de ressonância não se sobreponham.

3.6 Definição do preenchimento do vão da cavidade

Tendo uma estimativa do tamanho da cavidade, o próximo passo é definir qual material utilizar para preencher o vão da cavidade. A permissividade do material preenchendo a cavidade tem influência na frequência de ressonância dos modos, o que por sua vez está relacionado ao tamanho da cavidade ressonante.

Em casos em que a estimativa do tamanho da cavidade já aponta que a cavidade (sem considerar o material a ser analisado) está com um tamanho dentro dos limites permitidos para certa aplicação, pode-se utilizar o ar para preencher a cavidade. O uso do ar para preencher a cavidade permite uma instalação mais simples do sensor, já que não há a necessidade de se preocupar com a contenção de outro material na cavidade, mais crítico no caso em que é utilizado algum material dielétrico líquido.

Quando a estimativa do tamanho da cavidade (sem considerar o material a ser analisado) indica estar com um ta-

manho maior que o permitido para a aplicação estudada, uma opção é utilizar algum outro material dielétrico (como água ou até mesmo espuma dielétrica, por exemplo). Uma consequência em se utilizar outro material que não seja ar no vão é que, além de poder dificultar (ou até mesmo encarecer) a montagem do sensor, pode diminuir consideravelmente a frequência de operação do sensor dependendo da porcentagem que o volume do vão representar do volume total da cavidade e da permissividade do material dielétrico escolhido. Isso, dependendo do comportamento em frequência do material a ser analisado, pode implicar em o material se comportar de maneira que inviabilize as medições (como no caso de perdas excessivas em baixas frequências, por exemplo).

Para este projeto, como a estimativa do tamanho da cavidade demonstrou estar em níveis aceitáveis para a construção desse sensor, optou-se por utilizar o ar como material para preencher o vão da cavidade ressonante.

3.7 Definição da posição da amostra

A posição da amostra na cavidade está relacionada com a sensibilidade do sensor, ou seja, a variação da frequência de ressonância para certo valor da permissividade do material sob análise, neste caso o leite.

Para maior sensibilidade, deve-se colocar o material sendo estudado no ponto em que o campo elétrico é máximo no caso em que se mede a permissividade (DONOVAN et al., 1993; NYFORS et al., 2000). Considerando que para o modo TM_{010} o campo elétrico é máximo ao longo do eixo do comprimento, este foi escolhido como o eixo em que o duto PVC será colocado.

Para identificar a influência que a inserção do material a ser analisado exercerá sobre a frequência de ressonância é importante definir o raio do duto PVC. Dependendo do projeto e da disponibilidade, o raio do duto PVC pode ser uma restrição, como no caso da aplicação para o processo de padronização do leite que requer um duto com diâmetro de duas polegadas. Ter controle sobre o volume da amostra a ser analisada é interessante por ser um grau de liberdade a mais no projeto, especialmente quando se trabalha com materiais com perdas relativamente altas, o que é o caso do leite. Segundo Rubinger e Costa (2007), para materiais com a parte real da permissividade alta ou altas perdas, a perturbação pode ser muito grande. Ainda de acordo com os autores, a solução para este problema é diminuir a relação volume da amostra pelo volume da cavidade. Isso pode ser realizado tanto diminuindo o volume da amostra (no nosso caso diminuindo o raio do duto PVC), como aumentando o volume da cavidade, o que implicaria em diminuir a frequência de operação.

Outra possibilidade quando se trabalha com materiais com altas perdas é posicionar a amostra de modo a se ter menor sensibilidade. Isso ocorre quando se coloca a amostra em pontos onde o campo elétrico não é máximo, e faz com que as perdas dielétricas do material sob teste tenham menor influência no fator de qualidade (NYFORS et al., 2000).

A princípio foi mantida a decisão de posicionar o duto PVC no eixo de campo elétrico máximo e o volume inicial para o duto PVC foi de 15 *mm*.

3.8 Definição do tipo de acoplamento

Com a posição da amostra definida, pode-se então definir o tipo de acoplamento a ser utilizado. O ponto onde se coloca o acoplamento depende de onde se concentram as regiões de campo elétrico ou magnético máximo. O acoplamento do tipo ponta de prova é colocado no ponto de campo elétrico máximo, enquanto o acoplamento de tipo ponta loop é colocado na região de campo magnético máximo.

A escolha do tipo de acoplamento depende das regiões disponíveis na parede da cavidade e da necessidade (ou não) de o acoplamento ser de ajuste mais simples. Neste caso, como as regiões em que o campo elétrico é máximo estão sendo utilizadas pelo duto PVC com leite, o tipo de acoplamento a ser utilizado foi definido como ponta loop, nos pontos da parede da cavidade em que o modo TM_{010} tem campo magnético máximo.

3.9 Simulação da cavidade ressonante

O software escolhido para realizar as simulações foi o Keysight EMPro, um simulador eletromagnético 3D. As simulações realizadas neste projeto foram feitas usando o método numérico conhecido como método dos elementos finitos (FEM). O método dos elementos finitos é uma técnica numérica para a obtenção de soluções aproximadas para problemas de valores de contorno da física, sendo aplicado cada vez mais a problemas em campos como dinâmica de fluidos e eletromagnetismo (JIN, 2015).

A primeira simulação feita foi a de uma cavidade simples preenchida apenas por ar (Figura 3.2) e acoplada atra-

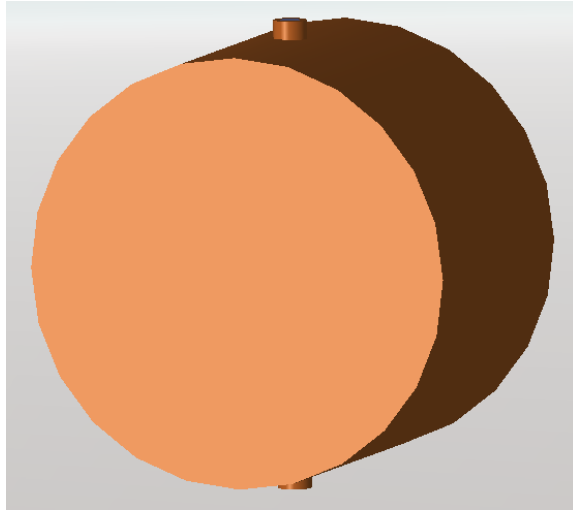


Figura 3.2: Cavidade simples preenchida apenas por ar e acoplada através de pontas loop simulada no ambiente do software Keysight EMPro.

vés de pontas loop formando arcos de raio $7,5 \text{ mm}$. O resultado desta simulação (Figura 3.3) mostra o primeiro modo (TM_{010}) na frequência de $2030,53 \text{ MHz}$, seguido do segundo modo (TE_{111}). Calculando a frequência para o modo TM_{010} esperada através da Equação 2.3 tem-se a frequência de $2002,52 \text{ MHz}$, indicando um erro de $1,40\%$ entre o cálculo teórico e a simulação.

A próxima simulação feita foi a de uma cavidade já com o duto PVC, mas com o duto também preenchido com ar. O resultado desta simulação (Figura 3.4) ficou próximo ao resultado da primeira simulação (Figura 3.3), com a frequência obtida na simulação de $1998,56 \text{ MHz}$, um erro de $0,31\%$ em relação ao valor esperado de $1992,33 \text{ MHz}$. Com isso é possível perceber que apenas a inserção do duto PVC não causa tanta alteração nos resultados obtidos.

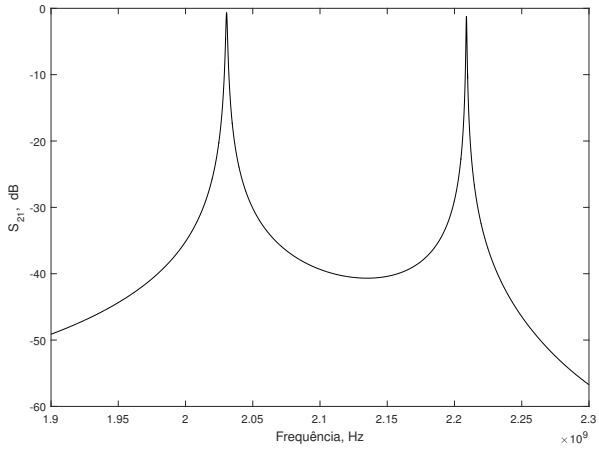


Figura 3.3: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade preenchida apenas por ar.

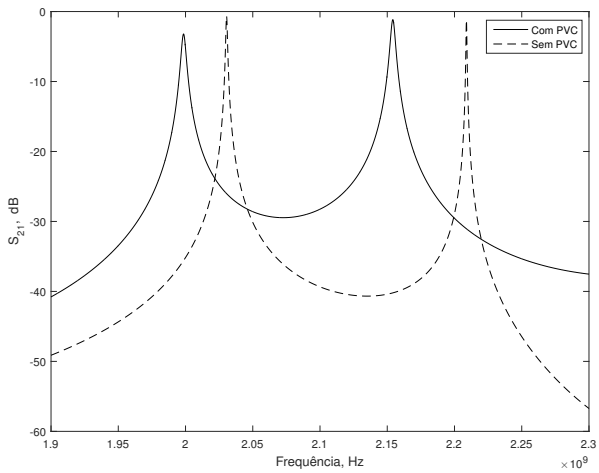


Figura 3.4: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e ar no duto.

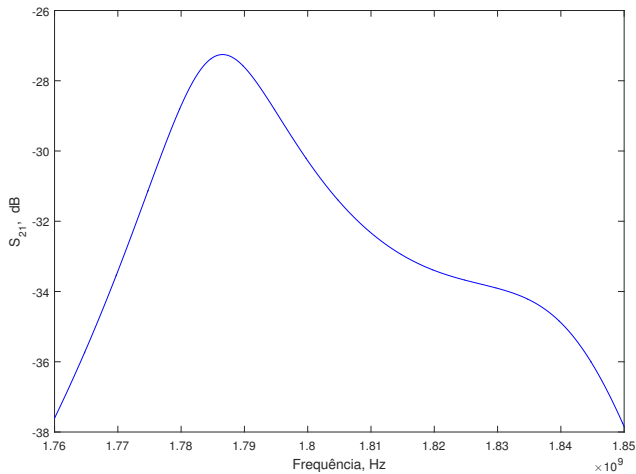


Figura 3.5: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e água no duto.

A terceira simulação feita é do caso em que o duto PVC está preenchido com água. O resultado desta simulação (Figura 3.5) permite ver que existe um pico de ressonância em 1786,32 MHz, com o do valor esperado do modo TM_{010} em 1800,26 MHz, portanto com um erro de 0,77%.

O próximo passo é simular com leite no duto PVC e analisar se ainda é possível identificar o pico de ressonância. Para isso foi considerado o leite com a constante dielétrica de 68 e a tangente de perdas de 0,20, valores obtidos e aproximados de Zhu, Guo e Liang (2015) para uma simulação inicial. A Figura 3.6 mostra o resultado para esta simulação. Como pode-se notar, não é possível identificar o pico de ressonância para este caso. Uma possível causa é o fato de as perdas do leite influenciarem o fator de qualidade a ponto

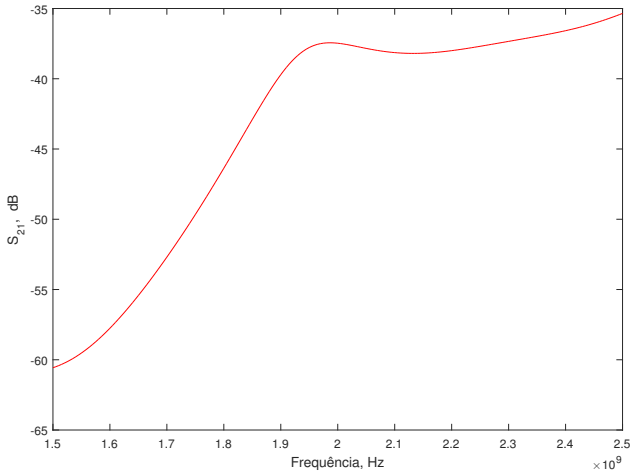


Figura 3.6: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do comprimento.

de a frequência de ressonância não ser mais identificável.

Este tipo de resultado indica a necessidade de rever alguns parâmetros de projeto. Esta análise será apresentada na próxima seção.

3.10 Ajustes

Caso as simulações indiquem que o projeto não funcione, alguns pontos devem ser revistos e alterados para então simular novamente.

Algumas opções são alterar o modo de operação da cavidade ou mudar a posição da amostra na cavidade. No primeiro caso, escolher um modo de operação cuja região de campo elétrico máximo não coincida com a região onde a

amostra é colocada pode diminuir a sensibilidade, tornando possível medir materiais com perdas dielétricas mais altas (NYFORS et al., 2000). No outro caso, Raju (2016) sugere que amostras que tenham altas perdas sejam colocadas em regiões onde o campo elétrico é mais baixo (não máximo).

Uma outra possibilidade seria utilizar outro material para preencher o vão da cavidade, como no sensor baseado em cavidade ressonante desenvolvido por Ávila et al. (2016), em que os autores utilizam água como material dielétrico preenchendo a cavidade e conseguem medir o percentual de gordura do leite.

Para este trabalho optou-se por mudar a posição do duto PVC. A intenção é trabalhar no modo dominante TM_{010} , evitando o risco de o sensor possivelmente confundir os picos de ressonância, e manter a cavidade sem a necessidade de preenchê-la com água.

Primeiro foi feito um teste analisando o impacto de alterar a posição do duto do eixo do comprimento para o eixo do raio, como mostra a Figura 3.7. Neste teste foram utilizadas duas cavidades de raio 100 mm e comprimento 50 mm , com amostras em formato cilíndrico de 10 mm de raio e 50 mm de comprimento preenchidas com leite. Utilizando as fórmulas 2.3 e 3.3, espera-se um pico de ressonância do modo TM_{010} em $1129,70\text{ MHz}$. Foram feitas duas simulações para esse caso. Em uma cavidade a amostra estava no eixo do comprimento (Figura 3.7a), onde o campo elétrico é máximo, e na outra cavidade a amostra estava no eixo do raio (Figura 3.7b). Os dois resultados são comparados na Figura 3.8. A curva referente a amostra no eixo do comprimento está em vermelho, enquanto a curva referente a amostra no eixo do raio está em verde. Percebe-se que apenas para o caso em

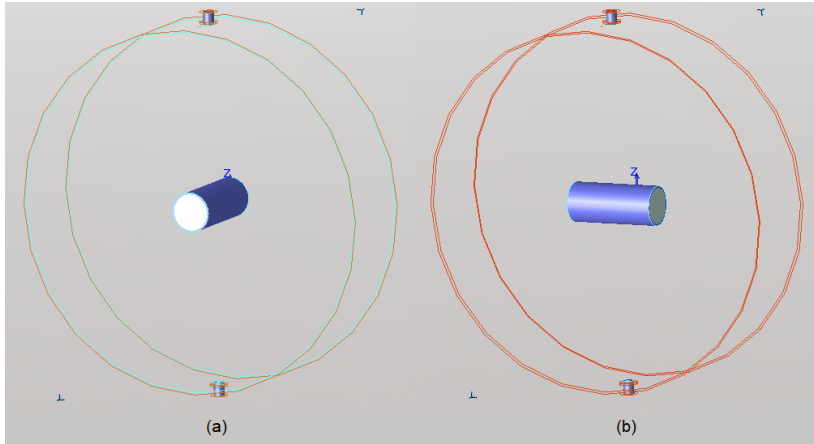


Figura 3.7: Cavityde com a amostra posicionada no eixo do comprimento (a) e com a amostra posicionada no eixo do raio (b).

que a amostra é posicionada no eixo do raio é possível identificar o pico de ressonância em 1105,01 MHz, o que dá um erro de 2,19% em relação ao calculado pelas fórmulas 2.3 e 3.3.

Com as alterações feitas no projeto, agora a simulação com leite é refeita. Considerando a constante dielétrica do leite como 65,34, valor referente a 3% de gordura em uma frequência estimada próxima a 1800 MHz e a tangente de perdas como 0,21, ambos valores obtidos a partir do trabalho de Zhu, Guo e Liang (2015), o resultado obtido é apresentado na Figura 3.9. Nota-se que desta vez é possível identificar um pico de ressonância em 1862,22 MHz. O valor esperado para a frequência de ressonância era de 1801,62 MHz, equivalente a um erro de 3,36%.

Com a alteração na orientação do duto de PVC, a região em que o campo elétrico é máximo ficou livre para utilizar o acoplamento ponta de prova. Para verificar qual acopla-

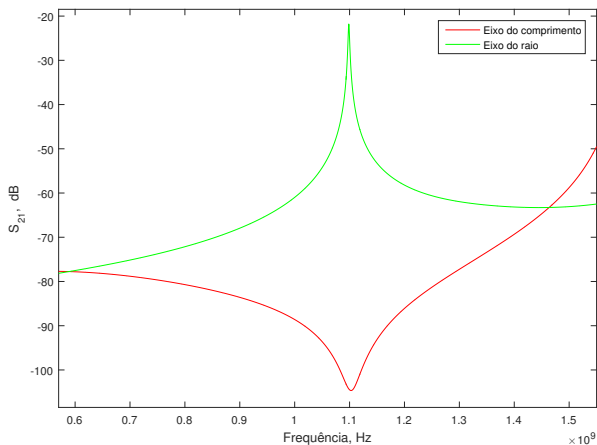


Figura 3.8: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência variando o eixo da amostra colocada em uma cavidade cilíndrica.

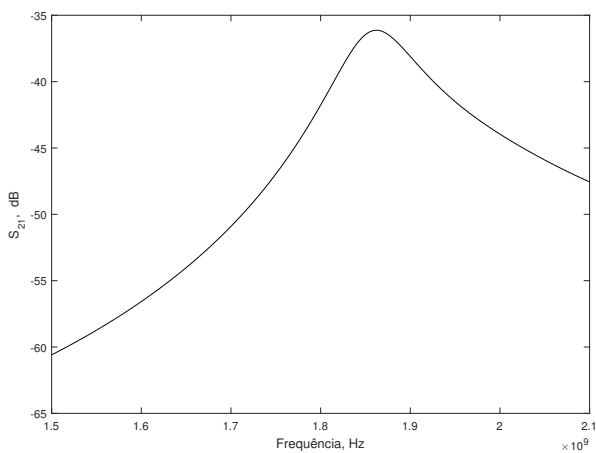


Figura 3.9: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do raio, utilizando acoplamento do tipo ponta loop.

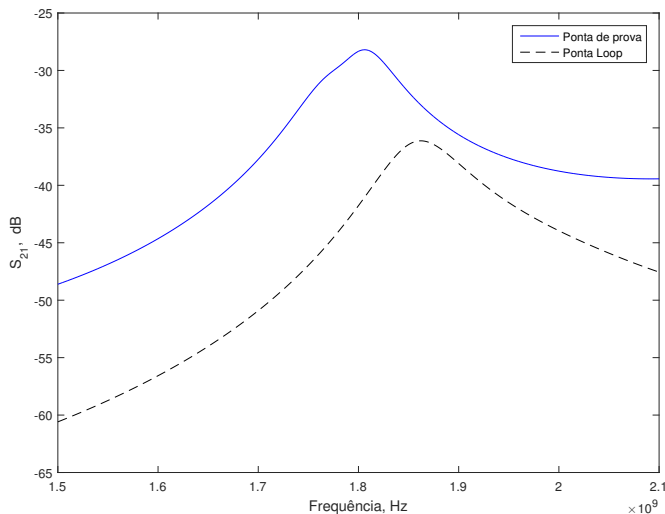


Figura 3.10: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do raio, utilizando acoplamento do tipo ponta de prova.

mento gera o melhor resultado, a mesma simulação é refeita utilizando o acoplamento ponta de prova. O resultado é mostrado na Figura 3.10. Neste caso, o pico de ressonância foi em 1806,02 MHz, um erro de 0,24%.

Comparando os resultados obtidos com os dois tipos de acoplamento, percebe-se que a ponta de prova oferece um ganho direto (S_{21}) melhor. Isto é importante para nosso projeto, pois assim o sinal de interesse fica ainda mais longe do chão de ruído, onde não seria possível identificá-lo, além de oferecer um fator de qualidade um pouco maior e um erro menor quando comparado ao valor da frequência de ressonância esperada.

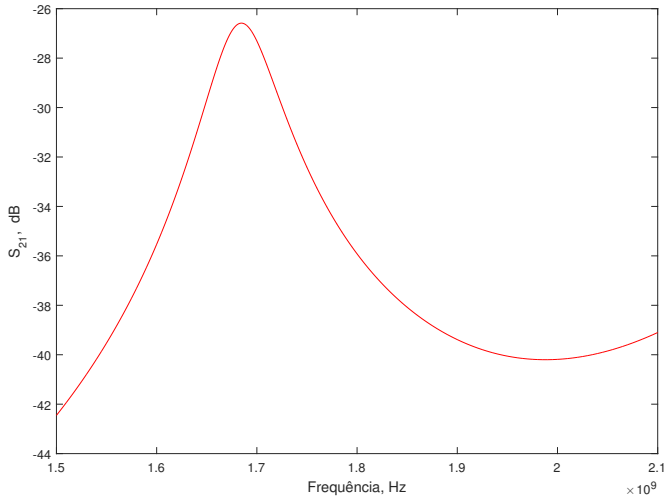


Figura 3.11: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para uma cavidade com seu tamanho otimizado, com o duto PVC e leite no duto colocado no eixo do raio, utilizando acoplamento do tipo ponta de prova.

Para determinar então qual seria o tamanho ideal para a cavidade é realizada uma varredura em frequência utilizando a cavidade com ponta de prova. Essa varredura foi feita variando o raio e o comprimento da cavidade garantindo que a frequência de ressonância do modo TM_{010} ficasse entre 1 GHz e 2 GHz. O melhor resultado obtido foi medido em 1684,61 MHz (Figura 3.11) para uma cavidade de 62,5 mm de raio e 97 mm de comprimento. Este resultado demonstrou a melhor relação S_{21} e fator de qualidade Q , sendo eles -26,58 dB e 23,9, respectivamente. A Tabela 3.1 compara os resultados obtidos nas simulações com o duto PVC e leite no eixo do raio nos casos em que foi utilizada ponta loop e ponta de prova (com a cavidade otimizada e não otimizada).

Tabela 3.1: Comparação dos resultados obtidos simulando a cavidade com o duto PVC e leite no eixo do raio.

	f_r (calculado)	f_r (simulado)	Erro	Q
Ponta loop	1801,62 MHz	1862,22 MHz	3,36%	20,09
Ponta de prova	1801,62 MHz	1806,02 MHz	0,24%	21,5
Ponta de prova (otimizado)	1680,45 MHz	1684,61 MHz	0,25%	23,9

Dessa forma, os parâmetros que proporcionam uma cavidade ótima são raio de 62,5 *mm*, comprimento de 97 *mm*, acoplamento tipo ponta de prova e duto PVC no eixo do raio, como na Figura 3.12 retirada do ambiente do software Keysight EMPro.

O próximo passo para este projeto é a confecção da cavidade ressonante para então realizar medidas reais que comprovem o funcionamento do sensor. Os resultados obtidos até então indicam que o sensor é capaz de identificar a frequência de ressonância. A frequência de ressonância pode ser relacionada com a permissividade do leite analisado, e como mostra Zhu, Guo e Liang (2015), a partir da permissividade é possível concluir qual o teor de gordura no leite. No entanto, isto não isenta o projeto de verificações reais considerando não idealidades.

3.11 Fluxo de projeto

Cada projeto da cavidade possui detalhes diferentes, o que pode requerer uma estratégia de desenvolvimento diferente, mas de uma forma geral o projeto de um sensor baseado em cavidade ressonante pode ser entendido como ocorrendo

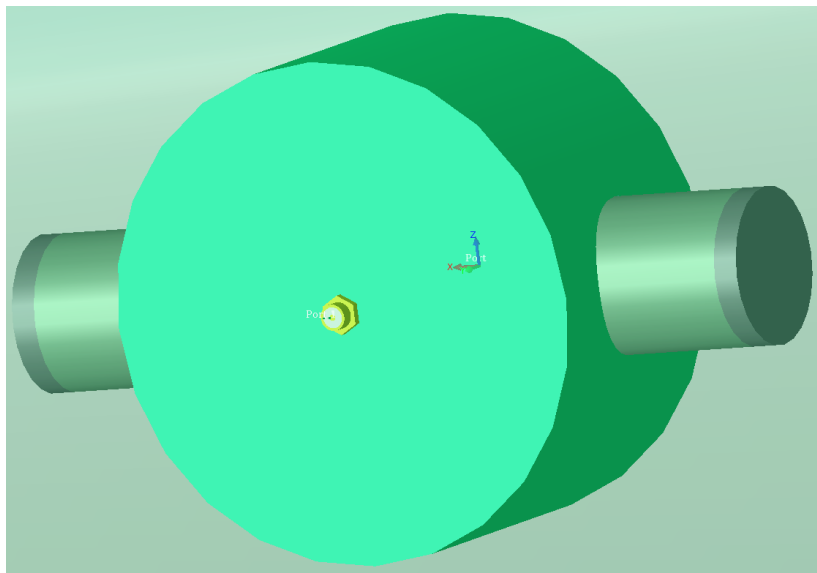


Figura 3.12: Cavidade ótima simulada no ambiente do software Keysight EMPro.

como descrito no fluxograma da Figura 3.13. Na maioria dos casos a principal diferença entre projetos será o número de restrições iniciais, como geometria e tamanho máximo da cavidade, por exemplo. Acredita-se que o fluxograma desenvolvido para esse projeto funcione para a maioria dos projetos de sensores baseados em cavidades ressonantes, podendo ser adaptado de acordo com as nuances de cada projeto.

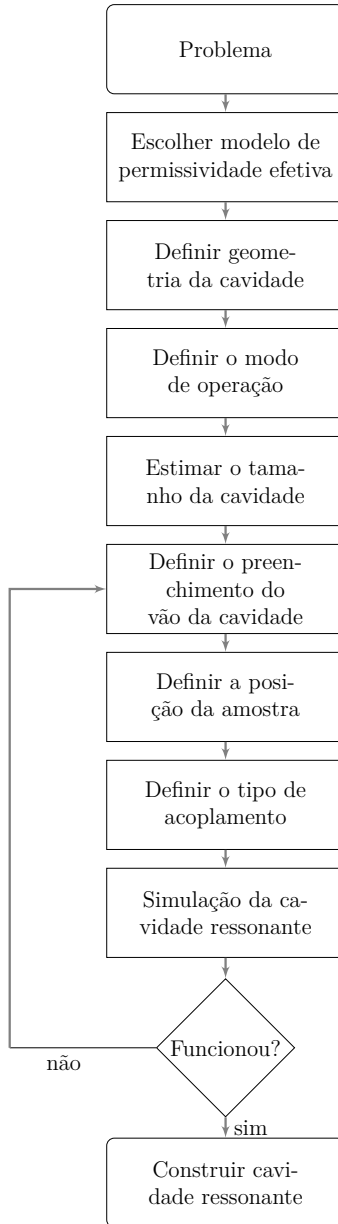


Figura 3.13: Fluxograma de projeto sugerido para o desenvolvimento de um sensor baseado em cavidade ressonante.

CAPÍTULO 4

Resultados

Este capítulo tem como objetivo mostrar como foi feita a prova de conceito do sensor projetado. Este caso real foi primeiramente simulado, para então ser medido com o auxílio de um VNA. As medições foram realizadas no Laboratório de Radiofrequência (LRF) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

4.1 Cavidade utilizada

Para a prova de conceito do estudo realizado até agora, foi utilizada uma lata de cera para carro. Esta lata tem formato cilíndrico, raio de 50 mm , comprimento de 58 mm e é feita de aço inox. O duto PVC escolhido foi de $1''$ ($13,9\text{ mm}$ de raio interno e $2,1\text{ mm}$ de espessura), valor escolhido para atender as limitações do comprimento da cavidade.

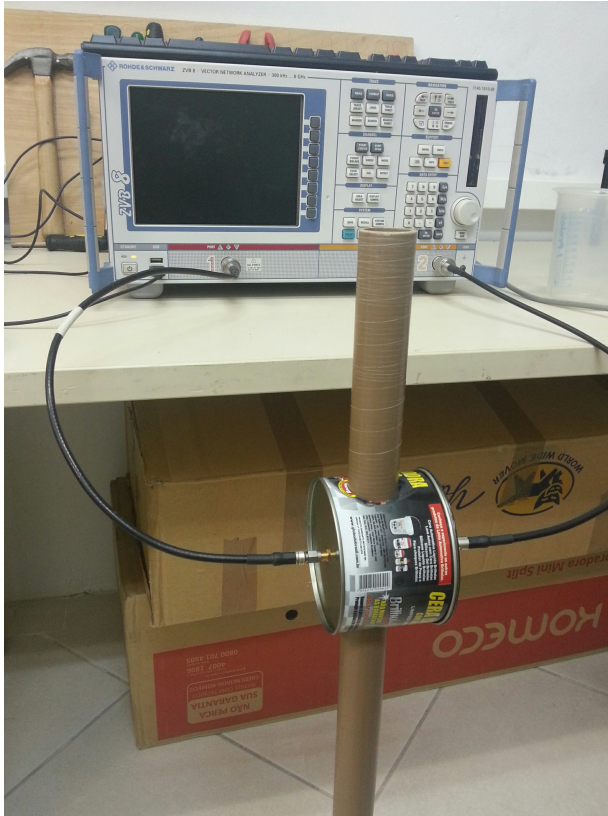


Figura 4.1: Medição da cavidade utilizando um analisador de rede.

As medições foram realizadas com o auxílio de um analisador de rede (VNA). O VNA é capaz de medir o coeficiente de transferência (S_{21}), executando uma varredura em frequência. O tipo de calibração realizada foi a calibração SOLT (Short-Open-Load-Thru). Para realizar as medições, os dois acoplamentos tipo ponta de prova foram conectados ao analisador de rede para que este excitasse a cavidade ressonante, como na Figura 4.1.

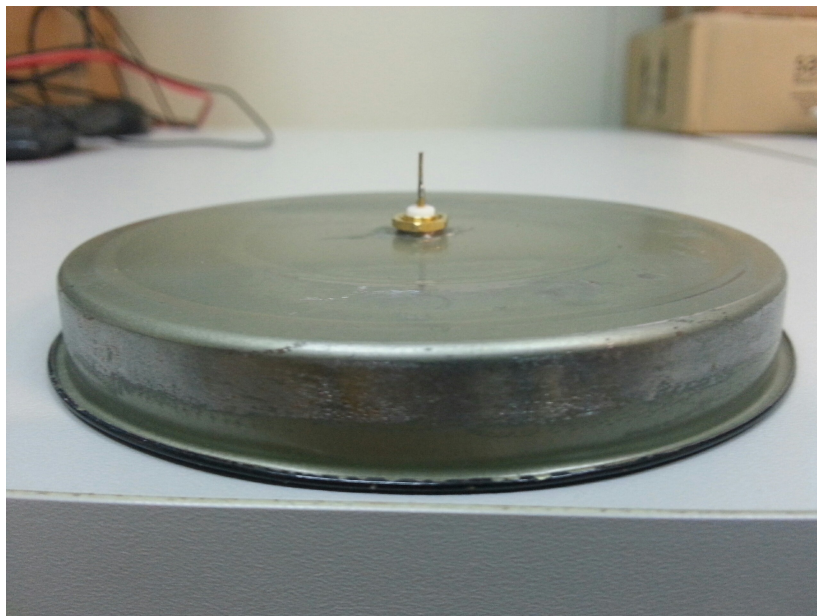


Figura 4.2: Tapa da cavidade com o acoplamento tipo ponta de prova.

Os acoplamentos ponta de prova foram fixados na cavidade através de furos na lata. Foram utilizados dois conectores SMA do tipo rosqueável, e a eles foram soldadas duas extensões de 5 *mm*, como mostra a Figura 4.2. Tanto os furos para o acoplamento, como os furos para passar o duto PVC na cavidade foram realizados com a ajuda do Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Foram feitas medições com cinco tipos de materiais no duto PVC: ar, água, leite desnatado, leite semidesnatado e leite integral. Os leites utilizados eram todos da marca Tirol e tinham seu teor de gordura especificados na embalagem. O leite integral tinha 3% de gordura, o leite semidesnatado

tinha 1% de gordura e o leite desnatado tinha 0% de gordura. A água utilizada era água potável. Todas as medições foram feitas com os materiais em temperatura de 23 °C, verificado com um termômetro de mercúrio.

4.2 Resultados obtidos

4.2.1 Simulações

Antes de realizar as medições, as simulações foram refeitas para as propriedades da nova cavidade.

A primeira cavidade simulada tinha o duto PVC preenchido com ar. O resultado desta simulação (Figura 4.3) teve um pico de ressonância em 2125,53 MHz, enquanto a frequência de ressonância esperada para o modo TM_{010} era de 2241,64 MHz (erro de 5,18%).

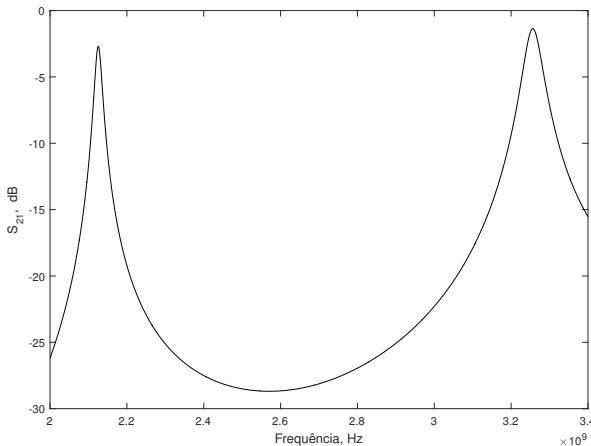


Figura 4.3: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com ar.

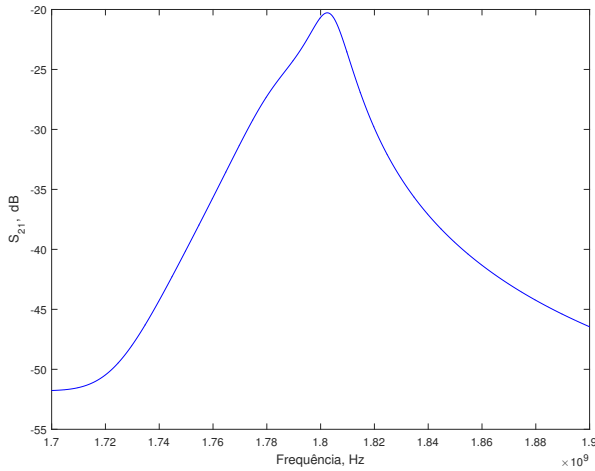


Figura 4.4: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com água.

A segunda simulação considerava o duto preenchido com água. A Figura 4.4 mostra um pico de ressonância em 1802,55 MHz. Para o caso da água, o modo TM_{010} tem sua ressonância em 1835,31 MHz, um erro de 1,79% entre simulação e cálculos teóricos.

As simulações considerando os leites com 0%, 1% e 3% foram feitas considerando valores de constante dielétrica e tangente de perdas obtidos através das Equações 3.1 e 3.2. Os picos de ressonância referentes aos teores de gordura de 0%, 1% e 3% foram, respectivamente, 1858,57 MHz, 1867,02 MHz e 1884,06 MHz (Figura 4.5).

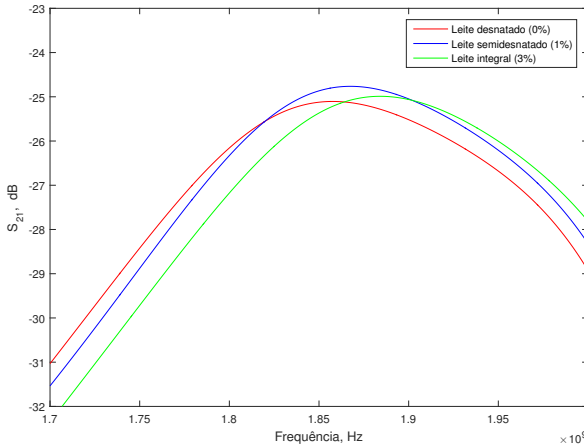


Figura 4.5: Resultado de simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com leite desnatado (0%), semidesnatado (1%) e integral (3%).

4.2.2 Medições

A primeira medição foi feita com o duto PVC preenchido apenas com ar. O resultado medido é apresentado na Figura 4.6. O pico de ressonância para o primeiro modo está localizado em 2130,25 MHz. A frequência de ressonância para o modo TM_{010} é em 2241,64 MHz, o que representa um erro de 4,97%. O valor medido para a impedância de entrada foi de $12,39 - j3,52 \Omega$.

A segunda medição foi feita colocando água de torneira no duto PVC, preenchendo-o por completo. A Figura 4.7 apresenta o resultado de medição obtido. O pico de ressonância para o modo TM_{010} em uma cavidade com as dimensões da lata (e com o duto PVC com água) é em 1835,31 MHz. Como o pico de ressonância medido foi em 1802,50 MHz,

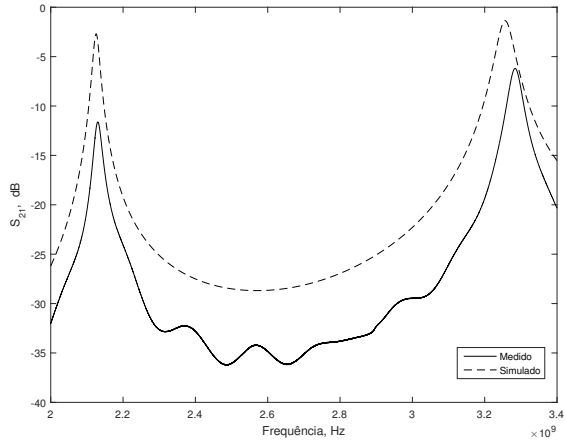


Figura 4.6: Resultados de medição e simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com ar.

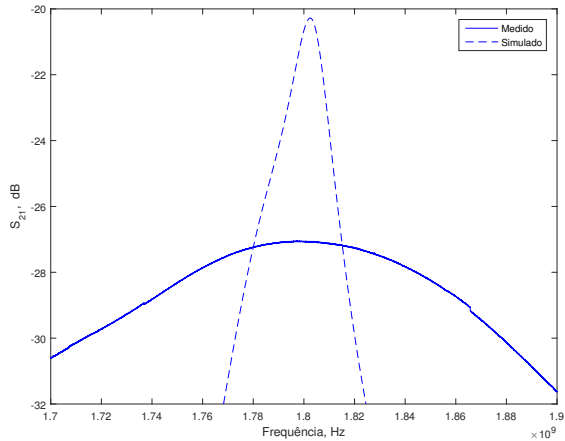


Figura 4.7: Resultados de medição e simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com água.

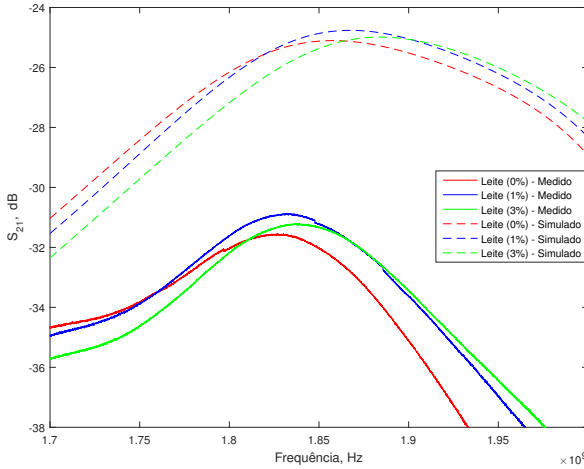


Figura 4.8: Resultados de medição e simulação do coeficiente de transmissão (S_{21}) por frequência para a cavidade (lata) com o duto PVC preenchido com leite desnatado (0%), semidesnatado (1%) e integral (3%).

houve um erro de 1,79%. O valor medido para a impedância de entrada neste caso foi de $4,60 - j16,35 \Omega$.

Por último foram feitas as medições com os leites desnatado (0% de gordura), semidesnatado (1% de gordura) e integral (3% de gordura). Os resultados se encontram na Figura 4.8, os quais mostram picos de ressonância em 1826,70 MHz, 1829,80 MHz e 1835,95 MHz, respectivamente para os leites desnatado, semidesnatado e integral. Os valores medidos para a impedância de entrada foram de $3,54 - j15,65 \Omega$, $3,55 - j13,07 \Omega$ e $3,48 - j15,14 \Omega$, respectivamente, uma variação relativamente pequena, o que pode ser interessante para o caso em que se projete uma rede de adaptação de impedância para o sensor.

A tabela 4.1 compara as simulações com as medições.

Tabela 4.1: Comparação entre as simulações e as medições.

	f_r (calculado)	f_r (simulado)	f_r (medido)	Q (simulado)	Q (medido)	S_{21} (simulado)	S_{21} (medido)	Z_{in} (medido)
Ar	2241,64 MHz	2125,53 MHz	2130,25 MHz	111,87	94,93	-2,69 dB	-11,65 dB	$12,39 - j3,52 \Omega$
Água	1835,31 MHz	1802,55 MHz	1802,50 MHz	105,78	12,43	-20,28 dB	-27,07 dB	$4,60 - j16,35 \Omega$
Leite desnatado (0%)	1837,83 MHz	1858,57 MHz	1826,70 MHz	9,44	13,99	-25,11 dB	-31,59 dB	$3,54 - j15,65 \Omega$
Leite semidesnatado (1%)	1838,15 MHz	1867,02 MHz	1829,80 MHz	10,37	12,33	-24,76 dB	-30,92 dB	$3,55 - j13,07 \Omega$
Leite integral (3%)	1838,87 MHz	1884,06 MHz	1835,95 MHz	9,32	11,76	-24,99dB	-31,22 dB	$3,48 - j15,14 \Omega$

Os resultados obtidos com a medição indicam ser possível medir o percentual de gordura do leite, apresentando claramente uma distinção na frequência de ressonância para os três tipos de leite testados com uma variação na frequência de ressonância de aproximadamente 3,09 MHz para cada 1% de gordura no leite. A correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura é mostrada na Figura 4.9 e é melhor descrita pelo modelo de regressão $y = 3,25 * 10^{-7}x - 5,93 * 10^2$, em que x é a frequência de ressonância (em Hz) e y é o percentual de gordura no leite (em %). A Tabela 4.2 apresenta a análise de correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite para as medições realizadas.

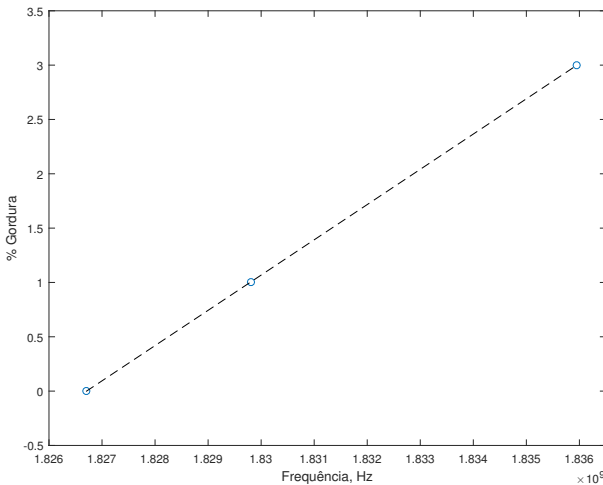


Figura 4.9: Correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite.

Embora os resultados tenham sido satisfatórios para as amostras testadas, não é possível definir precisamente qual

Tabela 4.2: Análise de correlação entre a frequência de ressonância e o percentual de gordura no leite.

p-valor	R^2
0,0013	0,999996

a sensibilidade do sensor. As amostras utilizadas foram obtidas de leites comercializados na região e o teor de gordura de cada amostra foi definido como o valor especificado no produto. O fato de ter sido utilizada uma lata de cera para o protótipo da cavidade ressonante, junto com uma pequena imprecisão nos furos realizados (principalmente nos furos por onde passa o duto PVC), pode ter diminuído o fator de qualidade observado.

Na Tabela 4.3 é novamente feita uma comparação das principais tecnologias para caracterização do leite, agora incluindo este trabalho.

Tabela 4.3: Comparação das principais tecnologias para caracterização do leite

Tecnologia	Aplicação	Principais características	Limitações
Sensor cavidade ressonante (Este trabalho)	Detecção da gordura no leite	Distingue bem os tipos de leite; Uso de ar no vão da cavidade	Necessidade de VNA; Cavidade feita com lata de cera
Sensor cavidade ressonante (Ávila et al., 2016)	Detecção do total de sólidos e gordura no leite	Sensitividade de [0,08 e 0,10]g/100g mV para total de sólidos e gordura, respectivamente	Uso de água no vão da cavidade
Sensor cavidade ressonante (Joshi et al., 2015)	Monitoramento da qualidade do leite	Distingue bem os tipos de leite; identifica leite estragado	Uso de amostras laboratoriais; Necessidade de VNA
Absorção micro-ondas (Agranovich et al., 2016)	Caracterização do leite	Adequado para o monitoramento do total de sólidos	Uso de amostras laboratoriais
Impedância elétrica (Durante et al., 2016)	Detecção de adulteração no leite	Teste para diferentes tipos de adulteração; circuito de baixo custo e baixa complexidade	Dificuldade em identificar o tipo de adulteração; uso de amostras laboratoriais
Espectroscopia NIR (Ribeiro et al., 2016)	Detecção de adulteração no leite	Teste de adulteração por adição de água; incerteza máxima de $\pm 2,25\%$	Aparelhagem complexa; uso de amostras laboratoriais

CAPÍTULO 5

Conclusão

Esta monografia apresentou o projeto de um sensor baseado em cavidade ressonante para medir o percentual de gordura no leite. Este tipo de sensor pode ser aplicado em diferentes partes da produção e processamento do leite, onde poderia ser utilizado para garantir a qualidade dos produtos, melhorar a eficiência de produção, entre outros.

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 material para preencher o vão da cavidade, o tipo de acoplamento e a posição do material em análise. A partir deste estudo é então desenvolvido um fluxo de projeto para que este trabalho possa ser reproduzido e para que outros trabalhos baseados na mesma tecnologia possam ser desenvolvidos.

Durante o projeto da cavidade foi encontrado o problema

de não conseguir detectar picos de ressonância na simulação com o leite. Isto levou o projeto a ser revisto e o problema foi resolvido com a alteração da posição da amostra sob teste. Também durante o projeto, foram realizadas simulações comparando os tipos de acoplamento ponta de prova e ponta loop. Os resultados das simulações indicaram que o acoplamento ponta de prova oferecia um ganho direto melhor, fator de qualidade um pouco maior e frequência de ressonância mais próxima do valor esperado.

A prova de conceito foi realizada a partir de uma lata de cera feita de aço-inox. As medições foram feitas em laboratório e testaram os leites desnatado (0% de gordura), semidesnatado (1% de gordura) e integral (3% de gordura). Com o auxílio do analisador de rede foi possível obter os parâmetros de espalhamento de rede (parâmetros S), com os quais é possível identificar a frequência de ressonância, fator de qualidade, coeficiente de transmissão e impedância de entrada do sistema. Com a análise dos resultados de medição foi possível distinguir bem os três tipos de leite testados, indicando a capacidade do sensor em identificar o percentual de gordura do leite.

Para trabalhos futuros seria interessante realizar medições com amostras em maior quantidade e variedade, sendo caracterizadas em outros percentuais de gordura. Desta forma será possível identificar com precisão a sensibilidade do sensor, dado necessário para uma possível implementação deste tipo de sensor na indústria. Outra análise interessante seria realizar as medições em temperaturas mais altas, pois operar em temperaturas mais altas pode ser requisito para algumas aplicações, como é o caso da padronização do leite.

Referências bibliográficas

AGILENT. *Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials*. 2005. Disponível em: <http://academy.cba.mit.edu/classes/input_devices/meas.pdf>.

AGRANOVICH, D. et al. A microwave sensor for the characterization of bovine milk. *Food Control*, Elsevier, v. 63, p. 195–200, 2016.

ALVES, C. Efeito de variações sazonais na qualidade do leite cru refrigerado de duas propriedades de Minas Gerais. UFMG, 2006.

ÁVILA, H. E. et al. Determination of solids and fat contents in bovine milk using a phase-locked resonant cavity sensor. In: IEEE. *Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), International Symposium on*. [S.l.], 2016. p. 1–4.

BALANIS, C. A. *Advanced engineering electromagnetics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

BRITO, J. R. F. *A qualidade do leite*. 1998.

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

CHEN, L.-F. et al. *Microwave electronics: measurement and materials characterization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.

CUNHA, A. S. *A crise da adulteração do leite*. 2007. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/documentos-e-pesquisa/publicacoes/estnottec/areas-da-conle/tema2/2007-18160.pdf>>.

DONOVAN, S. et al. Microwave cavity perturbation technique: Part ii: Experimental scheme. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Springer, v. 14, n. 12, p. 2459–2487, 1993.

DURANTE, G. et al. Electrical impedance sensor for real-time detection of bovine milk adulteration. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 4, p. 861–865, 2016.

EMBRAPA. *Oportunidades para startups*. 2016. Disponível em: <<http://www.cnpq.embrapa.br/ideasformilk/content/oportunidades-para-startups>>.

FOOD; NATIONS, A. O. of the U. *Milk production*. 2016. Disponível em: <<http://www.fao.org/agriculture/dairy-gateway/milk-production/en/>>.

GEROSA, S.; SKOET, J. Milk availability: trends in production and demand and medium-term outlook. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, n. 12–01, p. 1–38, 2012.

//www.milkpoint.com.br/cadeia-do-leite/giro-lacteo/faesc-quer-solucao-para-produtor-de-leite-atingido-com-fechamento-de-lacteos.aspx>.

MUEHLHOFF, E. et al. *Milk and dairy products in human nutrition*. [S.l.]: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2013.

NYFORS, E. G. et al. *Cylindrical microwave resonator sensors for measuring materials under flow*. [S.l.]: Helsinki University of Technology, 2000.

POZAR, D. M. *Microwave engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

RAJU, G. G. *Dielectrics in electric fields*. [S.l.]: CRC press, 2016.

RIBEIRO, L. de S. et al. Development of a hardware platform for detection of milk adulteration based on near-infrared diffuse reflection. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 65, n. 7, p. 1698–1706, 2016.

RUBINGER, C.; COSTA, L. Building a resonant cavity for the measurement of microwave dielectric permittivity of high loss materials. *Microwave and Optical Technology Letters*, Wiley Online Library, v. 49, n. 7, p. 1687–1690, 2007.

SIHVOLA, A. H. *Electromagnetic mixing formulas and applications*. [S.l.]: Iet, 1999.

VENKATESWARAN, P. S. et al. Rapid and automated measurement of milk adulteration using a 3d printed optofluidic microviscometer (omv). *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 16, n. 9, p. 3000–3007, 2016.

VIOTTO, W. H.; CUNHA, C. R. *Teor de sólidos do leite e rendimento industrial*. 2006.

WALSTRA, P. et al. *Dairy science and technology*. [S.l.]: CRC press, 2005.

WORLDATLAS. *Top Cows' Milk Producing Countries In The World*. 2017. Disponível em: <<http://www.worldatlas.com/articles/top-cows-milk-producing-countries-in-the-world.html>>.

ZHU, X.; GUO, W.; JIA, Y. Temperature-dependent dielectric properties of raw cow's and goat's milk from 10 to 4,500 mhz relevant to radio-frequency and microwave pasteurization process. *Food and bioprocess technology*, Springer, v. 7, n. 6, p. 1830–1839, 2014.

ZHU, X.; GUO, W.; LIANG, Z. Determination of the fat content in cow's milk based on dielectric properties. *Food and Bioprocess Technology*, Springer, v. 8, n. 7, p. 1485–1494, 2015.

